



INSTITUTO FEDERAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO

Campus Cabo de Santo Agostinho

Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária

ANDRELANE MARIA DA SILVA ALVES

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DO LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Cabo de Santo Agostinho

2025

ANDRELANE MARIA DA SILVA ALVES

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DO LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Monografia apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – *campus* Cabo de Santo Agostinho, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Henrique de Lima Gadelha

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Clara Mavia de Mendonça

Cabo de Santo Agostinho

2025



Autorizamos a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico para fins de ensino e pesquisa desde que citada a fonte. Este documento está licenciado com uma Licença Creative Commons -Atribuição Não Comercial 4.0 Internacional.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca do IFPE – *campus* Cabo de Santo Agostinho

A474e Alves, Andrelane Maria da Silva

Estimativa da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana do Recife / Andrelane Maria da Silva Alves .– Cabo de Santo Agostinho: IFPE, 2025.
64 f.: il.

Orientador: Fernando Henrique de Lima Gadelha
Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Campus Cabo de Santo Agostinho.

1. Águas residuárias. 2. Aproveitamento energético. 3. Metano. I. Gadelha, Fernando Henrique de Lima. II. Título.

CDD 665.7

Catalogação na fonte: Bibliotecária Ádja de Fátima Lima Figueirôa
Câmara - CRB-4/2245

ANDRELANE MARIA DA SILVA ALVES

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO
ANAERÓBIA DO LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE**

Trabalho aprovado em: Cabo de Santo Agostinho, 24/02/2025.

Fernando Henrique de Lima Gadelha

Maria Clara de Mavia Mendonça

Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves

Roseana Florentino da Costa Pereira

Cabo de Santo Agostinho

2025

Dedico este trabalho ao Verbo, que,
antes de ser carne, é a
palavra a me inspirar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, que esteve ao meu lado desde a infância, adolescência e vida adulta. Suas mãos me guiaram até este momento e me acompanharam durante toda a minha graduação. Conforme diz o Salmo 23: "O Senhor é o meu pastor; nada me faltará. Ele me faz repousar em pastos verdes e me conduz a águas tranquilas." A cada etapa da minha jornada, senti sua presença constante, trazendo-me conforto, força e sabedoria.

Aos meus pais, Cláudia Silva e Luiz Alves, meus eternos incentivadores, que sempre acreditaram em mim e investiram na minha educação e no meu crescimento profissional ao longo de toda a minha vida. Como disse Adélia Prado: "*O que a memória ama, fica eterno.*" E é com imenso amor e gratidão que guardo na memória cada gesto de apoio e cada sacrifício feito por vocês para que eu pudesse alcançar meus sonhos.

Às minhas irmãs, Andrea, Andreza e Andreziana que são minhas companheiras de vida e sempre estiveram ao meu lado acreditando nos meus sonhos e colaborando de todas as formas, sou eternamente grata por tê-las.

Aos meus sobrinhos, meus pequenos incentivadores, espero ser um exemplo para vocês durante toda a vida.

Aos amigos de graduação, em especial a Givaldo Silva, meu fiel companheiro, minha gratidão pelo companheirismo e pela amizade que se fortaleceu ao longo dos últimos anos. Também agradeço a Átila Monique, Beatriz Lourdes, Edvaldo Neto, Evany Adriano, Fabricio David e Lenival Silva por tornarem essa jornada mais leve, repleta de alegria e momentos de felicidades.

Aos amigos de vida, em especial a André Cândido, Inaclecia Patrícia, Tassiane Leyla, Rúama Cândido, Vanuza Maria e Kassio Sabino, minha eterna gratidão por me mostrarem que os grandes laços de amor e amizade podem ser construídos e preservados para sempre.

Ao meu orientador, Fernando Gadelha, minha gratidão pela presença, ensinamentos e experiências que foram fundamentais para minha formação e trajetória profissional. Seu constante apoio e incentivo contribuíram significativamente para a pessoa que me tornei.

À minha coorientadora, Maria Clara, que é um verdadeiro exemplo para minha vida profissional. Espero, um dia, alcançar o mesmo nível de competência e dedicação que ela demonstra na área de Efluentes.

Ao corpo docente do Instituto Federal de Pernambuco - *campus Cabo de Santo Agostinho*, em especial a Diogo Paz, Dayana Freitas, Edilândia Dantas e Rogério Oliveira, pelo conhecimento compartilhado nos últimos anos e por toda a parceria.

Aos servidores do IFPE - *campus Cabo*, em especial a André Ferreira, serei eternamente grata pelas palavras de incentivos e apoio desde o curso técnico e por acreditar no meu potencial.

À BRK Ambiental, em especial a Fábio Lourenço, Manuela Bandeira, Natalie Albuquerque, Renata Felipe e Robson Nascimento por contribuírem de maneira significativa na minha vida profissional.

À Companhia Pernambucana de Saneamento e à BRK Ambiental, pela disponibilidade de dados que viabilizaram o desenvolvimento deste estudo.

*“Mas poucos sabem qual é o rio da
minha aldeia. E para onde ele vai.
E donde ele vem. E por isso,
porque pertence a menos gente, é
mais livre”.*

Fernando Pessoa

RESUMO

O tratamento de esgoto é um elemento essencial do saneamento básico, contribuindo para a preservação ambiental e a saúde pública. No Brasil, desafios estruturais afetam a eficiência desse processo, exigindo soluções que combinem tratamento eficaz e recuperação energética. Nesse contexto, os sistemas anaeróbios se destacam pela remoção eficiente de matéria orgânica e pela produção de biogás, um subproduto com potencial energético. Entre esses sistemas, o reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) é amplamente utilizado por sua eficiência na degradação da carga orgânica e geração de biogás. Assim, este estudo tem como objetivo estimar a produção de biogás em sistemas anaeróbios de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) da Região Metropolitana do Recife, operadas por meio de parceria público-privada entre a BRK e a Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). Com base em dados da literatura e nas informações de monitoramento do ano de 2023 fornecidas pela Compesa, foi estimado o potencial de produção de biogás analisadas nas ETEs 10.01, Gaibu e Minerva. Para tanto, calculou-se a capacidade de produção de lodo em cada estação, permitindo a estimativa do potencial de geração de biogás e gás metano. Além disso, foi estimado o potencial energético do biogás e a economia associada à geração dessa energia. Os resultados indicaram que a estação com maior carga orgânica afluyente, a ETE 10.01, apresentou melhor desempenho, gerando volumes mais expressivos de biogás e alcançando maior eficiência energética. Embora a produção de biogás não suprisse completamente a demanda energética das estações, seu aproveitamento reduziu os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa, reforçando sua viabilidade como alternativa sustentável. Ademais, a ETE 10.01 registrou uma alta estimativa de economia energética com o uso do biogás, evidenciando o potencial de expansão dessa estratégia. Dessa maneira, o trabalho destaca a relevância do biogás como fonte de energia renovável e justifica novos estudos para otimizar sua aplicação, ampliando seu uso na região.

Palavras-chave: Águas residuárias. Aproveitamento energético. Metano. UASB.

ABSTRACT

Wastewater treatment is an essential component of basic sanitation, contributing to environmental preservation and public health. In Brazil, structural challenges affect the efficiency of this process, requiring solutions that combine effective treatment and energy recovery. In this context, anaerobic systems stand out for their efficient removal of organic matter and the production of biogas, a byproduct with energy potential. Among these systems, the UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactor is widely used for its efficiency in degrading organic loads and generating biogas. Thus, this study aims to estimate biogas production in anaerobic systems of Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the Metropolitan Region of Recife, operated through a public-private partnership between BRK and Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). Based on data from the literature and monitoring information from 2023 provided by Compesa, the biogas production potential was estimated for WWTPs 10.01, Gaibu, and Minerva. To this end, the sludge production capacity of each plant was calculated, allowing for the estimation of the biogas and methane generation potential. Additionally, the biogas energy potential and the associated economic savings from energy generation were estimated. The results indicated that the WWTP with the highest organic load influent, WWTP 10.01, showed the best performance, generating more significant volumes of biogas and achieving greater energy efficiency. Although biogas production did not fully meet the energy demand of the plants, its utilization reduced operational costs and greenhouse gas emissions, reinforcing its viability as a sustainable alternative. Moreover, WWTP 10.01 recorded a high estimated energy savings from biogas use, highlighting the potential for expanding this strategy. Thus, this study underscores the relevance of biogas as a renewable energy source and justifies further research to optimize its application, expanding its use in the region.

Keywords: Wastewater. Energy potential. Methane. UASB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processos envolvidos na digestão anaeróbia.....	22
Figura 2 – Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB.	27
Figura 3 – Estações de tratamento de esgoto da área de estudo.....	33
Figura 4 – Estação de tratamento de esgoto 10.01.	35
Figura 5 – Estação de tratamento de esgoto Gaibu.	36
Figura 6 – Estação de tratamento de esgoto Minerva.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média da mistura gasosa do biogás.....	29
Tabela 2 – Dados das estações de tratamento de esgoto em estudo.	34
Tabela 3 – Variáveis obtidas na literatura para o sistema UASB.....	38
Tabela 4 – Variáveis monitoradas e fornecidas pela Compesa para as ETEs. ...	39
Tabela 5 – Estimativa da produção diária de lodo nas ETEs.	43
Tabela 6 – Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETEs.	44
Tabela 7 – Estimativa da geração anual de metano para cada estação.	45
Tabela 8 – Estimativa do potencial energético diário e anual de cada estação.	46
Tabela 9 – Estimativa do valor equivalente da energia bruta produzida.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS

ABS	Agente tensoativos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
BRK	<i>Brookfield</i>
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Compesa	Companhia Pernambucana de Saneamento
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DQO _{afI}	Demanda Química de Oxigênio Afluente
DRSAI	Doenças relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado
EP	Energia Produzida
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de Efeito Estufa
H ₂	Gás Hidrogênio
H ₂ CO ₂	Ácido Fórmico
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira
N ₂	Gás Nitrogênio
NH ₃	Amônia
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PNSB	Plano Nacional de Saneamento Básico
pH	Potencial Hidrogeniônico
PPP	Parceria Público Privada

Q	Vazão
r	Coeficiente de correlação
RMR	Região Metropolitana do Recife
RS	Rio Grande do Sul
SE	Sergipe
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
SST _{af}	Sólidos Suspensos Totais Afluente
SST _{efl}	Sólidos Suspensos Totais Efluente
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SSV _{efl}	Sólidos Suspensos Voláteis Efluentes
TS	Teor de Sólidos
TSD	Teor de Sólidos do Lodo Desidratado
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
VLS	Volume Gerado de Lodo Seco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	16
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1 SANEAMENTO BÁSICO	17
2.2 ESGOTO SANITÁRIO.....	18
2.3 TRATAMENTO DE ESGOTO.....	20
2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	21
2.5 ETAPAS DA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM PROCESSOS ANAERÓBIOS	22
2.5.1 <i>Hidrólise</i>	23
2.5.2 <i>Acidogênese</i>	24
2.5.3 <i>Acetogênese</i>	25
2.5.4 <i>Metanogênese</i>	26
2.6 REATOR UASB	26
2.7 BIOGÁS.....	29
2.8 LODO.....	30
3 METODOLOGIA	32
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
3.1.1 <i>ETE 10.01</i>	34
3.1.2 <i>ETE Gaibu</i>	35
3.1.3 <i>ETE Minerva</i>	36
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	37
3.2.1 <i>Estimativa da capacidade de produção de lodo</i>	38
3.2.2 <i>Estimativa da produção de biogás</i>	40
3.2.3 <i>Estimativa da geração de metano</i>	41
3.2.4 <i>Estimativa do potencial energético</i>	41
3.2.5 <i>Estimativa da economia com a geração de energia a partir do biogás</i>	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 ESTIMATIVA DA CAPACIDADE DE PRODUÇÃO DE LODO	43
4.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	44
4.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO.....	45
4.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO	46
4.5 ESTIMATIVA DA ECONOMIA.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é o conjunto de serviços de infraestrutura que engloba a distribuição de água potável, coleta e tratamento de esgoto, drenagem urbana e coleta de resíduos sólidos. O acesso a esses recursos aumenta a expectativa de vida, minimiza doenças por veiculação hídrica, diminui os custos hospitalares e garante uma vida digna para a população (Pastre, 2023). De acordo com Dutra e Lange (2021), cada R\$ 1,00 investido em saneamento pode gerar R\$ 29,19 em benefícios sociais à população, abrangendo melhorias na saúde, qualidade de vida e condição socioeconômica.

