



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v19n12025p210-229

Submetido em: 05 jul. 2025

Aceito em: 20 ago. 2025

.....

Revisão bibliográfica da viabilidade da geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente das estações de tratamento de esgoto

Bibliographical review of the feasibility of electricity generation from biogas produced in wastewater treatment plants

Revisión bibliográfica de la viabilidad de la generación de energía eléctrica a partir del biogás proveniente de las plantas de tratamiento de aguas residuales

Vinícius da Silva Ferreira Pereira  <https://orcid.org/0009-0005-0737-9329>

Instituto Federal Fluminense

Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

E-mail: viniciusdasfp@gmail.com

Gabriel de Pinna Mendez  <https://orcid.org/0000-0002-9692-830X>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Professor do Instituto Federal Fluminense

E-mail: gabriel.mendez@iff.edu.br

Augusto Eduardo Miranda Pinto  <https://orcid.org/0000-0002-3473-8340>

Instituto Federal Fluminense

Doutorado em Direito da Cidade pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Professor do Instituto Federal Fluminense.

E-mail: apinto@iff.edu.br

Resumo: Em meio a discussão global sobre redução das emissões de Gases do Efeito Estufa – GEE e da transição energética para utilização de fontes renováveis, é crucial considerar o aproveitamento de todas as fontes de energia disponíveis. O presente trabalho tem por finalidade avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente das Estações de Tratamento de Esgotos (ETE), para tanto, foi utilizado a técnica da revisão sistemática da literatura. A revisão da literatura indicou que, embora haja viabilidade técnica, os altos custos de implementação de uma planta para aproveitamento energético do biogás em ETEs limitam sua viabilidade econômica, sendo viável principalmente em ETEs que tratam grandes volumes de esgoto, vazões superiores a 4,1 m³/s, por exemplo. Com vazões desse porte, o aproveitamento energético do biogás possui potencial de geração de aproximadamente 11 milhões kWh/mês, permitindo um retorno do investimento aplicado na planta em aproximadamente 4 anos.

Palavras-chave: Biogás, Tratamento de Esgoto, Energia Renovável, Sustentabilidade.

Abstract: Amidst the global discussion on reducing greenhouse gas emissions (GHG) and the energy transition to renewable sources, it is crucial to consider the use of all available energy sources. This study aims to evaluate the technical, economic and environmental feasibility of generating electricity from biogas from sewage treatment plants (STPs). To this end, a systematic literature review technique was used. The literature review indicated that, although there is technical feasibility, the high costs of implementing a plant to use biogas for energy in STPs limit its economic feasibility, being viable mainly in STPs that treat large volumes of sewage, with flows greater than $4.1 \text{ m}^3/\text{s}$, for example. With flows of this size, the energy use of biogas has the potential to generate approximately 11 million kWh/month, allowing a return on investment applied to the plant in approximately 4 years.

Keywords: Biogas, Sewage Treatment, Renewable Energy, Sustainability.

Resumen: En medio del debate global sobre la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y la transición energética hacia el uso de fuentes renovables, es crucial considerar el aprovechamiento de todas las fuentes de energía disponibles. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la generación de energía eléctrica a partir del biogás proveniente de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). Para ello, se utilizó la técnica de revisión sistemática de la literatura. La revisión de la literatura indicó que, si bien existe viabilidad técnica, los altos costos de implementación de una planta para el aprovechamiento energético del biogás en EDAR limitan su viabilidad económica, siendo viable principalmente en EDAR que tratan grandes volúmenes de aguas residuales, con caudales superiores a $4,1 \text{ m}^3/\text{s}$, por ejemplo. Con caudales de esta magnitud, el aprovechamiento energético del biogás tiene un potencial de generación de aproximadamente 11 millones de kWh/mes, permitiendo un retorno de la inversión realizada en la planta en aproximadamente 4 años.

Palabras clave: Biogás, Tratamiento de Aguas Residuales, Energía Renovable, Sostenibilidad.

1 Introdução

No Brasil, os investimentos em saneamento se mostram com pequenas variações e um orçamento reduzido entre 2017 e 2021, como mostra o Instituto Trata Brasil no ranking do saneamento em 2023, o empenho dos governantes brasileiros para alterar esse quadro ainda é reduzido, portanto, é importante trazer nesse estudo uma ideia que torne ainda mais viável a operação, reduzindo o custo de operação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), pois o saneamento é um direito básico de todo cidadão.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), 56,3% dos esgotos do país são tratados, esse percentual, apesar de baixo, tendo em vista a necessidade premente da universalização, representa um potencial elevado de geração de biogás nas ETEs, questão que pode contribuir com a transição energética para fontes de energia renovável, esse percentual demonstra que esses locais são potenciais geradores de energia elétrica para o Brasil.