De acordo com L. Pereira (2021), a universalização tem sido um desafio no Brasil, considerando fatores como a falta de infraestrutura, urbanização desenfreada, além da desigualdade social e econômica. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) revelou, por meio do Censo de 2022, que aproximadamente 49 milhões de brasileiros ainda utilizam recursos precários de esgotamento sanitário.

Segundo o Plano Nacional de Saneamento Básico (Brasil, 2022), dos quase 72,4 milhões de domicílios urbanos e rurais do país, cerca de 68,5 milhões (94,6%) contavam com rede de distribuição ou poço ou nascente (com canalização interna ao domicílio) para o abastecimento de água. Com o crescente desenvolvimento industrial, aumento populacional e avanços tecnológicos, são demandadas maiores quantidades de água e, conseqüentemente, maior quantidade de esgoto é gerado (Silva, 2022).

Conforme aponta Oliveira (2023), o lançamento de efluentes, urbanos e industriais sem tratamento algum, ou sua disposição de forma inadequada nos corpos d'água, ocasiona a contaminação do solo e acarreta a contaminação da água doce, gerando danos à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357 de 2005 classifica os corpos d'água e estabelece os padrões de qualidade para cada classe, conforme diretrizes ambientais para o seu enquadramento (Brasil, 2005). Complementando essa regulamentação, a Resolução CONAMA nº 430 de 2011 detalha os critérios e diretrizes para o lançamento de efluentes líquidos, incluindo limites específicos de carga poluidora, monitoramento da qualidade dos efluentes e responsabilidades dos empreendimentos para garantir a preservação dos recursos hídricos (Brasil, 2011).

Assim, o tratamento de esgoto é necessário para a qualidade de vida requerida pela sociedade moderna e de seu interesse por um ambiente saudável. Esse processo gera um resíduo sólido, predominantemente orgânico, denominado lodo de esgoto, que pode ser tão ou mais impactante para o meio ambiente do que o próprio esgoto (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014).

O tratamento de esgotos se baseia em níveis de complexidade e de processos, em que são envolvidas diversas fases com o propósito de remover a maior quantidade possível de resíduo da água e devolvê-la com a qualidade anterior à ação antrópica (Abrantes, 2022). A eficiência do sistema de esgotamento sanitário depende da perspectiva de sua operação de forma integrada, abrangendo todas as etapas que o compõem, com ênfase crescente na recuperação de água, energia e nutrientes (Gandolphi, 2023).

Dessa maneira, os sistemas anaeróbios de esgoto apresentam um alto nível de eficiência na remoção de matéria orgânica, além de possuir baixos custos de implantação e manutenção, bem como a geração de biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia (Prates, 2022). O maior potencial das biotecnologias de tratamento anaeróbio é que a energia (biogás) recuperada é considerada uma “energia verde” (Oliveira, 2013). Assim, o aproveitamento energético do biogás é uma realidade em países desenvolvidos, como a Alemanha, e se faz presente no Brasil (Silva, 2022).

Desse modo, com a ampliação da cobertura do esgotamento sanitário, torna-se necessário buscar alternativas para o tratamento e possíveis utilizações do produto final gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Esse cenário minimiza a disposição final em aterros sanitários, contribuindo, assim, para a redução de custos, além de evitar a emissão de gases de efeito estufa (Vaz, 2023).

Nesse contexto, o presente trabalho visa estimar a produção de biogás por sistemas anaeróbios em ETEs na Região Metropolitana do Recife (RMR), com o intuito de avaliar o potencial de aproveitamento energético a partir do biogás gerado e as estimativas de viabilidade da aplicação dessa fonte de energia.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estimar o potencial de produção de biogás por sistemas anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto na Região Metropolitana do Recife.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estimar a capacidade de produção de lodo nas ETEs selecionadas;
- Estimar o potencial de produção de biogás a partir do lodo gerado nas ETEs;
- Quantificar o potencial energético proveniente da geração do biogás e a economia associada à sua utilização.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Saneamento Básico

A Lei nº 14.026/2020 define o saneamento básico como o conjunto de serviços públicos que incluem as infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (Brasil, 2020). Segundo Ribeiro e Rooke (2010), o saneamento básico abrange um conjunto de ações e serviços voltados à promoção da saúde pública, à preservação do meio ambiente e à melhoria da qualidade de vida da população.

De acordo com Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014), o saneamento básico é uma atividade integrada que busca reduzir os impactos negativos das ações humanas sobre o meio ambiente, assegurando condições adequadas de higiene e saúde. Chernicharo (2007) ressalta a relevância das tecnologias de tratamento de esgoto como um componente essencial do saneamento, com foco nos sistemas anaeróbios por sua eficiência e baixo custo operacional, particularmente em países em desenvolvimento.

A Organização das Nações Unidas (ONU, 2010) reconhece o acesso à água e ao esgotamento como essenciais, sendo um direito humano, conforme declarado na Resolução 64/292, durante a Assembleia Geral realizada em 28 de julho de 2010. Conforme apontam Lira e Soares (2021), essa resolução estabelece que o acesso à água e ao saneamento são essenciais para o desenvolvimento da sociedade e para o exercício de todos os demais direitos humanos.

O fornecimento de água e a disponibilidade de redes de esgoto são indispensáveis para a população, sendo sua ausência responsável por diversos problemas, especialmente aqueles relacionados à saúde pública (Silva, 2022). Por essa razão, a legislação brasileira assegurou e regulamentou a gestão desses serviços, determinou os responsáveis pela sua prestação, estabeleceu diretrizes e normas para cobrança e qualidade, e definiu como objetivo principal alcançar a universalização dos serviços no país (Miranda; Silva Filho, 2023).

O Marco Legal do Saneamento Básico, instituído pela Lei nº 11.445/2007 e atualizado pela Lei nº 14.026/2020, é a principal legislação que regula o setor de saneamento no Brasil, com o objetivo de promover a universalização do acesso aos serviços (Brasil, 2020). Além disso, a legislação também define diretrizes para a gestão integrada, a transparência e a eficiência na prestação dos serviços, buscando alcançar, até 2033, 99% de acesso à água potável e 90% de cobertura em coleta e tratamento de esgoto (Leite; Moita Neto; Bezerra, 2022).

De forma complementar, no Brasil, o Decreto nº 11.598/2023 estabelece que os serviços de saneamento são garantidos pela sustentabilidade econômico-financeira e, sob os aspectos técnicos, atenderá aos requisitos que garantam a qualidade adequada (Brasil, 2023).

Apesar disso, os avanços na cobertura do saneamento no Brasil dependem de políticas públicas efetivas para assegurar o direito das populações periféricas e de baixa renda, visto que áreas rurais e periferias de centros urbanos enfrentam um alto déficit de cobertura (Silva; Beraldo, 2021). Conforme Miranda e Silva Filho (2023), a questão da habitação, quando sujeita às condições de mercado, entra em conflito com a cidadania. Além disso, observa-se a carência de políticas públicas adequadas e suficientes para garantir a efetivação desse direito.

2.2 Esgoto Sanitário

Os sistemas de esgoto sanitário são compostos por um conjunto de obras e instalações responsáveis pela coleta, transporte, afastamento, tratamento e disposição final das águas residuárias, garantindo que sejam manejadas de maneira adequada do ponto de vista sanitário e ambiental. Um dos principais objetivos desses sistemas é assegurar o manejo adequado dos dejetos do ponto de vista sanitário e ambiental, evitando que entrem em contato com a população (Ribeiro; Rooke, 2010). A Norma Brasileira (NBR) 9648 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1986) define esgoto sanitário como o efluente líquido composto por esgotos domésticos e industriais, água de infiltração e contribuições pluviais parasitárias.

Nos últimos anos, houve avanços na cobertura dos serviços de saneamento básico no Brasil com o incentivo às concessões e às Parcerias Público-Privadas

(PPP). Entretanto, conforme Rossoni *et al.* (2020), pouco mais da metade dos municípios possuem acesso à rede geral de esgotamento sanitário.

No que diz respeito aos serviços municipais, no ano de 2017, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) coletou dados sobre o abastecimento de água em 5.126 municípios, abrangendo uma população urbana de 172,1 milhões de habitantes. Esses números correspondem a 92% do total de municípios e 98% da população urbana do Brasil (SNIS, 2022). No caso do esgotamento sanitário, as informações foram obtidas em 3.865 municípios, cobrindo uma população urbana de 161,4 milhões de habitantes, o que equivale a 69,4% do total de municípios e 91,9% da população urbana brasileira (Britto, 2020).

Entretanto, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), no ano de 2022, cerca de 62,5% da população brasileira já possuía acesso à rede de esgoto. Além disso, 97,8% da população tinha, no mínimo, um banheiro de uso exclusivo. Banheiros compartilhados por mais de um domicílio foram informados por 0,5% da população. Já 0,6% da população habitava domicílios sem banheiros, sanitários ou buracos para dejeções. Também considerando quem vivia em domicílios com esgotamento por rede coletora ou fossa séptica, os valores foram de 59,2% em 2000, 64,5% em 2010 e 75,7% em 2022.

Conforme aponta Lima (2021) o índice de esgotamento sanitário na RMR é de 23,91% e no estado 28,4%. De acordo com o SNIS (2024), dentre os municípios atendidos por coleta e tratamento de rede de esgoto, a cidade de Paulista possui um percentual de população atendida de 52,9%, seguida por Olinda com 46,08% e Recife 43,54%.

A destinação adequada dos dejetos busca controlar e prevenir doenças relacionadas a eles. As soluções adotadas possuem os seguintes objetivos: prevenir a contaminação do solo e das fontes de água; evitar o contato dos vetores com as fezes; promover novos hábitos de higiene na população; oferecer conforto e satisfazer a estética local (Freitas, 2023).

2.3 Tratamento de Esgoto

O tratamento de esgoto consiste na estabilização da matéria orgânica presente em determinado efluente. Assim, esse processo visa converter a matéria orgânica em compostos inorgânicos mineralização, com conseqüente redução da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e eliminar micro-organismos patogênicos (Pimenta *et al.*, 2002).

Segundo Metcalf e Eddy (2015), o tratamento de esgoto é realizado por meio de processos que podem ser classificados como físicos, químicos ou biológicos, sendo considerados processos unitários. Contudo, em algumas estações de tratamento, esses processos podem ser combinados, dependendo do tipo de tratamento aplicado.

De acordo com Pastre *et al.* (2023), a insuficiência ou ineficiência no tratamento de esgoto compromete a saúde pública, resultando em um aumento dos casos de Doenças Relacionadas ao Saneamento Ambiental Inadequado (DRSAI). Além disso, a ausência ou precariedade desses serviços impacta diretamente a saúde coletiva, gerando efeitos negativos no meio ambiente e na qualidade de vida da população. Dessa maneira, o aumento das notificações de arboviroses, como a dengue, especialmente em países em desenvolvimento, como o Brasil, compromete ainda mais a qualidade de vida da população mais vulnerável (Moreira; Vale; Lima, 2024).

A geração e o descarte de efluentes, sejam de origem industrial ou doméstica, constituem uma preocupação global que afeta países em todos os níveis socioeconômicos (Ribeiro; Rooke, 2010). Estimativas indicam que aproximadamente 80% das águas residuais no mundo são despejadas em corpos hídricos sem tratamento adequado para a remoção de agentes tóxicos, causando graves impactos ao meio ambiente e à saúde pública (ONU, 2020).

Para avaliar a qualidade dos efluentes gerados e tratados, é necessário obter informações mensuráveis que permitam determinar os parâmetros físicos, químicos e biológicos envolvidos (Costa; Silva; Martins, 2009). Entre os principais parâmetros analisados, considerando as características da fonte, destacam-se: sólidos totais, fixos, voláteis, em suspensão, dissolvidos e sedimentáveis; temperatura; cor; odor; turbidez; demanda bioquímica de oxigênio (DBO); demanda química de oxigênio (DQO); carbono orgânico total (COT); Potencial Hidrogeniônico (pH); oxigênio

dissolvido (OD); metais pesados - chumbo, cromo, cádmio, zinco, ferro, mercúrio, etc.; gás sulfídrico; metano; nitrogênio; fósforo; óleos e graxas; cloretos; sulfatos; compostos tóxicos (cianetos e cromatos); fenóis; agentes tensoativos (ABS, LAS); micro-organismos - coliformes fecais e totais; e vazão do efluente (Beltrame *et al.*, 2016).