Buscar soluções para novas fontes de energias sustentáveis é um desafio para a sustentabilidade dos países ao redor do mundo e para a pesquisa científica. Ainda se tem estudado o uso do gás metano, presente no biogás produzido em Estações de Tratamento de Esgoto com o fim de reduzir os impactos ambientais e gerar energia elétrica, visto que a maior parte dos esgotos sanitários no Brasil ainda é tratada de forma aeróbica e sem o aproveitamento energético do metano resultante do tratamento (SOARES *et. al.*, 2022, apud. FELCA, 2018, p. 15).

Bioenergia é o nome dado à energia limpa produzida a partir de biomassa, seja ela proveniente de matéria orgânica animal ou vegetal. A produção de bioenergia é uma solução sustentável para a escassez e alto custo de combustíveis, para a geração econômica de energia elétrica ou, ainda, para a conversão em gás de cozinha (TANAKA *et al.*, 2020).

É viável utilizar o biogás gerado em uma Estação de Tratamento de Esgoto para geração de energia elétrica? Essa é a pergunta que norteia esse estudo, diante da Tabela 1, pode-se verificar o potencial de biogás gerado por região, a partir do tratamento de esgoto no país, no Ciclo Sustentável do biogás.

Tabela 1. Potencial de Geração de biogás por região.

Região	Percentual (%)
Sudeste	47
Nordeste	18
Sul	17
Norte	10
Centro Oeste	8

Fonte: Adaptado da Nota Técnica Associação Brasileira do Biogás, 2021.

Com a finalidade de realizar o aproveitamento energético que, a partir da queima do biogás, tem potencial para atingir positivamente a produção de energia elétrica e térmica - reduzindo assim impactos ambientais como os Gases de Efeito Estufa (GEE) -, pode-se utilizar a produção do gás metano, um subproduto oriundo do tratamento de esgoto doméstico, que deixa de contribuir para o aumento dos GEE – visto que os mesmos seriam liberados diretamente na atmosfera (MELLER, 2025).

Assim o panorama de uma ETE que é uma grande aliada do meio ambiente, porém é uma grande consumidora de energia (SILVA, 2024), é alterado, tornando-se um mecanismo importante para auxiliar a propagação do saneamento básico no país, resultando em ações práticas de proteção ambiental, promoção de saúde pública e desenvolvimento sustentável (PREFEITURA MUNICIPAL DE AMERICANA, 2023). Dessa forma, o presente estudo se enquadra na temática de energia renovável, biodigestão, tratamento de efluentes, sustentabilidade e inovação, trazendo a redução dos impactos ambientais e avaliando o reaproveitamento energético, além da redução das emissões dos gases estufa na utilização do biogás para energia elétrica.

Empresas e órgãos governamentais parecem estar despertando para as consequências dos impactos ambientais gerados pelo consumo desenfreado e pelo crescimento populacional e além disso, a corrida contra o tempo para conseguir atender a agenda 2030, conforme as ODS (Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) estabelecidas pela ONU (Organizações das Nações Unidas). O aproveitamento do biogás atende a vários ODS, dentre elas 6, 7, 9, 11, 12 e 13.

O aproveitamento energético eficiente do biogás resulta na diminuição da poluição, pois o seu principal composto, o metano, é prejudicial ao meio ambiente. Ele é queimado para gerar energia térmica e com isso a quantidade de emissões dos gases estufa é reduzida (COLDEBELLÀ, *et al.*, 2008).

De acordo com a problemática apresentada anteriormente, da escassez de recursos naturais junto a crise energética mundial, uma possível solução seria a utilização e implementação de geradores de energia elétrica a partir da queima do biogás em uma ETE, com a proposta de geração de biogás e, consequentemente, a redução dos impactos ambientais. Tendo em vista o constante crescimento populacional das áreas urbanas - com o aumento da população mundial hoje estimada em 8,09 bilhões de pessoas, as áreas urbanas já abrigam 55% da população mundial, e esse número deve crescer para 68% até 2050, tornando-se clara a necessidade de um correto gerenciamento da disposição final de resíduos sólidos urbanos (PODER360, 2024; ONU-HABITAT, 2022) -, é possível aproveitar essa concentração espacial da população para coletar a maior parte dos efluentes domésticos produzidos nas aglomerações urbanas, trazendo mais viabilidade a estratégia de utilização do biogás, pois aumentaria a vazão e consequentemente uma maior produção de mesmo.