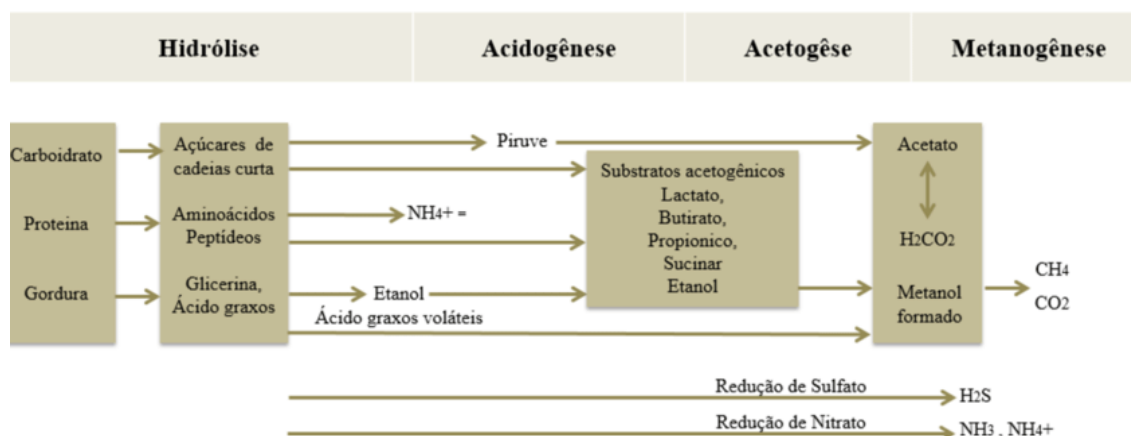
Além disso, os tratamentos de esgoto são classificados em quatro níveis: preliminar; primário; secundário; e terciário. O tratamento preliminar remove materiais de maior dimensão por meio de processos físicos (Metcalf; Eddy, 2015). O tratamento primário, também baseado em métodos físicos, busca separar sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica presente no efluente. Já o tratamento secundário utiliza processos biológicos para eliminar sólidos suspensos e matéria orgânica. Por fim, o tratamento terciário tem como principal objetivo remover nutrientes, como fósforo, potássio e nitrogênio, além de micro-organismos patogênicos, garantindo uma qualidade superior ao efluente tratado (Von Sperling, 2014).

Apesar disso, o tratamento de esgoto representa a quinta maior fonte individual de emissões de CH₄, um dos principais gases de efeito estufa (GEE), contribuindo significativamente para as mudanças climáticas (GONZÁLEZ *et al.*, 2019). Entretanto, as ETEs buscam equilibrar a qualidade do efluente tratado antes do seu lançamento nos corpos hídricos, otimização do desempenho energético e controlar as emissões de GEE (ZABOROWSKA *et al.*, 2021).

2.4 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo metabólico complexo que ocorre em condições anaeróbias (potencial redox < -200 mV) e depende da ação conjunta de diversos microrganismos para converter matéria orgânica em dióxido de carbono e metano. Conforme ilustrado na Figura 1, esse processo é dividido em quatro fases: hidrólise; acidogênese; acetogênese; e metanogênese. Cada etapa é conduzida por grupos específicos de microrganismos que atuam de forma sintrófica e podem necessitar de diferentes condições ambientais (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

Figura 1 – Processos envolvidos na digestão anaeróbia.



Fonte: Sampaio, Oliveira e Gonçalves (2021).

Dessa forma, na ausência de oxigênio ou de outros aceptores alternativos de elétrons, como nitrato ou sulfato, a matéria orgânica é predominantemente convertida em biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). Esse processo, conhecido como digestão anaeróbia, ocorre tanto em ambientes naturais, como sedimentos, fontes termais e sistemas gastrointestinais, quanto em ambientes controlados, como os digestores anaeróbios (Cavaleiro; Alves, 2020).

Microrganismos anaeróbios obtêm energia e se desenvolvem por meio de processos independentes do oxigênio. No entanto, sua atividade metabólica pode ser influenciada pela presença desse gás, sendo chamados de anaeróbios estritos aqueles inibidos pelo oxigênio, enquanto os que não são influenciados por ele recebem o nome de aerotolerantes. Por outro lado, microrganismos facultativos podem crescer na ausência de oxigênio, mas, quando ele está presente, utilizam um metabolismo aeróbio (Soares; Feiden; Tavares, 2017).

A digestão anaeróbia é realizada por uma comunidade variada de microrganismos que interagem de maneira complexa ao longo de várias etapas interdependentes, nas quais os produtos de uma fase anterior atuam como substrato para a seguinte (Cavaleiro; Alves, 2020).

2.5 Etapas da remoção de matéria orgânica em processos anaeróbios

A digestão de compostos orgânicos complexos ocorre, geralmente, em dois estágios. No primeiro, bactérias fermentativas convertem compostos orgânicos

complexos em substâncias mais simples, transformando-os em material orgânico de menor complexidade. No segundo estágio, um grupo específico de bactérias, chamadas metanogênicas, é responsável pela produção de metano. Essas bactérias, estritamente anaeróbias, desempenham um papel essencial nesse processo biológico (Chernicharo, 1997).

2.5.1 Hidrólise

A etapa de hidrólise facilita a degradação de compostos de alta massa molecular, como lipídios, polissacarídeos e proteínas, convertendo-os em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis. Esse processo é mediado por enzimas extracelulares secretadas pelas bactérias hidrolíticas (Cavaleiro; Alves, 2020).

A importância da hidrólise na velocidade de degradação depende das características do substrato envolvido. Assim, quando a matéria orgânica é complexa e de difícil degradação, a hidrólise desempenha um papel crucial na velocidade global de degradação, podendo ser considerada a etapa limitante da digestão anaeróbia (A. Pereira, 2021).

De acordo com Mendonça (2009), os gêneros de bactérias com características hidrolíticas na decomposição anaeróbia são:

- Produtores de lipases: *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus*;
- Produtores de proteases: *Bacteroides*, *Butyrivibrio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Proteus*, *Peptococcus* e *Bacillus*;
- Produtores de amilases: *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Acetivibrio* e *Eubacterium*.

A duração da etapa de hidrólise varia conforme as características do substrato, sendo de poucas horas para carboidratos e de alguns dias para proteínas e lipídios. A lignocelulose e a lignina são hidrolisadas mais lentamente, muitas vezes de forma incompleta (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Além disso, a hidrólise é uma etapa limitante devido a fatores como a temperatura, que deve estar acima de 20°C para a

conversão adequada de lipídios, e o tamanho das partículas orgânicas, pois partículas maiores exigem mais tempo para a quebra (Mendonça, 2009).

2.5.2 Acidogênese

De acordo com Peruzzo (2017), na acidogênese, os compostos provenientes da fase anterior são absorvidos e metabolizados por bactérias fermentativas acidogênicas. Essas bactérias produzem substâncias simples, como ácidos graxos voláteis de cadeia curta, álcoois, ácido láctico e compostos minerais (CO_2 , H_2 , NH_3 , H_2S , entre outros), além de gerar novas células bacterianas.

Durante a acidogênese, os aminoácidos e açúcares derivados da hidrólise são transportados para o interior da célula, onde passam por fermentação, gerando produtos intermediários como ácidos graxos voláteis (AGV), álcoois, acetato, hidrogênio e CO_2 . A população acidogênica representa cerca de 90% dos microorganismos presentes nos digestores anaeróbios, com tempos de duplicação relativamente curtos (Cavaleiro; Alves, 2020).

Segundo Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), na acidogênese, os monômeros formados na fase hidrolítica servem como substratos para diferentes bactérias anaeróbias e facultativas, sendo degradados a ácidos orgânicos de cadeia curta, com um a cinco carbonos (como ácidos butírico, propiônico e acético), álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono.

Ainda de acordo com Kunz, Steinmetz e Amaral (2019), a pressão parcial de hidrogênio durante o processo afeta diretamente o estado de oxidação dos produtos. Quando a pressão é muito alta, os produtos tendem a conter maior quantidade de carbono. Na acidogênese, carboidratos como a glicose são degradados em piruvato, sendo então convertido em ácido láctico por *Lactobacillales* e em etanol por leveduras. Os ácidos graxos, por sua vez, são degradados, como no caso da *Acetobacter*, que os quebra por meio da β -oxidação.

Portanto, os ácidos graxos precisam se ligar à coenzima A, e a oxidação ocorre de forma gradual, com a liberação sequencial de duas unidades de carbono, na forma de acetato. Enquanto os aminoácidos são degradados em pares pelo *Clostridium botulinum* por meio de uma reação em que um aminoácido atua como doador de

elétrons e o outro como receptor. Essa reação resulta na formação de acetato, amônia, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

De acordo com Mendonça (2009), os principais gêneros de bactérias acidogênicas frequentemente encontrados em reatores anaeróbios incluem *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia*.

2.5.3 Acetogênese

De acordo com Ninasivinha (2023), a acetogênese, considerada a terceira etapa da digestão anaeróbia, é fundamental para o processo e é conduzida por um grupo de bactérias chamadas acetogênicas. As arqueas acetogênicas têm a função de converter os produtos gerados na etapa acidogênica em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, que são substratos intermediários posteriormente metabolizados pelas arqueas metanogênicas.

Conforme aponta Salomon (2007), os produtos formados anteriormente são oxidados para gerar acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, com o objetivo de fornecer substratos adequados para os microrganismos metanogênicos. Em geral, isso ocorre por meio de dois mecanismos: o primeiro é a acetogênese de hidrogenação, que produz ácido acético como único produto final da fermentação de hexose ou de CO_2 e H_2 ; o segundo é a acetogênese de desidrogenação, que converte ácidos graxos de cadeia curta e longa em ácido acético por um grupo de bactérias acetogênicas.

As bactérias acetogênicas formam uma relação de simbiose com as arqueas metanogênicas e as bactérias homoacetogênicas. Nessa etapa, os ácidos de cadeia longa são transformados em ácidos com um ou dois átomos de carbono (como fórmico e acético), com a produção simultânea de hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias homoacetogênicas controlam o equilíbrio da reação de consumo de hidrogênio e gás carbônico para a produção de acetato (Martins *et al.*, 2024).

A formação de ácidos de cadeia curta somente torna-se termodinamicamente viável quando está vinculada ao consumo de hidrogênio gasoso pelas arqueas

metanogênicas. Assim, a interação sintrófica entre organismos de diferentes grupos microbianos permite que ambos se desenvolvam, garantindo a produção de acetato a partir de ácidos orgânicos (Amaral, 2017).

2.5.4 Metanogênese

A metanogênese ocorre em condições estritamente anaeróbias, em que o carbono presente na biomassa é convertido em dióxido de carbono e metano pela ação das arqueas metanogênicas (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019). Segundo Salomon (2007), essa etapa envolve a transformação dos produtos formados anteriormente (com um ou dois átomos de carbono) em metano e dióxido de carbono.

O domínio Archaea é polimórfico e pode ser distinguido dos outros domínios apenas pela sequência de 16S rRNA. A metanogênese é um processo exotérmico e as arqueas metanogênicas são classificadas em dois grupos com base nas suas vias metabólicas: acetoclásticas e hidrogenotróficas. As arqueas acetoclásticas, como *Methanosarcina*, convertem acetato em metano, enquanto as arqueas hidrogenotróficas, como *Methanobacterium* e *Methanospirillum*, convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano. Ambos os processos são exotérmicos e levam à formação de metano, seja a partir de acetato ou dióxido de carbono (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

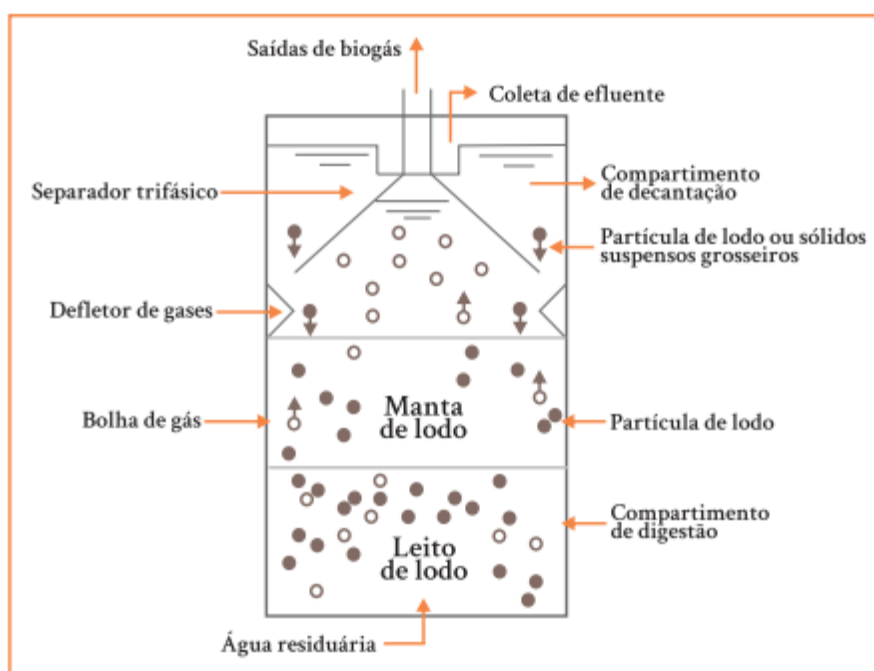
Os microrganismos metanogênicos exibem uma velocidade de crescimento e um fator de produção de biomassa inferiores aos dos grupos acidogênicos e redutores de sulfato, resultando, frequentemente, em desequilíbrios no processo de degradação do substrato (Leite, 2015).

2.6 Reator UASB

A sigla UASB, derivada do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, refere-se a um tipo de biodigestor caracterizado pelo fluxo ascendente do afluente através de uma manta de lodo, conforme ilustra a Figura 2, até atingir o topo do reator, onde está localizado um separador trifásico (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

Segundo Chernicharo (2007), o reator UASB é um processo no qual os esgotos fluem de maneira ascendente através de um leito de lodo denso e altamente ativo. O perfil de sólidos no reator varia, com um lodo denso composto por partículas granulares de alta capacidade de sedimentação na parte inferior do leito, e um lodo mais leve e disperso na manta de lodo. A estabilização da matéria orgânica ocorre em todas as zonas de reação, sendo facilitada pela mistura do sistema, impulsionada pelo fluxo ascendente do esgoto e pelas bolhas de gás (Moura, 2012).

Figura 2 – Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB.



Fonte: Kunz, Steinmetz e Amaral (2019).

De acordo com Lettinga *et al.* (1984) e Lettinga e Pol (1991), o reator UASB é composto pelas seguintes etapas principais:

- **Câmara de digestão:** O esgoto é introduzido pela parte inferior do reator UASB e percorre o leito de lodo (manta de lodo), onde se encontra uma microbiota responsável pela digestão anaeróbia. Durante o fluxo ascendente, o esgoto atravessa a manta de lodo, que atua como um filtro para o material particulado;

- Separador de fases: Um dispositivo defletor de gases que separa as fases sólida (da câmara de digestão), líquida e gasosa;
- Zona de transição: Localizada entre a câmara de digestão e a zona de sedimentação;
- Zona de sedimentação: Os sólidos e flocos sedimentam e retornam para a zona de transição através de uma abertura na parede. A parte líquida é coletada, exibindo as características de um efluente clarificado; e
- Zona de acumulação de gases: O biogás gerado durante a digestão anaeróbia é armazenado na parte superior do reator, onde é coletado e, posteriormente, pode ser submetido a pós-tratamento para seu possível aproveitamento.

De acordo com Foresti (1994), essa tecnologia se destaca por suas características hidrodinâmicas, como baixas velocidades ascensionais e maior interação entre as bactérias e o substrato. Essas características promovem a formação de grânulos orgânicos, permitindo um tempo de detenção hidráulico relativamente curto em escala de horas (Pereira, 2024).

Além disso, o biogás gerado por esse tipo de reator pode ser aproveitado energeticamente em diversas aplicações, incluindo no próprio funcionamento da ETE (Faria, 2012), que contribui para a redução dos custos de energia e ajuda a prevenir a emissão de metano, mitigando a poluição atmosférica (Chernicharo, 2007).

No entanto, o sistema ainda enfrenta diversos desafios, conforme destacado por Chernicharo (2007). Um dos problemas potenciais é a emissão de maus odores, que pode ocorrer caso haja falhas no sistema, como problemas no processo anaeróbio. Adicionalmente, o reator UASB pode precisar de um processo de pós-tratamento para assegurar que os efluentes atendam aos parâmetros exigidos pela legislação ambiental, especialmente no que se refere à remoção de poluentes (Ragio; Arantes; Subtil, 2021).

Outro aspecto relevante é o tempo de partida relativamente longo, que pode impactar a operação inicial do sistema até alcançar sua plena capacidade de tratamento. Comparado aos métodos aeróbios, o reator UASB apresenta menor eficiência na remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e da demanda química de oxigênio (DQO), circunstância que requer um monitoramento contínuo e,

frequentemente, etapas complementares para aumentar a eficiência do processo (Kunz; Steinmetz; Amaral, 2019).

2.7 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), podendo conter também pequenas quantidades de outros compostos, como hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), nitrogênio (N_2), amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio (H_2S), compostos orgânicos voláteis (COVs) e fosfatos. O metano, gerado pela degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, é o principal responsável pelo poder calorífico do biogás, pois quanto maior seu teor, maior a eficiência energética do gás (Costa, 2006; Silva, 2022).

De acordo com Mendonça (2009), o biogás é uma mistura de gases cuja concentração é influenciada pelas características do resíduo e pelas condições operacionais da biodigestão. Noyola, Morgan-Sagastume e López-Hernández (2006) afirmam que esse processo envolve a produção de gases durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica, e sua composição varia conforme as condições físico-químicas dentro do digestor, a exemplo de pH, alcalinidade e temperatura, além da presença de outros ânions, como sulfato e nitrato.

O biogás produzido em reatores UASB é principalmente composto por metano, com concentrações que variam, em sua maioria, entre 70% e 80% em volume, enquanto o dióxido de carbono aparece em quantidades menores, devido à sua alta solubilidade no líquido (Van Haandel; Lettinga, 1994). A composição média dos gases produzidos a partir da biodigestão anaeróbia está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição média da mistura gasosa do biogás.

Gás	Símbolo	Concentração no biogás (%)
Metano	CH_4	50-80
Dióxido de Carbono	CO_2	20-40
Hidrogênio	H_2	1-3
Nitrogênio	N_2	0,5-3
Gás Sulfídrico e outros	H_2S , CO , NH_3	1-5

Fonte: Coldebella *et al.* (2006).

Diante disso, o potencial energético teórico do biogás depende da quantidade de metano presente no gás, que por sua vez define seu poder calorífico inferior (PCI). O PCI do biogás varia entre 22.500 e 25.000 kJ/m³, considerando que o metano possui aproximadamente 35.500 kJ/m³ (Soares; Feiden; Tavares, 2017).

O baixo teor de CO₂ no biogás proveniente de reatores UASB indica que a maior parte desse gás permanece no efluente na forma de íons bicarbonato. Em digestores de lodo com elevadas concentrações de matéria orgânica, o acúmulo de CO₂ tende a ser mais elevado, variando entre 20% e 35%, enquanto a fração de nitrogênio é reduzida, cerca de 2% (Agrawal; Harada; Okui, 1997).

2.8 Lodo

Conforme Von Sperling (2005), o lodo é um material semissólido ou sólido resultante de processos físicos, químicos ou biológicos no tratamento de águas residuárias. Ele é composto por uma mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, microrganismos e uma quantidade significativa de água, aspectos que influenciam diretamente sua caracterização, bem como os métodos de tratamento e disposição final.

Considerando que o lodo é um subproduto sólido gerado pelo tratamento de esgotos, durante os processos biológicos, parte da matéria orgânica é absorvida e transformada, sendo incorporada à biomassa microbiana (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2014). Essa biomassa exibe uma composição predominantemente orgânica, correspondendo entre 60% e 75% de sua massa total.

A maioria das estações de tratamento de esgoto emprega duas etapas para a remoção de lodo, a primária e a secundária. A etapa primária é um processo mecânico, no qual os materiais presentes na água são decantados, sedimentados e triturados, gerando o lodo primário (Aquino, 2024). Em seguida, na etapa secundária, utiliza-se aeração, que pode ser feita por bombas de ar ou por filtros de aeração, sendo o esgoto pulverizado de maneira adequada (Rosa *et al.*, 2016).

Nesse contexto, o esgoto é mineralizado por colônias de bactérias, como a *Zoogloea ramigera*, que formam uma camada aderente a outras bactérias e sólidos.

Posteriormente, a sedimentação do esgoto resulta na formação de flocos, que auxiliam o tanque de aeração, gerando um afluyente consideravelmente limpo, conhecido como lodo ativado (Rosa *et al.*, 2016).

Para a utilização como substrato na digestão anaeróbia, o lodo deve conter altas concentrações de matéria orgânica biodegradável. Esse cenário é relevante para os lodos provenientes da decantação primária no tratamento de esgoto, bem como para os lodos secundários gerados durante o tratamento biológico aeróbio (Salles, 2019). Em comparação aos lodos primários, os lodos secundários são majoritariamente compostos por biomassa, isto é, células bacterianas que se formaram como resultado do processo de conversão biológica (Brasil, 2017).

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado nos municípios de Cabo de Santo Agostinho, Recife e Goiana, no Estado de Pernambuco. O Cabo de Santo Agostinho e Recife integram a Região Metropolitana do Recife (RMR), e possuem, respectivamente, uma população de 203.440 habitantes e 1.488.920 habitantes, com áreas territoriais de 445,4 km² e 664,2 km², enquanto Goiana apresenta 81.055 habitantes e abrange uma área de 445,4 km² (IBGE, 2022a).

A cobertura de esgotamento sanitário da RMR apresenta uma significativa deficiência, com 63,8% da população sem acesso à rede coletora de esgoto, o que equivale a 2.378.650 habitantes sem acesso ao sistema de tratamento (SNIS, 2024). Como sistemas alternativos, são utilizadas ligações clandestinas à rede pluvial, fossas sépticas, fossas rudimentares e o lançamento direto em corpos hídricos. Adicionalmente, cerca de 80.359,61 mil m³ de esgoto são despejados anualmente de forma irregular em rios e córregos da região (SNIS, 2024).

De maneira semelhante, no município de Goiana, 48,6% da população não conta com acesso ao sistema de esgotamento sanitário. Com isso, cerca de 2.389,41 mil m³ de esgoto não tratado são despejados irregularmente (SNIS, 2024).