Deve ser realizado um estudo detalhado a respeito de qual melhor combinação da turbina e do motor funciona melhor para as características e vazão de biogás obtido nas plantas de tratamento de esgoto, a fim de se obter uma otimização nesse processo de geração de energia. As turbinas e motores são máquinas auxiliam na conversão da energia térmica, obtida pela queima de combustíveis como carvão, biogás ou biomassa, em energia mecânica. Essa energia mecânica é, posteriormente, convertida em outros tipos de energia, como a elétrica (WÓRTICE, 2024).

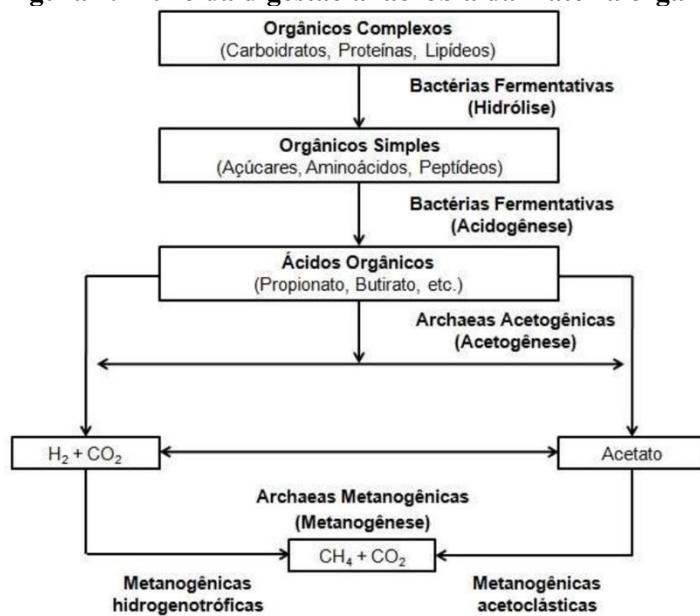
Tendo em vista todos esses aspectos, o objetivo geral deste estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura, sobre a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em uma ETE, com base em estudos científicos e documentos técnicos.

2 Biogás

De acordo com Calza (2015), biogás é uma mistura gasosa, principalmente composta por metano e gás carbônico, com alto potencial combustível, destinada ao uso energético ou térmico. A sua queima é realizada de forma controlada e com isso o metano é convertido em gás carbônico, gerando uma redução na geração de gases de efeito estufa. Esse gás carbônico é utilizado durante a fotossíntese das plantas, e esse ciclo é fechado de forma sustentável, devido ao tempo de geração e consumo de resíduo.

Até chegar em sua forma final, o biogás passa por essas 4 etapas conforme a Figura (1) abaixo:

Figura 1. Fluxo da digestão anaeróbia da matéria orgânica



Fonte: Chernicharo, 2007.

A geração de energia pode ser feita pela queima do biogás em turbinas, microturbinas e em motores do ciclo Otto e diesel, devidamente adaptados, sendo considerada uma fonte energética limpa (CALZA, 2015, p.14).

O biogás, como aponta Alves (2014), pode tanto ser usado como fonte de calor, no uso classificado como direto, como convertido em energia elétrica, em seu uso indireto. Dessa forma, é possível que esse biocombustível produzido atende as demandas da própria planta, reduzindo os custos energéticos, e que seu excedente seja vendido, o que configura, além de economicidade, possibilidades de ganhos e de lucros.

O principal substrato para a produção de biogás nas plantas brasileiras é de origem agropecuária, utilizado em 80% das instalações. Resíduos de origem industrial representam 11% do total, enquanto aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto contribuem com 9% das plantas (CIBIOGÁS, 2022).

Em termos de porte, 79% das plantas em operação em 2021¹ eram de pequeno porte, responsáveis por apenas 8% do volume total de biogás produzido. Por outro lado, plantas de grande porte, que representavam 7% das unidades operacionais, foram responsáveis por 82% da produção de

¹ “Em relação à aplicação energética das plantas de biogás em operação em 2021, verifica-se que a geração de energia elétrica é a mais prevalente no cenário nacional, correspondendo a 87% das plantas e utilizando 71% do volume de biogás produzido para esse fim. As demais aplicações, como biometano, energia mecânica e a energia térmica, consomem o restante do volume de biogás produzido” (CIBIOGÁS, 2022).

biogás no país. As plantas de médio porte constituíam 14% das instalações e produziam 10% do volume total de biogás (CIBIOGÁS, 2022).

Em 2021, o setor agropecuário dominou o cenário de plantas de biogás no país, representando 80% das instalações em funcionamento. Em comparação, os setores industrial e de saneamento contribuíram com 11% e 9%, respectivamente, para o número total de plantas. No que se refere ao volume de biogás produzido, o setor de saneamento liderou com 74% do total, seguido pelo setor industrial com 16% e pelo setor agropecuário com 10% (CIBIOGÁS, 2022).

Além de ser essencial realizar uma estimativa precisa da produção de biogás, a viabilidade de seu uso energético está intimamente ligada à eficiência dos processos de condicionamento e tratamento do gás. Esses processos devem reduzir ou eliminar compostos indesejáveis, assegurando a qualidade do biogás conforme a finalidade e a tecnologia requerida. A Tabela 2 apresenta os compostos que precisam ser reduzidos e seus efeitos adversos no aproveitamento energético do biogás.

Tabela 2. Compostos típicos e impurezas presentes no biogás

Componentes	Efeitos
H ₂ S	<ul style="list-style-type: none"> • Efeito corrosivo em equipamentos e tubulações. • Emissão de SO₂ após queimado e emissão de H₂S na combustão incompleta.
Vapor d'água	<ul style="list-style-type: none"> • Causa corrosão de equipamentos e tubulações quando associado a outros compostos, como o H₂S e CO₂.
Siloxanos	<ul style="list-style-type: none"> • Durante a queima do biogás contendo siloxanos, há formação de sílica (SiO₂) e silicatos (Si_xO_y), que têm efeito abrasivo e danificam equipamentos.
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz o poder calorífico do biogás por reduzir a concentração volumétrica de CH₄. • Causa corrosão (baixas concentrações de ácido carbônico) se o gás estiver úmido.
N ₂	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz o poder calorífico do biogás por reduzir a concentração volumétrica de CH₄.

Fonte: Deublein e Steinhauser, 2011.

As análises de medições são cruciais para o processo de tomada de decisão sobre o aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgoto (ETEs). No entanto, frequentemente, essas análises não são viáveis devido aos altos custos dos equipamentos de medição – visto que os mesmos precisam ser importados e, seu custo inicial, pode chegar a ser quatro vezes o necessário para o monitoramento tradicional realizado no Brasil (HERNANDEZ, 2019). Nesses casos, as decisões precisam ser baseadas em modelos matemáticos de estimativa.

Segundo Rafael *et al.* (2021), o Programa Computacional de Estimativa de Produção de biogás em Reatores UASB – ProBio 2.0² tem o intuito de diminuir as incertezas técnicas no que tange às estimativas de produção de biogás em reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) - um reator anaeróbico de fluxo ascendente, ou seja, que trata esgotos por decomposição anaeróbia da matéria orgânica. Reiteramos que, a monitorização de esgoto e medição do biogás são temáticas abordadas na literatura mundial, mas ainda existem poucos trabalhos científicos das medições e variáveis envolvidas na geração de biogás no tratamento de esgoto utilizando reatores UASB (HRNANDEZ, 2019).

Observa-se, contudo, a necessidade de realizar um levantamento preliminar das condições operacionais e das possíveis emissões perdidas de gases nos reatores que serão avaliados. Esse levantamento permitirá ao usuário do programa computacional escolher o cenário de estimativa mais adequado. Finalmente, conforme já mencionado, é recomendado que as decisões sobre o aproveitamento do biogás em estações de tratamento de esgoto (ETE) sejam baseadas em medições realizadas no próprio local. Caso isso não seja possível, o ProBio 2.0 se apresenta como uma alternativa para estimar a produção de biogás, considerando as incertezas do modelo matemático, bem como as limitações e riscos inerentes ao projeto.