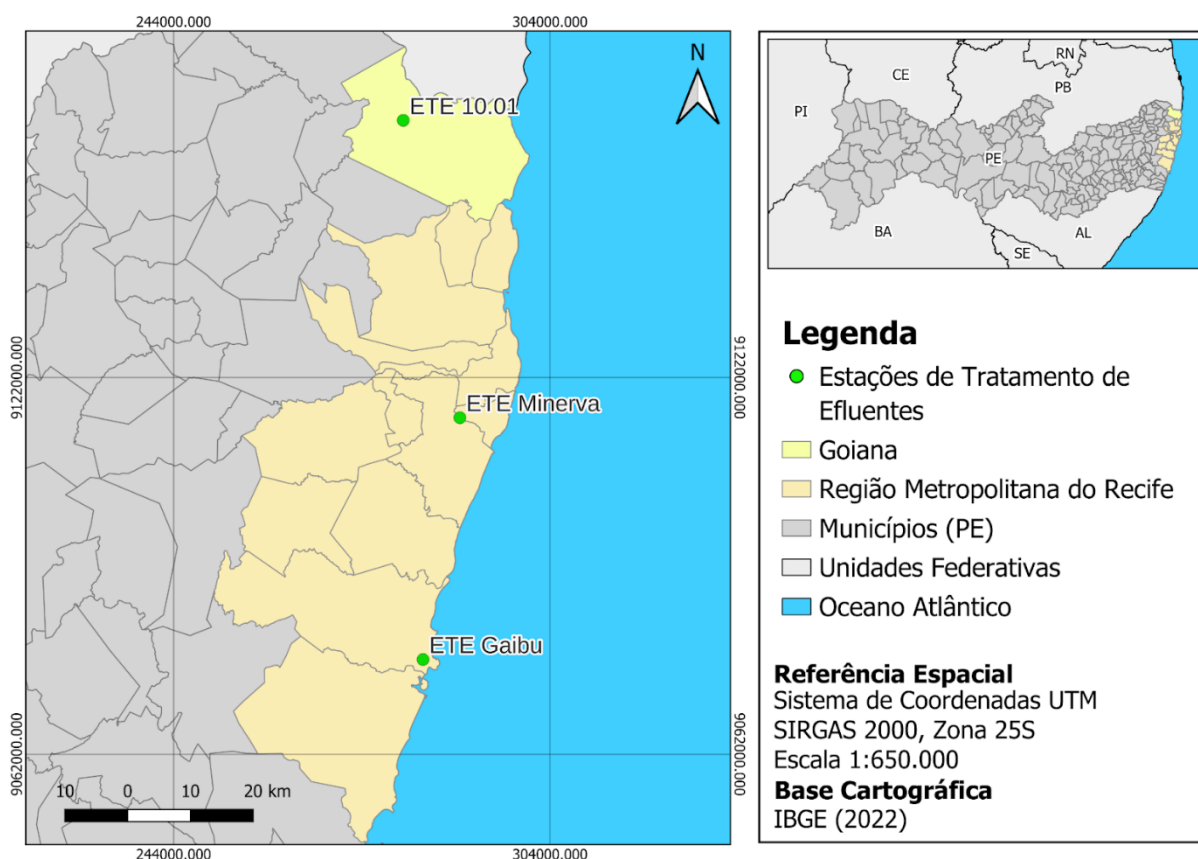
Para expandir a cobertura do sistema de esgotamento sanitário em Pernambuco, foi estabelecida, em 2013, uma Parceria Público-Privada (PPP) entre a BRK e a Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa). A parceria visa recuperar, operar e implantar novos sistemas de esgotamento sanitário na Região Metropolitana do Recife e no município de Goiana ao longo de um período de 35 anos, promovendo, assim, a melhoria dos índices de coleta e tratamento de esgoto (BRK, 2024).

De acordo com a BRK (2024), atualmente, existem 60 estações de tratamento de esgoto em operação por meio da PPP vinculada à Compesa, atendendo 40% da população da Grande Recife e Goiana com esgotamento sanitário. Deste total, destacam-se as ETEs com reatores anaeróbios de manta de lodo de fluxo

ascendente, sistema amplamente utilizado no Brasil para tratamento de esgoto doméstico (Vassalle *et al.*, 2021).

Neste estudo, foram selecionadas três ETEs em operação pela BRK (Figura 3), que utilizam o sistema de tratamento baseado na tecnologia UASB. Os dados disponibilizados pela empresa abrangem o período de janeiro de 2023 a dezembro de 2023. Além disso, a escolha dessas unidades se deve ao seu longo tempo de retenção de sólidos biológicos, condição que garante a estabilização do lodo no sistema. Além da disponibilidade de dados necessários para elaboração do estudo, o sistema em questão apresenta um alto potencial para a geração de biogás, podendo ser utilizado para aproveitamento energético na própria estação de tratamento (Chernicharo *et al.*, 2018).

Figura 3 – Estações de tratamento de esgoto da área de estudo.



Fonte: Elaboração própria com base em IBGE (2022b).

As informações referentes às ETEs selecionadas, os sistemas de esgotamento sanitário e os respectivos processos de tratamento estão apresentados na Tabela 2 e detalhadas na sequência.

Tabela 2 – Dados das estações de tratamento de esgoto em estudo.

Sistema de Esgotamento Sanitário	Estação de Tratamento de Esgoto	Processo de tratamento	Vazão média (L/s)	População contribuinte (hab)	DQO entrada	DQO saída
Goiana 1	ETE 10.01	Gradeamento + Desarenador + Reatores UASB + Filtro Percolador + Decantação secundária + Cloração + Centrifugação de Lodo	17,8	34.433	606,33	35
Gaibu	ETE Gaibu	Gradeamento + Caixa de Areia + Reatores UASB + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação + Leitos de Secagem	11,66	5.965	597	33
Minerva	ETE Minerva	Gradeamento + Caixa de Areia + Reatores UASB + Filtros Biológicos + Decantadores Secundários + Leitos de Secagem	3,29	3.984	679,58	31

Fonte: Elaboração própria com base em Compesa (2024).

3.1.1 ETE 10.01

A estação está situada na rodovia PE-001, no município de Goiana (Figura 4), e teve sua inauguração em 2022. Atualmente, a estação atende a uma população contribuinte de 34.433 habitantes. O sistema de tratamento inclui as etapas de

gradeamento, desarenador, dois reatores UASB, dois filtros percoladores, dois decantadores secundários, cloração e centrífuga para o lodo. A rede coletora é composta por três estações elevatórias e apresenta uma extensão de, aproximadamente, 59,7 km, com tubulações variando entre 130 mm e 200 mm de diâmetro. O sistema possui eficiência de 96,1%, com custo mensal de operação de R\$76.610,13. Seu efluente tratado é lançado no rio Tracunhaém, enquanto o lodo gerado é destinado para aterro sanitário (Compesa, 2024).

Figura 4 – Estação de tratamento de esgoto 10.01.



Fonte: Google Earth (2024).

3.1.2 ETE Gaibu

A ETE está localizada na rua Boulevard José Pedro Ferreira, Gaibu, Cabo de Santo Agostinho, e passou a ser operada pela BRK, através da PPP, no ano de 2013. O sistema de tratamento compreende as seguintes etapas: dois reatores UASB, uma lagoa facultativa, uma lagoa de maturação e oito leitos de secagem (Figura 5). A estação, atualmente, atende uma população contribuinte de 5.965 habitantes e sua eficiência é de 88,92%. O sistema de esgotamento sanitário conta com duas estações

elevatórias, sendo o lodo gerado destinado para aterro sanitário. Além disso, possui uma extensão de rede coletora de 26,6 km e diâmetro entre 150 e 200 mm. O custo mensal de operação é de R\$16.922,16 e seu efluente tratado é lançado no rio Massangana (Compesa, 2024).

Figura 5 – Estação de tratamento de esgoto Gaibu.



Fonte: Google Earth (2024).

3.1.3 ETE Minerva

Localizada na Avenida Hildebrando de Vasconcelos, Dois Unidos, Recife, a ETE passou por ampliação e modernização em 2022. O sistema opera com um custo mensal de R\$ 32.864,10 e realiza o seguinte tratamento: gradeamento, caixa de areia, quatro reatores UASB, oito filtros biológicos, oito decantadores secundários e seis leitos de secagem (Figura 6). A rede coletora possui diâmetros entre 150 mm e 200 mm, com uma extensão total de 18,5 km. Com uma população contribuinte de 3.984 habitantes, a estação apresenta uma eficiência de, aproximadamente, 90,13% na remoção de DBO e conta com seis estações elevatórias. O efluente tratado tem como

corpo receptor o rio Beberibe e o lodo é destinado para aterro sanitário (Compesa, 2024).

Figura 6 – Estação de tratamento de esgoto Minerva.



Fonte: Google Earth (2024).

3.2 Procedimentos metodológicos

Para o desenvolvimento do estudo, os dados de monitoramento das estações de tratamento de esgoto foram solicitados à Compesa por meio da Ouvidoria do Estado de Pernambuco. Assim, a solicitação incluiu os seguintes parâmetros: processos aplicados em cada ETE; DQO de entrada da estação (mg/l); DQO de saída da estação (mg/l); vazão média (l/s); população contribuinte; corpo hídrico receptor; extensão da rede coletora do sistema; diâmetro das redes; eficiência de remoção de DBO (%); e estimativa da geração de lodo primário e secundário (m³/mês).

Além disso, foram solicitadas informações adicionais, como: contribuição média diária (m³/d); consumo mensal de energia elétrica (kWh); custo mensal de operação (R\$); destino atual dos lodos gerados nas ETEs; caracterização dos sólidos presentes nos lodos gerados e a concentração de sólidos totais voláteis ou sólidos suspensos

voláteis nos tanques de tratamento biológico. Os dados fornecidos pela companhia abrangem o período operacional de janeiro de 2023 a dezembro de 2023.

Após a obtenção das informações solicitadas, os dados foram inseridos em planilha eletrônica do Microsoft Excel, possibilitando a realização das estimativas de produção de lodo e a quantificação do potencial de geração de biogás.

3.2.1 Estimativa da capacidade de produção de lodo

A metodologia do presente estudo seguiu os procedimentos descritos por Hartmann (2022). Para tanto, utilizou-se a estimativa da geração de lodo de esgotos domésticos, conforme apresentado por Jordão e Pessôa (2017), considerando uma faixa entre 0,15 a 0,20 kg SST/kg de DQO afluente. Dessa maneira, admitiu-se o valor de 0,19 kg SST/kg de DQO afluente.

De acordo com Hartmann (2022), as variáveis teor de sólidos (TS), peso específico do lodo (ρ) e densidade (γ) são necessárias para estimar a produção de lodo em sistemas que utilizam reatores UASB. No entanto, essas variáveis não são monitoradas pela Compesa ou não foram disponibilizadas. Assim, foram adotados valores médios baseados em dados da literatura, como apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 – Variáveis obtidas na literatura para o sistema UASB.

Variáveis	Valores adotados	Unidade de Medida
Densidade (γ)	1,007	g/cm ³
Peso específico do lodo (ρ)	1,007	kg/m ³
Teor de sólidos do lodo desidratado (TSd)	30	%

Fonte: Hartmann (2022).

Já a estimativa da produção de lodo requer, como parâmetros essenciais, a vazão afluente e a DQO afluente, variáveis monitoradas pela Compesa e apresentadas com seus valores médios na Tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis monitoradas e fornecidas pela Compesa para as ETEs.

Variáveis	Valores adotados			Unidade de Medida
	ETE 10.01	ETE Gaibu	ETE Minerva	
Vazão afluyente (Q)	12,93	10,51	2,31	L/s
DQO afluyente (DQO_{afl})	606,33	595,42	679,58	mg/L

Fonte: Elaboração própria com base em Compesa (2024).

A partir dessas variáveis, inicialmente, foi necessário converter o valor da DQO afluyente (DQO_{afl}) de mg/L para kg/m³, multiplicando-o pela vazão afluyente (Q), expressa em m³/d (Hartmann, 2022). Com essa conversão, torna-se possível calcular a produção de lodo em sólidos totais (ΔX_T), considerando uma produção de 0,19 kg SST por kg de DQO afluyente, conforme indicado na Equação 1.

$$\Delta X_T = 0,19 \times (DQO_{afl} \times Q) \quad (1)$$

Em que: ΔX_T = produção de lodo em sólidos totais (kg SST/d); 0,19 = produção de kg de sólidos totais por DQO afluyente; DQO_{afl} = DQO afluyente (kg/m³); Q = vazão afluyente (m³/d).

Em seguida, como um dos resultados de interesse deste estudo, a estimativa do volume gerado de lodo seco (VLS) foi determinado por meio da Equação 2, considerando o teor de sólidos do lodo desidratado (TSd).

$$VLS = \frac{\Delta X_T}{TSd \cdot \rho \cdot \gamma} \quad (2)$$

Em que: VLS = volume gerado de lodo seco (m³/d); TSd = teor de sólidos do lodo desidratado (%); ρ = peso específico do lodo (kg/m³); γ = densidade (g/cm³).

3.2.2 Estimativa da produção de biogás

Com base nos resultados previamente calculados da produção de lodo em sólidos totais nas ETEs, determinou-se a carga de sólidos suspensos totais presente no lodo gerado (SST_{afl}), expressa em kg SST/d. Assim, conforme a Equação 3, foi possível determinar a quantidade de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor (SSV_{afl}), utilizando a relação SSV/SST de 77,5%. Hartmann (2022) afirma que essa relação é fundamental, pois a produção de biogás é estimada com base na quantidade de sólidos voláteis destruídos.

$$SSV_{afl} = SST_{afl} \cdot R_{SSV/SST} \quad (3)$$

Em que: SSV_{afl} = carga de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor (kg SSV/d); SST_{afl} = carga de sólidos totais no lodo afluente ao digestor (kg SST/d); $R_{SSV/SST}$ = relação SSV/SST (%).