Estudo realizado por Raimundo *et al.*, (2017) mostra que o biodigestor do tipo UASB teve os melhores resultados, gerando uma energia útil de até 95% do consumo energético da ETE a qual estiver instalada, porém mostra que não obteve viabilidade econômica, devido ao Valor Presente Líquido (VPL) negativo, considerando que as receitas obtidas não pagariam os custos anuais de implantação, de operação e manutenção, explica os Valores Presentes Líquidos negativos resultantes do trabalho, contudo, quando em operação, contribui para deixar de emitir até 21.562,82 ton CO₂ eq/ano.

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma métrica usada no campo das finanças para determinar a viabilidade de um projeto ou investimento. O VPL é obtido descontando-se os fluxos de caixa futuros esperados de um investimento para seu valor presente e subtraindo-se o valor do investimento inicial. De forma simples, o VPL indica quanto valor adicional um investimento proporcionará em comparação com o custo do capital utilizado (RAIMUNDO *et al.*, 2017).

A parceria firmada entre Brasil e Alemanha facilitou a transferência de conhecimento alemão no aproveitamento do biogás gerado a partir do tratamento de efluentes e resíduos, uma área na qual a Alemanha possui reconhecimento mundial. Nessa temática, o PROBIOGÁS³ atua impulsionando o desenvolvimento de tecnologias nacionais para o uso do biogás, assim aumentando a viabilidade

² O uso do programa é livre e está disponível para download em <https://etes-sustentaveis.org/>.

³ “O Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil, o PROBIOGÁS, tem o objetivo de ampliar o uso energético eficiente do biogás em saneamento básico e em iniciativas agropecuárias e agroindustriais, inserir o biogás e o biometano na matriz energética nacional e, consequentemente, contribuir para a redução de emissões de gases indutores do efeito estufa” (BRASIL, 2023).

técnica e econômica das plantas, por meio da geração de energia proveniente da biodegradação (CABRAL, 2016).

A produção de biogás apresentou variações tanto espaciais (de um local para outro) quanto temporais, sendo significativamente influenciada por eventos pluviométricos. Ela também depende das condições de projeto (como a tipologia dos reatores) e de construção (como a estanqueidade). Além disso, os aspectos operacionais desempenham um papel importante nesse conjunto - variações, condições de projeto e construção (CABRAL, 2016).

O teor de metano no biogás não apresentou variações significativas durante o período de monitoramento das ETEs analisadas, com a concentração mediana variando entre 70% e 81%. Esses resultados confirmam que a concentração de metano no biogás produzido em reatores UASB que tratam esgoto doméstico é adequada para uso em unidades de cogeração de eletricidade e calor (CABRAL, 2016).

Segundo Silveira *et al.* (2015), assim como na geração de eletricidade, a tendência é que o uso do biogás para a secagem térmica do lodo se torne cada vez mais viável e necessário para otimizar as rotinas operacionais. Com a aprovação da Lei nº 12.305/2010, a partir de 2014, somente a parte dos resíduos que não pode ser aproveitada (rejeitos) pode ser encaminhada para aterros sanitários. Isso implica que o lodo das ETEs deve passar por todos os processos possíveis de tratamento e recuperação utilizando as tecnologias disponíveis e economicamente viáveis, antes de ser descartado em um aterro sanitário.

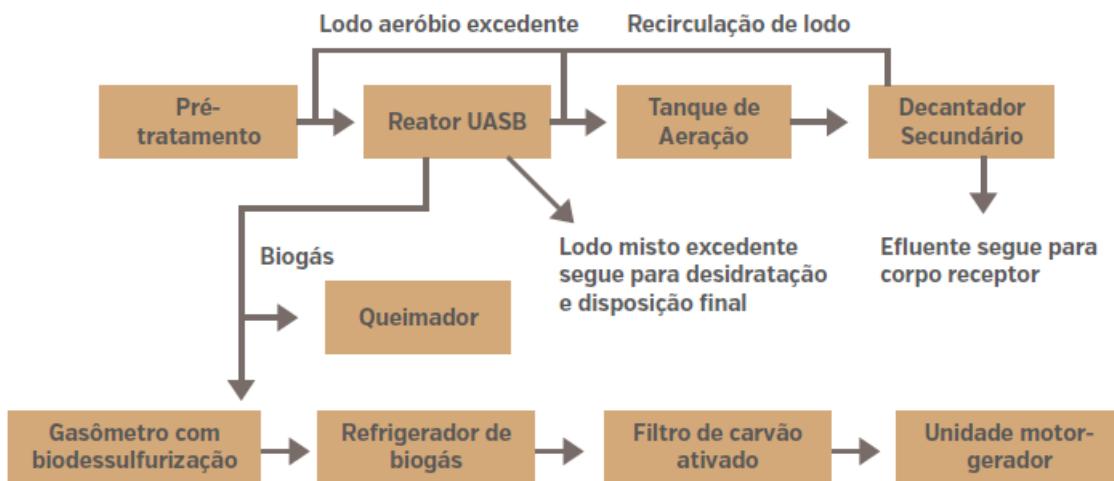
No atual contexto do setor de saneamento, o maior desafio para o aproveitamento energético do biogás não é de natureza técnica ou financeira. As empresas que já implementaram projetos desse tipo afirmam que a principal dificuldade foi convencer tanto as partes interessadas internas, que já entendiam e viam a viabilidade no projeto, quanto externas sobre a viabilidade técnica e econômica dessas iniciativas (SILVEIRA *et al.*, 2015).