De maneira geral, a eficiência da digestão é avaliada por meio do indicador de redução de sólidos voláteis, sendo comum requerer uma redução de 50% de SSV, enquanto os sólidos fixos permanecem inalterados (Hartmann, 2022). Diante dessa eficiência, a Equação 4 demonstra o cálculo da quantidade de sólidos voláteis destruídos no efluente.

$$SSV_{efl} = (1 - 50\%) \cdot SSV_{afl} \quad (4)$$

Em que: SSV_{efl} = carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor (kg SSV/d); 50% = eficiência de remoção de sólidos voláteis na digestão (%); SSV_{afl} = carga de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor (kg SSV/d).

Posteriormente, a estimativa de geração de biogás foi calculada considerando que o volume de gás produzido no digestor varia entre 0,8 e 1,1 m³ por kg de SSV destruídos (Hartmann, 2022). Assim, para esse cálculo, foi adotado o valor médio de 0,95 m³ por kg de SSV destruídos como taxa específica de geração de biogás (Equação 5).

$$Q_{biogás} = SS_{Vefl} \cdot 0,95 \quad (5)$$

Em que: $Q_{biogás}$ = vazão de biogás gerado (m^3 gás/d); SS_{Vefl} = carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor (kg SSV/d); 0,95 = taxa específica de geração de biogás (m^3 /kg SSV destruídos).

3.2.3 Estimativa da geração de metano

Para calcular a produção de metano no biogás, foi adotado um percentual de 65% de metano em sua composição, conforme a Equação 6.

$$CH_4 volume = \frac{Q_{biogás} \cdot 65\% \cdot 365 \cdot MM_{CH_4}}{Vol_{gás}} \quad (6)$$

Em que: $CH_4 volume$ = volume de metano produzido (kg/ano); $Q_{biogás}$ = vazão de biogás gerado (m^3 /d); 65% = percentual de metano na constituição do biogás (%); 365 = dias em um ano (dia/ano); MM_{CH_4} = massa molar do metano (kg/mol); $Vol_{gás}$ = volume do gás (m^3 /mol).

Nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), 1 mol de qualquer gás ocupa um volume de 22,4 litros (Velásquez, 2022). Considerando a temperatura média anual de 26°C, típica da região de estudo, esse volume aumenta para 24,53 litros (ou 0,02453 m^3). A massa molar do metano é igual a 16,04 g/mol (Alencar, 2023), equivalente a 0,016 kg/mol.

3.2.4 Estimativa do potencial energético

O metano presente no biogás apresenta um elevado poder calorífico, conferindo um grande potencial para reaproveitamento energético na geração de eletricidade (Fernandes *et al.*, 2022). Considerando que o gás do digestor contém 65% de metano, o poder calorífico inferior do biogás é estimado em 22.400 kJ/ m^3 (Metcalf;

Eddy, 2015). Desse modo, a energia bruta produzida foi calculada por meio da Equação 7.

$$E = \frac{Q_{biogás} \cdot PCI}{3.600} \quad (7)$$

Sendo: E = energia bruta produzida (kWh/d); $Q_{biogás}$ = vazão de biogás gerado (m^3/d); PCI = poder calorífico inferior do gás de digestão (kJ/m^3); 3.600 = fator de conversão de kJ para kWh.

3.2.5 Estimativa da economia com a geração de energia a partir do biogás

Para estimar o valor em reais equivalente à energia gerada a partir do biogás, foi utilizada como referência a tarifa média de energia elétrica praticada nos estados do Nordeste do Brasil em 2023. Esse dado foi obtido do informativo tarifário por classe de consumo do serviço público (água, esgoto e saneamento), disponibilizado pelo Ministério de Minas e Energia (2023). Assim, a tarifa média considerada no cálculo foi de R\$ 616,78/MWh. Com base nos procedimentos de Hartmann (2022), a estimativa do valor correspondente à energia gerada a partir do biogás foi calculada utilizando a Equação 8.

$$Ep = \frac{E \cdot 616,78 \cdot 365 \text{ dias}}{1.000} \quad (8)$$

Sendo: Ep = valor equivalente da energia produzida (R\$/ano); E = energia bruta produzida (kWh/d); 616,78 = tarifa média do Nordeste do Brasil (R\$/MWh); 365 = conversão de dia para ano (dias/ano); 1.000 = conversão de kWh para MWh (kWh/MWh).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos, com base nos relatórios disponibilizados pela Compesa e nos cálculos realizados, são apresentados a seguir neste tópico.

4.1 Estimativa da capacidade de produção de lodo

A produção de lodo em sólidos totais apresenta diferenças significativas entre as estações analisadas (Tabela 5). Nesse contexto, a ETE 10.01, devido à presença de um efluente com maior carga orgânica, registrou uma estimativa da produção de lodo maior em relação às ETEs Gaibu e Minerva. A produção foi de 129,45 kg SST/d na ETE 10.01, enquanto nas ETEs Gaibu e Minerva os valores foram de 102,87 kg SST/d e 27,74 kg SST/d, respectivamente.

Tabela 5 – Estimativa da produção diária de lodo nas ETEs.

Variáveis	ETE 10.01	ETE Gaibu	ETE Minerva
Produção de lodo em sólidos totais <i>SSTaf</i> (kg SST/d)	129,45	102,87	27,74
Volume gerado de lodo seco VLS (m ³ /d)	4,26	3,38	0,85

Fonte: Elaboração própria (2025).

Diante disso, a medição dos sólidos totais no lodo permite avaliar a eficiência do processo de tratamento e serve como parâmetro essencial para o planejamento de tecnologias complementares, como digestão anaeróbia, secagem e estabilização do lodo (Hartmann; Ahring, 2005).

Quanto à geração específica de lodo, a ETE Minerva registra um valor de 0,85 m³/d, consistente com a medida reportada por Hartmann (2022), de 0,7 m³/d, visto que ambas as estações possuem vazão semelhantes. Em contrapartida, a ETE 10.01 apresenta uma estimativa significativamente superior, cenário que pode ser atribuído à maior vazão de efluentes tratados nessa unidade, associada à maior população atendida. Esses fatores refletem diretamente no volume de lodo gerado, evidenciando

a correlação entre o porte da estação e as características do sistema de tratamento utilizado.

4.2 Estimativa do potencial de geração de biogás

De acordo com Jordão e Pessôa (2017), o volume de biogás gerado na digestão anaeróbia pode ser estimado em 15 a 20 L/hab.d para lodo primário e 25 a 30 L/hab.d para lodo misto (primário + secundário). No entanto, cálculos baseados na massa de sólidos suspensos voláteis (SSV) destruídos são mais precisos e devem ser priorizados nos balanços energéticos (Jordão; Pessôa, 2017).

A Tabela 6 apresenta a produção diária de biogás e as variáveis intermediárias utilizadas para o cálculo. Dessa forma, foi notado que o aproveitamento energético do biogás depende principalmente do gás metano, sendo o seu potencial energético diretamente proporcional à concentração de metano em sua composição (Hartmann, 2022).

Tabela 6 – Estimativa da produção diária de biogás para cada uma das ETEs.

Variáveis	ETE 10.01	ETE Gaibu	ETE Minerva
Carga de sólidos voláteis no lodo afluente ao digestor SSV_{afl} (kg SSV/d)	100,33	79,72	19,95
Carga de sólidos voláteis no lodo efluente ao digestor SSV_{efl} (kg SSV/d)	50,16	39,86	9,97
Vazão de biogás gerado $Q_{biogás}$ (m ³ gás/d)	47,65	37,87	9,48

Fonte: Elaboração própria (2025).

Apesar das unidades analisadas serem favoráveis à produção de biogás, alguns estudos exibiram desempenhos mais elevados. Hartmann (2022) encontrou uma produção de biogás variando entre 825,37 e 5.953,34 m³/d em estações de tratamento de esgoto de Porto Alegre/RS. De maneira semelhante, Silva (2022) obteve uma produção média de biogás igual a 1.284,50 m³/d em seis ETEs de Aracaju/SE. No entanto, essa discrepância pode ser esclarecida pela maior geração de lodo observada nas estações analisadas nesses estudos, que resulta em uma maior quantidade de matéria orgânica disponível para conversão em biogás.

Além disso, a temperatura é um fator determinante na geração do biogás, influenciando diretamente a atividade microbiana e a conversão da matéria orgânica em metano (Santos, 2010). No Sudeste, onde as temperaturas médias variam entre 15°C e 25°C, períodos mais frios podem reduzir a geração de biogás. Entretanto, no Nordeste, com temperaturas médias entre 25°C e 30°C, a produção tende a ser mais estável, favorecendo a eficiência do processo (Santos; Silva; Oliveira Junior, 2018).

4.3 Estimativa de geração de metano

Com base nos resultados anteriores, a produção de metano nas três ETEs em estudo foi calculada considerando que o metano representa 65% da composição do biogás. Conforme apresenta a Tabela 7, a produção de metano é diretamente proporcional à carga orgânica tratada pelos reatores UASB, sendo a ETE 10.01 a unidade com maior geração.

Tabela 7 – Estimativa da geração anual de metano para cada estação.

Variáveis	ETE 10.01	ETE Gaibu	ETE Minerva
Volume de metano produzido, CH_4 volume (kg/ano)	7374,22	5.860,24	1.466,29

Fonte: Elaboração própria (2025).

Hartmann (2022) obteve resultados elevados de volume de metano produzido, alcançando até 939.467,18 kg/ano. No entanto, é relevante ressaltar que essa discrepância é atribuída ao fato de a autora ter baseado seus cálculos em ETEs centrais localizadas em duas zonas de Porto Alegre/RS, integrando os dados de sete estações em cada zona.

Embora seja notada essa diferença metodológica, a estimativa de emissão de metano neste estudo, especialmente na ETE 10.01, demonstrou ser favorável ao aproveitamento do potencial energético. Diante disso, Sarquis (2023) destaca a relevância desse cenário, dado que o desperdício dessa fonte de energia é uma prática comum nas estações de tratamento de esgoto no Brasil.

4.4 Estimativa do potencial energético

Com o intuito de avaliar o potencial energético produzido na ETEs selecionadas a partir do aproveitamento do biogás gerado, foi estimada a energia bruta produzida diária e anual (Tabela 8). Assim como nos demais parâmetros analisados, a ETE 10.01 apresentou o maior potencial energético, devido ao elevado volume de metano. Por outro lado, as ETEs Gaibu e Minerva, com volumes menores de produção, podem exigir estratégias alternativas para o aproveitamento energético, como a integração com outras unidades geograficamente próximas (Hartmann, 2022).

Tabela 8 – Estimativa do potencial energético diário e anual de cada estação.

Variáveis	ETE 10.01	ETE Gaibu	ETE Minerva
Energia bruta produzida diária, E (kWh/d)	296,52	235,63	59,69
Energia bruta produzida anual, E (kWh/ano)	108.229,80	86.004,95	21.786,85

Fonte: Elaboração própria (2025).

No estudo realizado na ETE Santa Quitéria, situada na Região Metropolitana de Curitiba, Bilotta e Ross (2016) estimaram uma geração de energia bruta diária de 2.176,01 kWh/d, resultando em uma redução de 59% na demanda média mensal de energia elétrica da estação, com base no aproveitamento energético do biogás. Assim, os dados gerados pelos autores evidenciam a viabilidade de utilizar o biogás como uma alternativa sustentável para reduzir custos operacionais e promover a autossuficiência energética em estações de tratamento de esgoto.

4.5 Estimativa da Economia

Com base nos resultados estimados para o valor equivalente da energia gerada a partir do biogás, foi possível comparar esses dados com os custos operacionais das ETEs (Tabela 9). Assim, foi observada uma economia de 7,6% para a ETE 10.01, 26,1% para a ETE Gaibu e 3,4% para a ETE Minerva. Na média, o processo de

biodigestão, desta forma, atende 20,9% do custo operacional das ETEs analisadas, gerando uma economia total estimada de R\$ 133.072,75.

Tabela 9 – Estimativa do valor equivalente da energia bruta produzida.

Variáveis	ETE 10.01	ETE Gaibu	ETE Minerva
Valor equivalente da energia produzida, E_p (R\$/ano)	66.753,76	53.046,30	13.272,69
Custo médio operacional (R\$/ano)	919.321,56	203.905,92	394.369,20

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados deste estudo corroboram com as observações de Jordão e Pessoa (2017), que apontam que a energia gerada a partir do aproveitamento do biogás geralmente não é suficiente para atender integralmente o consumo energético da ETE, mas pode contribuir para suprir uma parte da demanda. Esse aproveitamento parcial representa uma solução sustentável, reduzindo os custos operacionais e a dependência de fonte energética proveniente da concessionária (Campello *et al.*, 2021).