Segundo Rosenfeldt *et al.* (2016), a configuração que se mostrou mais vantajosa foi o sistema de tratamento de esgotos em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo UASB combinado com lodo ativado convencional e com uso do biogás para a produção de energia elétrica, que consiste em um arranjo composto por um reator UASB, seguido de lodo ativado convencional. O lodo aeróbio excedente ainda não estabilizado, volta ao reator UASB para estabilização anaeróbia, junto com o lodo anaeróbio já presente no reator. Nesta situação, o biogás gerado no UASB será utilizado, o sistema de aproveitamento energético de biogás é realizado por meio de um motor-gerador, proporcionando a geração de energia elétrica na ETE, para autoconsumo (Figura 2).

Dessa forma, levando a menores custos de implantação e operação da tecnologia UASB, adicionada aos custos evitados com energia elétrica por meio da utilização do biogás gerado nesta

unidade, nesses exemplos analisados por Rosenfeldt *et al.* (2016), soluções que aproveitam energeticamente o biogás gerado demonstraram vantagens significativas em comparação com cenários em que o biogás da mesma tecnologia não é utilizado para geração de energia.

Figura 2. Arranjo de UASB com lodo ativado convencional e aproveitamento energético do biogás



Fonte: Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás. Rosenfeldt Sebastian *et al.*, 2016.

O Processo de Tratamento de Esgoto é norteado principalmente pelo nível de eficiência requerido na área disponível para sua implantação, no custo, na qualidade do efluente final, na operação de cada processo, nas condicionantes ambientais relativas à localização, na produção e na disposição de lodos e na dependência de insumos externos, conforme o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2009).

3. Material e Método

3.1 Material

A presente revisão da literatura usou como base artigos sobre biogás de esgoto, ETE geradora de biogás, Tratamento de Esgoto, Viabilidade Econômica do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, curva de geração de biogás, ETE sustentável.

3.2 Método

A pesquisa foi de natureza exploratória e utilizou o método de Revisão Sistemática da Literatura. Segundo os autores o “único objetivo é revisar a literatura em um campo, sem dados

primários coletados ou analisados”, a estratégia metodológica é definida em oito passos diferentes (OKOLI; SCHABRAM, 2010).

A revisão da literatura tem como propósito identificar a finalidade e os objetivos pretendidos do estudo. Para isso, é necessário definir um protocolo e os parâmetros a serem seguidos, o que garante a padronização e a consistência do processo de revisão. Em seguida, é crucial descrever detalhadamente a busca pela literatura, especificando as bases de dados utilizadas, os termos de busca, e quaisquer filtros aplicados. Os critérios de inclusão, também conhecidos como análise para inclusão, são estabelecidos para selecionar os artigos relevantes e eliminar aqueles que estão fora do escopo definido.

A avaliação da qualidade dos artigos, ou análise para exclusão, é realizada com base em critérios que verificam a qualidade e a aderência aos objetivos da pesquisa. Após a seleção dos artigos, é feita a extração sistemática dos dados relevantes de cada artigo analisado. A síntese dos estudos, que pode envolver técnicas quantitativas e/ou qualitativas, consiste em avaliar os dados extraídos e integrar os achados de forma coerente. Finalmente, a revisão é apresentada de maneira detalhada, sistematizando os achados da pesquisa e oferecendo uma visão abrangente do tema estudado.