Importante ressaltar que a estimativa obtida abrange apenas o aproveitamento energético do lodo, sem considerar os benefícios econômicos e ambientais associados, como a redução dos custos com transporte e disposição em aterros sanitários (Hartmann, 2022). Além disso, a utilização do biogás contribui para a mitigação de impactos ambientais, ao evitar o lançamento de gases de efeito estufa diretamente na atmosfera e incentivar a transição para uma matriz energética mais limpa e renovável (Jeffrey *et al.*, 2021; Lambiasi *et al.*, 2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou analisar o potencial de produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo gerado em três estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana do Recife. Além disso, a pesquisa destacou a estimativa do lodo gerado, da geração de biogás e do potencial energético nas estações em estudo, que incluem ETE 10.01, ETE Gaibu e ETE Minerva.

Com base nos cálculos realizados e nos resultados obtidos neste trabalho, foi notado que a ETE 10.01 registrou estimativas maiores em relação às ETEs Gaibu e Minerva na geração diária de lodo. Cenário que tem uma relação direta com a vazão dos efluentes tratados em cada unidade, que é diretamente associado à população atendida. No que se refere à vazão diária de biogás gerado nas estações, os valores apresentaram-se inferiores aos encontrados na literatura. Por outro lado, a produção de biogás também foi mais evidente na ETE 10.01, com uma vazão de 100,33 m³/d.

Quanto à estimativa de metano, de forma semelhante aos outros parâmetros analisados, a ETE 10.01 apresentou o maior valor anual, atribuído à maior concentração de metano na composição do biogás dessa unidade em comparação às demais. Por meio disso, esses resultados evidenciam que o potencial energético da ETE 10.01 é mais significativo em relação às outras estações analisadas. Referente à economia de energia, estimou-se uma economia total anual de R\$ 133.072,75 para as três ETEs, sendo a maior contribuição associada à ETE 10.01.

O presente trabalho demonstra a viabilidade da implantação de alternativas sustentáveis nas estações. Os resultados obtidos destacam não apenas a capacidade de geração de biogás e metano, mas também os benefícios econômicos relacionados à economia de energia nas unidades avaliadas, com valores significativos, incluindo os 108.229,80 kWh anuais estimados para a ETE 10.01. Além disso, o trabalho evidencia a relevância dos sistemas UASB na mitigação de impactos ambientais reduzindo o descarte de lodo em aterros sanitários e as emissões de gases de efeito estufa (GEE), além de contribuir para a geração de energia renovável, alinhando-se aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.

Apesar disso, o estudo enfrentou limitações devido à disponibilidade de dados da ETE 10.01, restritos ao ano de 2023, o que impediu uma análise de longo prazo.

Ainda assim, foi realizada uma estimativa de curto prazo satisfatória, destacando a necessidade de dados históricos para futuras análises mais detalhadas.

Recomenda-se, para pesquisas futuras, ampliar a análise do potencial de produção de biogás em outras unidades da Região Metropolitana do Recife que usem sistemas anaeróbios, especialmente em sistemas com maiores cargas orgânicas. Adicionalmente, pesquisas complementares podem abordar a composição e a qualidade do biogás, bem como realizar uma análise econômica detalhada para constatar os investimentos necessários à implantação de sistemas de aproveitamento do biogás na geração de energia elétrica na RMR, considerando também o tempo de retorno desse investimento e os benefícios associados à mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

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

ABRANTES, J. A. **Avaliação da resistência bacteriana em Estações de Tratamento de Esgoto da Fiocruz com ênfase no perfil fenotípico e molecular para beta-lactamases em enterobactérias**. 2022. Tese (Doutorado em Saúde Pública e Meio Ambiente) – Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/55326>. Acesso em: 06 mar. 2025.

AGRAWAL, L. K.; HARADA, H.; OKUI, H. Treatment of Dilute Wastewater in a UASB Reactor at a Moderate Temperature: Performance Aspects. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, [s. l.], v. 83, n. 2, p. 179-184, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0922-338X\(97\)83579-9](https://doi.org/10.1016/S0922-338X(97)83579-9). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0922338X97835799>. Acesso em: 06 mar. 2025.

ALENCAR, L. B. **Potencial Bioquímico de Metano da casca de tucumã codigerida com excretas de aves poedeiras**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2023. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9552>. Acesso em: 06 mar. 2025.

AMARAL, A. C. **Digestão anaeróbia de dejetos suíno: potencial bioquímico de metano e a influência de estratégias operacionais**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/3042>. Acesso em: 06 mar. 2025.

AQUINO, I. S. **Avaliação da presença de microplásticos na estação de tratamento de esgoto Brasília Norte e o potencial de remoção por nano-pó magnético de óxido de ferro funcionalizado com ácido cítrico (NP-Fe₃O₄@AC)**. 2024. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/50914>. Acesso em: 06 mar. 2025.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final** – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

BELTRAME, T. F.; BELTRAME, A. F.; LHAMBY, A. R.; PIRES, V. K. Efluentes, resíduos sólidos e educação ambiental: Uma discussão sobre o tema. **Revista**

Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 20, n. 1, p. 283-294, jan./abr. 2016. DOI: <https://doi.org/105902/2236117015827>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/reget/article/view/15827/0>. Acesso em: 06 mar. 2025.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 275-282, abr./jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016141477>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/9FZgZyXyXNKBZcq9b38jVRQ/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRASIL. Decreto nº 11.598, de 12 de julho de 2023. Regulamenta o art. 10-B da Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para estabelecer a metodologia para comprovação da capacidade econômico-financeira dos prestadores de serviços públicos de abastecimento de água potável ou de esgotamento sanitário [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 132, 13 julho 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/d11598.htm. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRASIL. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília: Probiogás – Ministério das Cidades, 2017. 183 p. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-guia-etes.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 [...]. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 135, 16 julho 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**: Relatório de Avaliação 2022. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr>. Acesso em: 24 jan. 2025.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento [...]. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 de março de 2005, n. 53, Seção 1, p. 58-63. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=18082. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes [...]. **Diário Oficial da União**,

Brasília, 16 de maio de 2011, n. 92, Seção 1, p. 89. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRITTO, A. L. **As tarifas sociais de abastecimento de água e esgotamento sanitário no Brasil**: seus impactos nas metas de universalização na garantia dos direitos humanos à água e ao esgotamento sanitário. Brasília: ONDAS, 2020. Disponível em: <https://ondasbrasil.org/wp-content/uploads/2020/05/As-tarifas-sociais-de-abastecimento-de-%C3%A1gua-e-esgotamento-sanit%C3%A1rio-no-Brasil.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

BRK. **Nossa atuação**. Recife: BRK, 2024. Disponível em: <https://www.brkambiental.com.br/pernambuco/nossa-atuacao>. Acesso em: 08 out. 2024.

CAMPELLO, L. D.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SANTOS, I. F. S. Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. **Environment, Development and Sustainability**, [s. l.], v. 23, p. 2614-2629, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00689-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-020-00689-y>. Acesso em: 06 mar. 2025.

CAVALEIRO, A. J. V.; ALVES, M. M. Digestão anaeróbia. **Revista de Ciência Elementar**, Minho, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.24927/rce2020.009>. Disponível em: <https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2020/009/>. Acesso em: 06 mar. 2025.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 1. ed. Editora UFMG: Belo Horizonte, 1997. 380 p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 3. ed. Editora UFMG: Belo Horizonte, 2007. 379 p.

CHERNICHARO, C. A. L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C. J.; POSSETTI, G. R. C.; ROSSETO, M. A. L. L. R. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, [s. l.], v. 66, n. 213, p. 5-19, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2018.028>. Disponível em: https://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_213_n_1748.pdf. Acesso em: 06 mar. 2025.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. *In*: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Proceedings Online, 2006. Disponível em:

http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000200053&script=sci_arttext&lng=pt. Acesso em: 06 mar. 2025.

COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento. **Ouvidoria Compesa**. Recife: Compesa, 2024. Disponível em: <https://servicos.compesa.com.br/ouvidoria/>. Acesso em: 08 out. 2024.

COSTA, A. P. J.; SILVA, A. L.; MARTINS, R. S. Um estudo sobre estações de tratamento de efluentes industriais e sanitários da empresa Dori Almentos LTDA. **Revista de Graduação UNIVEM**, Marília, v. 1, p. 6-2, 2009. Disponível em: <https://revista.univem.edu.br/REGRAD/article/download/165/185/0>. Acesso em: 06 mar. 2025.

DUTRA, J. A.; LANGE, R. S. **Quanto vale cada real investido em saneamento no Brasil?** São Paulo: ABES, 2021. 107 p.

FARIA, R A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto - Estudo de caso**. 2012. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/828>. Acesso em: 06 mar. 2025.

FERNANDES, G. L.; SANTOS, I. F. S.; SILVA, H. L. C.; BARROS, R. M. Geração de energia usando biogás de aterros sanitários no Brasil: um estudo de potencial energético e viabilidade econômica em função da população. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 67-77, jan./fev. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200210>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ZRswbT3dZ9ryJFWBGtmhXmr/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 06 mar. 2025.

FORESTI, E. Fundamentos do processo de digestão anaeróbia. *In*: TALLER Y SEMINARIO LATINOAMERICANO SOBRE TRATAMIENTO ANAERÓBIO DE AGUAS RESIDUALES, 3., 1994, Montevideo. **Anais [...]**. Montevideo: Universidad de la Republica, 1994. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000871866>. Acesso em: 06 mar. 2025.

FREITAS, K. E. **Uma análise sobre os indicadores de gestão do sistema de esgotamento sanitário antes e após um contrato de parceria público privada: um estudo de caso no município de Serra–ES**. 2023. Monografia (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental), Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/4065>. Acesso em: 06 mar. 2025.

GANDOLPHI, C. **Indicadores de desempenho como instrumento de gestão de lodo de estações de tratamento de esgoto**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/20.500.14289/18294>. Acesso em: 06 mar. 2025.

GOOGLE EARTH. **Google Earth website**. California: Google, 2024. Disponível em: <https://earth.google.com/>. Acesso em: 10 dez. 2024.

HARTMANN, H.; AHRING, B. K. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: Influence of co-digestion with manure. **Water Research**, [s. l.], v. 39, n. 8, Apr. 2005, p. 1543-1552, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.02.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135405000618>. Acesso em: 06 mar. 2025.

HARTMANN, R. **Estimativa de geração de energia a partir do aproveitamento de biogás do lodo gerado nas estações de tratamento de esgotos do município de Porto Alegre**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/267967>. Acesso em: 06 mar. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2022**: rede de esgoto alcança 62,5% da população, mas desigualdades regionais e por cor e raça persistem. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/39237-censo-2022-rede-de-esgoto-alcanca-62-5-da-populacao-mas-desigualdades-regionais-e-por-cor-e-raca-persistem>. Acesso em: 23 jan. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022a. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: 23 jan. 2025.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022b. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em: 09 jun. 2024.

JEFFRY, L.; ONG, M. Y.; NOMANBHAY, S.; MOFIJUR, M.; MUBASHIR, M.; SHOW, P. L. Greenhouse gases utilization: A review. **Fuel**, [s. l.], v. 301, e121017, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121017>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121008942>. Acesso em: 06 mar. 2025.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8. ed. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental: Rio de Janeiro, 2017.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. Concórdia: Embrapa, 2019. 209 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1108617/fundamentos-da-digestao-anaerobia-purificacao-do-biogas-uso-e-tratamento-do-digestato>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LAMBIASI, L.; DDIBA, D.; ANDERSSON, K.; PARVAGE, M.; DICKIN, S. Greenhouse gas emissions from sanitation and wastewater management systems: a review. **Journal of Water and Climate Change**, [s. l.], v. 15, n. 4, p. 1797-1819, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.603>. Disponível em: <https://www.sei.org/publications/greenhouse-gas-emissions-review/>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LEITE, C. H. P.; MOITA NETO, J. M.; BEZERRA, A. K. L. Novo marco legal do saneamento básico: alterações e perspectivas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 1041-1047, Set./Out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210311>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/c9q3cL4bMT4L4KP7zCMxzCP/>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LEITE, W. R. M. **Digestão anaeróbia em temperaturas mesofílica e termofílica de lodo de ETE usando reatores de estágio único e dois estágios**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/160735>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LETTINGA, G.; POL, L. W. H.; KOSTER, I. W.; WIEGANT, W. M.; DE ZEEUW, W. J.; RINZEMA, A.; GRIN, P. C.; ROERSMA, R. E.; HOBMA, S. W. High-Rate Anaerobic Waste-Water Treatment Using the UASB Reactor under a Wide Range of Temperature Conditions. **Biotechnology and Genetic Engineering Reviews**, [s. l.], 2:1, 253-284, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1080/02648725.1984.10647801>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02648725.1984.10647801>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LETTINGA, G.; POL, L. W. H. UASB-Process Design for Various Types of Wastewaters. **Water Science & Technology**, [s. l.], v. 24, n. 8, p. 87-107, 1991. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.1991.0220>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/24/8/87/24208/UASB-Process-Design-for-Variou-Types-of?redirectedFrom=PDF>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LIMA, R. C. **Análise da eficiência dos gastos públicos em abastecimento de água e esgotamento sanitário nos municípios da RMR**. 2021. Monografia (Tecnólogo em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/830>. Acesso em: 06 mar. 2025.

LIRA, R. A.; SOARES, L. R. P. O novo marco regulatório do saneamento básico: análise das principais mudanças–Lei n.º 14.026. **Petróleo, Royalties e Região**, [s. l.], v. 19, n. 70, 2021. Disponível em: <https://seminariodeintegracao.ucam-campos.br/wp-content/uploads/2022/04/O-NOVO-MARCO-REGULATORIO-DO-SANEAMENTO-BASICO-ANALISE-DAS-PRINCIPAIS-MUDANCAS-LEI-No-14.026.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MARTINS, F. J. S. B. D.; BRUEL, G. M.; SOUZA, T. C.; ESPOSITO, M. Aproveitamento de dejetos bovinos para a produção de biogás. **Latin American Journal of Energy Research**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 99-113, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p99-113>. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/lajer/article/view/44600>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MENDONÇA, E. F. **Tratamento anaeróbio de efluentes oriundos da bovinocultura de leite em biodigestor tubular**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Cascavel, 2009. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/2765>. Acesso em: 06 mar. 2025.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Nova Iorque: Mc Graw Hill, 2015. 2008 p.

MIRANDA, K. P.; SILVA FILHO, E. C. Direito de acesso à água potável e saneamento básico para as populações que residem em favelas e áreas periféricas. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 19077-19089, 2023. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv9n6-025>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/60437>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MME – Ministério de Minas e Energia. **Informativo Tarifário do Setor Elétrico**. Brasília: MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/secretaria-nacional-energia-eletrica/publicacoes/informativo-setor-eletrico/informativo-tarifario-do-setor-eletrico-ano-2023.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MOREIRA, R. P. M.; VALE, J. S.; LIMA, F. C. Saneamento e saúde: panorama dos serviços de água e esgoto no estado de Rondônia. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 232-243, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31072/rcf.v15i1.1439>. Disponível em:

<https://revista.unifaema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/1439>. Acesso em: 06 mar. 2025.

MOURA, J. P. **Estudo de casos das rotas tecnológicas para produção de biogás e da influência da composição química de dejetos de matrizes suínas na qualidade do biogás gerada por biodigestor**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/johnsonmoura.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

NINASIVINCHA, B. E. J. **Modelagem da cinética da digestão anaeróbia dos resíduos gerados no processamento de café solúvel**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-07112023-164659/pt-br.php>. Acesso em: 06 mar. 2025.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. **Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology**, [s. l.], v. 5, p. 93-114, Feb. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11157-005-2754-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11157-005-2754-6>. Acesso em: 06 mar. 2025.

OLIVEIRA, C. J. S. **Avaliação da microaeração na eficiência, estabilidade operacional, qualidade do biogás e controle de odor em sistemas anaeróbios de tratamento**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/7986?mode=full>. Acesso em: 06 mar. 2025.

OLIVEIRA, H. F. S. **Proposta de índice de tratamento de esgoto sanitário como ferramenta de apoio ao lançamento de efluentes**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/74439>. Acesso em: 06 mar. 2025.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Banco Mundial: esgoto tratado beneficia a saúde, o meio ambiente e a economia**. New York: ONU, 2020. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2020/03/1707982>. Acesso em: 24 jan. 2025.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **O direito humano à água e saneamento**. Zaragoza: ONU, 2010. Disponível em: https://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_por.pdf. Acesso em: 26 jan. 2025.

PASTRE, F. **Indicadores do esgotamento sanitário de Medianeira/PR frente aos desafios do novo marco legal do saneamento básico**. 2023. Dissertação (Mestrado em Tecnologias, Gestão e Sustentabilidade) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2023. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/7168>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PASTRE, F.; MAURICIO, C. R. M.; DECHECHII, E. C.; MUSSI, F. B. Evolução dos serviços de coleta e tratamento de esgoto no cenário brasileiro: uma análise para alcançar as metas do Novo Marco Legal do Saneamento Básico. *In*: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO, PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, 11., 2023, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: UNINOVE, 2023. Disponível em: <https://submissao.singep.org.br/11singep/arquivos/184.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PEREIRA, A. M. **Degradação anaeróbia de benzeno na presença de etanol, oxigênio e importantes intermediários**. 2021. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/62970?locale=es>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PEREIRA, L. H. C. **O desafio da universalização do saneamento básico no Brasil e a contribuição da participação popular para a sua efetividade**. 2021. Dissertação (Mestrado em Direito Político e Econômico) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/28397>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PEREIRA, N. M. **Potencial de produção de hidrogênio utilizando reforma a vapor do biogás de reatores UASB em ETES operadas pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará**. 2024. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78895>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PERUZZO, V. V. **Estudo da acidogênese e metanogênese aplicada no tratamento da vinhaça da cana-de-açúcar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/2900>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PIMENTA, H. C. D.; TORRES, F. R. M.; RODRIGUES, B. S.; ROCHA JÚNIOR, J. M. O esgoto: A importância do tratamento e as opções tecnológicas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 22., 2002, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: ENEGEP, 2002. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/59983631/O-esgoto-a-importancia-do-tratamento-e-as-opcoes-tecnologicas>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PINTANEL, S. R.; CECCONELLO, S. T.; CENTENO, L. N. Análise da correlação entre os indicadores de saneamento básico e as doenças de veiculação hídrica em municípios do sul do Rio Grande do Sul. **Revista Ambientale**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 41-52, 2021. DOI: <https://doi.org/10.48180/ambientale.v13i2.292>. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/view/292>. Acesso em: 06 mar. 2025.

PRATES, A. K. P. **Avaliação do potencial de aproveitamento energético do biogás para secagem de lodo em 6 estações de tratamento de esgoto do estado de Sergipe que possuem reatores anaeróbios**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/15673>. Acesso em: 06 mar. 2025.

RAGIO, R. A.; ARANTES, C. C.; SUBTIL, E. L. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando coagulante a base de tanino e cloreto de polialumínio. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 31., 2021, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: ABES, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356731331_POS-TRATAMENTO_DE_EFLUENTE_DE_REATOR_UASB_UTILIZANDO_COAGULANTE_A_BASE_DE_TANINO_E_CLORETO_DE_POLIALUMINIO. Acesso em: 06 mar. 2025.

RIBEIRO, J. W.; ROOKE, J. M. S. **Saneamento básico e sua relação com o meio ambiente e a saúde pública**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010. Disponível em: <https://www.ufjf.br/analiseambiental/files/2009/11/TCC-SaneamentoeSa%C3%BAde.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2025.

ROSA, A. P.; LOBATO, L. C. S.; BORGES, J. M.; MELO, G. C. B.; CHERNICHARO, C. A. L. Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 315-328, abr./jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016123321>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/83533KcytbXmpwrmTsHzCYJ/?lang=pt>. Acesso em: 06 mar. 2025.

ROSSONI, H. A. V.; FARIA, M. T. S.; SILVA, A. C.; HELLER, L. Aspectos socioeconômicos e de desenvolvimento humano municipal determinantes na ausência de prestadores de serviços de esgotamento sanitário no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [s. l.], v. 25, n. 02, p. 393-402, mar./abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020183887>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/dWwBkkzPfgRQMSNBYKBNrsh/?lang=pt>. Acesso em: 06 mar. 2025.

SALLES, N. A. **Cotratamento de esgoto sanitário e lixiviado de aterro sanitário em sistemas de lagoas aeradas e de lodos ativados**: abordagem utilizando o ASM. 2019. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-28112019-155818/pt-br.php>. Acesso em: 06 mar. 2025.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1721>. Acesso em: 06 mar. 2025.

SAMPAIO, S. R.; OLIVEIRA, C. R.; GONÇALVES, R. F. Panorama da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos com alto teor de sólidos: tendências e potencialidades. **Revista DAE**, São Paulo, v. 69, n. 231, p. 85-97, Jul./Set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.048>. Disponível em: https://www.revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_231_n_1977.pdf. Acesso em: 06 mar. 2025.

SANTOS, M. P. **Influência da temperatura na eficiência de tratamento de efluentes em reatores UASB**. 2010. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/35200>. Acesso em: 09 mar. 2025.

SANTOS, J. G. M.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA JUNIOR, J. L. A tecnologia UASB como ferramenta para disseminação do tratamento de efluentes em cidades cearenses de pequeno porte. *In*: CONGRESSO NACIONAL DA DIVERSIDADE DO SEMIÁRIDO, 1., 2018, Natal. **Anais [...]**. Natal: Editora Realize, 2021. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conadis/2018/TRABALHO_EV116_MD1_SA22_ID994_06112018102448.pdf. Acesso em: 09 mar. 2025.

SARQUIS, A. L. O. **Modelagem de reator anaeróbio de estação de tratamento de esgoto de Porto Alegre–RS com fim de avaliação do potencial energético**. 2023. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/266151>. Acesso em: 06 mar. 2025.

SILVA, G. S. O. **Estimativa da produção de biogás a partir da digestão anaeróbia do lodo gerado nas principais estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de Aracaju**. 2022. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/17158>. Acesso em: 06 mar. 2025.

SILVA, M. H. T.; BERALDO, K. A. Adoção dos princípios de universalidade e equidade no planejamento de serviços de saneamento básico: estudo a partir do município de Araguaianã/TO. *In*: JORNADA DE DESENVOLVIMENTO E POLÍTICAS PÚBLICAS, 3., 2021, Criciúma. **Anais [...]**. Criciúma: UNESC, 2021. Disponível em: <https://periodicos.unesc.net/ojs/index.php/seminariocsa/article/view/7089/5999>. Acesso em: 06 mar. 2025.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2017**. Brasília: SNIS, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/agua-e-esgotos-1/2017>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnósticos 2021**. Brasília: SNIS, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/diagnosticos-anteriores-do-snis/agua-e-esgotos-1/2021>. Acesso em: 24 jan. 2025.

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. **Nativa**, [s. l.], v. 5, p. 522-528, 2017. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v5i7.5155>. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/5155>. Acesso em: 06 mar. 2025.

VAN HAANDEL, A.; LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto**: Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande: Epgraf, 1994.

VASSALLE, L.; ROSA-MACHADO, A. T.; MOTA FILHO, C. R.; FERRER, I.; PASSOS, F. Avaliação das Lagoas de Alta Taxa pós-tratando esgoto doméstico de reatores UASB em vistas à qualidade do efluente e codigestão anaeróbia. **Revista RedBioLAC**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 48-54, 2021. Disponível em: <http://revistaredbiolac.org/index.php/revistaredbiolac/article/view/41>. Acesso em: 06 mar. 2025.

VAZ, L. G. **Potencial energético do biogás e gases de efeito estufa no setor agropecuário industrial brasileiro**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2023. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/31045>. Acesso em: 06 mar. 2025.

VELÁSQUEZ, P. M. M. **Efecto de la temperatura en el proceso de obtención de biogás a partir de lodos en lagunas de estabilización en la ciudad de Juliaca**. 2022. Monografía (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Florestal) - Universidad Nacional de Juliaca, Juliaca – Peru, 2022. Disponível em:

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/RUNJ_a2eeecb39efbdb6674c662685a56863d/Description#tabnav. Acesso em: 06 mar. 2025.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**: Princípios do Tratamento Biológico de águas Residuárias. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.