Foi utilizado como base de dados para busca dos artigos o Portal de Periódico da CAPES, como critério de inclusão, ficou definido que os artigos terão que ter foco na geração de energia a partir do biogás produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto e dessa forma contribuir para tornar as ETE's sustentáveis levando o saneamento básico para todo o Brasil.

As palavras-chaves utilizadas na busca foram “Biogás”, “Tratamento de Esgoto” e “Energia”, sendo as mesmas buscadas sem o operador “e”, e sem definição de parte específica em que seriam encontradas - como ‘no título’, ‘no resumo’ ou ‘na palavra-chave’. Apenas artigos em língua portuguesa foram considerados e, também, excluídos aqueles artigos que não se enquadram no escopo da pesquisa. O período de busca utilizado foi de dezembro de 2013 até dezembro de 2023 (Quadro 1).

Quadro 1. Definição do Protocolo de Pesquisa

Critérios de inclusão	<ul style="list-style-type: none">• Estudos com foco na geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto;• Artigos que tenham por objetivo tornar as ETE's sustentáveis.
Critérios de exclusão	<ul style="list-style-type: none">• Estudos fora do objetivo da pesquisa;• Publicações em língua estrangeira;• Publicações sem cunho científico.
Palavras-chave	<ul style="list-style-type: none">• “Biogás”, “Tratamento de Esgoto”, “Energia”;• “Biogás”, “Esgoto”, “Energia Renovável”;• “Biogás”, “Tratamento de Esgoto”, “Energia Alternativa”;• “Esgoto”, “Energia”.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Após as buscas no Portal de Periódicos da CAPES, realizadas com as palavras-chave mencionadas, foram encontrados 185 artigos. Dos quais, 170 foram eliminados após a leitura dos títulos e resumos, pois estavam fora do escopo. Por fim, foram analisados o conteúdo de 15 artigos publicados entre 2013 e 2023.

Para realizar a análise dos artigos, foram construídos dois quadros. No primeiro quadro, apresentam-se as publicações organizadas por ano e quantidade total. O segundo quadro expõe os dados sobre os autores, objetivo da pesquisa, local de trabalho dos autores e o termo de busca do artigo. Esses quadros foram elaborados com o objetivo de identificar as informações relevantes presentes nos artigos, necessárias para a análise final deste estudo.

4. Resultado e Discussão

A análise do ano de publicação dos artigos revela que há um aumento a partir do ano de 2016, porém não é significativo na quantidade de publicações ao longo do tempo. Observa-se que o ano de 2020, foi o ano com o maior número de trabalhos publicados dentro do escopo da pesquisa, devido ao programa do governo chamado PROBIOGÁS. Por outro lado, o fato de que a interdisciplinaridade é muito contemplada nesses estudos (Quadro 2).

Quadro 2. Publicações por ano, periódico e quantidade (2013 – 2023)

Título	Ano
Desempenho de motor-gerador de ciclo otto operado com gasolina e biogás proveniente de suinocultura	2014
Produção de Biofertilizantes e Aproveitamento Energético do biogás Proveniente da Digestão Anaeróbia do Lodo Produzido em ETE: Uma Avaliação do Potencial da Cidade de Cristina (MG)	2015
Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos	2016
Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira)	2016
Avaliação sustentável de biogás em unidade de produção de suínos e seu reaproveitamento energético	2017
Estudo da produção de energia elétrica a partir de biogás com e sem purificação de estação de tratamento de esgoto	2017

Estudo das emissões evitadas de GEE e da viabilidade econômica da produção energética do biogás gerado no tratamento de efluentes, aplicados à cidade de Pouso Alegre - MG	2017
Pesquisa exploratória de tecnologias para geração de energia a partir do tratamento de efluente líquido	2018
Desenvolvimento de um Biodigestor de Baixo Custo Aplicado na Agricultura Familiar	2020
Estudo do potencial para geração de energia a partir dos efluentes sanitários gerados no Centro Universitário Cesmac	2020
Mensuração da capacidade de geração de energia elétrica a partir do tratamento dos dejetos suínos	2020
Viabilidade Econômica para a Geração de Energia Elétrica a partir do biogás Produzido em Estação de Tratamento de Esgoto	2020
Metodologias de amostragem de siloxanos em biogás e biometano: análise crítica e aplicabilidade no cenário brasileiro	2022
Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão	2022
Ferramenta computacional para gestão da recuperação energética e da pegada de carbono em estações de tratamento de esgoto baseadas em reatores anaeróbios	2023
Potencial de biogás de biorresíduos: Um estudo de caso no estado do Rio de Janeiro, Brasil	2024

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da base de dados Periódicos Capes, 2024.

No estudo dos artigos, foi possível dividir seus conteúdos em quatro formas diferentes: (1) autores; (2) objetivos; (3) local do estudo; e (4) termo de busca (Quadro 3). Um ponto interessante é que a maioria dos artigos aborda o contexto brasileiro da produção de biogás. É importante esclarecer que o reaproveitamento do biogás, é uma tecnologia nova, porém hoje em dia é mais estudada no Brasil, nos centros urbanos com grandes densidades populacionais.

Quadro 3. Relação dos artigos por autores, objetivos, local de trabalho e termo de busca

AUTORES (ANO)	OBJETIVO	LOCAL DE TRABALHO	TERMO DE BUSCA
MARIN, D. B.; VELOSO, A. V.; MATTIOLI, M. C.; SOARES, J. F.	Analisar, em quantidade e em qualidade, o biogás proveniente de uma unidade de produção de suínos, relatando o seu reaproveitamento energético	Pouso Alegre - MG	Biogás e Energia Renovável.
LOPES, L. & LOURENZANI, A. & SANTOS, C. & SANTOS, P.	Desenvolver um biodigestor de baixo custo com aproveitamento de resíduos da agricultura familiar	Tupã - SP	Biodigestor e Energia Renovável

GARCIA, I. G. B., HOFFMANN, R., MAYER, F. D., PAINES, P. A., & POSSAMAI, O.	Apresentar a análise dos dados coletados referentes às características de esgoto afluente da Estação de Tratamento de Esgoto Serraria, em Porto Alegre/RS.	Porto Alegre - RS	Biogás e Energia Renovável.
GOMES, G. & SUDA, S. & ROSA, A. & RODRIGUES, F.	Realizar simulações com software Aspen HYSYS v8.8 para avaliar os impactos econômicos e energéticos do processo de purificação do biogás em uma planta de produção de energia elétrica. Duas possibilidades uma vinculada ao processo de purificação e outra realizando a queima direta do biogás para a produção de eletricidade	Viçosa - MG	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia
ROSA, A. P. <i>et al.</i>	Estudar o potencial de aproveitamento energético dos subprodutos biogás e lodo gerados na estação de tratamento de efluentes (ETE) Laboreaux em Itabira (MG), composta de reatores UASB, filtros biológicos percoladores e unidade de desaguamento do lodo por filtro prensa	Itabira - MG	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia
BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L.	Quantificar a energia fornecida pelo biogás gerado em uma estação de tratamento de esgotos (ETE) e estimar a emissão evitada de gases de efeito estufa (GEEs) com a recuperação do biogás	Curitiba - PR	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia
LEITÃO, F. O.; DIAS, C. P.; BRISOLA, M. V.	Mensurar a capacidade de geração de energia elétrica através do biogás oriundo do tratamento de dejetos suínos, bem como realizar um estudo de viabilidade econômica da introdução dos três principais sistemas de produção de suínos encontrados no país: Unidades de Ciclo Completo (CC), Unidades Produtoras de Leitões (UPL) e Unidades Terminadoras (UT).	Toledo - PR	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia
ROSSETTO, C. & SOUZA, S. & KLAUS, O.	Avaliar o desempenho de motor-gerador ciclo Otto alimentado com biogás proveniente de suinocultura	Cascavel - PR	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia
SOUSA, A. L.; RIZZATTO, M. L.	Apresentar resultados de produção de biogás a partir de resíduos orgânicos	Matão - SP	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia
MATTOS, J. <i>et al.</i>	Avaliar as principais metodologias de amostragem de siloxanos reportadas na literatura, levantando as principais dificuldades inerentes à sua aplicação no contexto brasileiro	Belo Horizonte - MG	Biogás, Esgoto e Energia Renovável
RAIMUNDO, D. R. <i>et al.</i>	Dimensionar um sistema para produção de biogás através do efluente de uma ETE localizada à cidade de Pouso Alegre - MG	Pouso Alegre - MG	Biogás, Esgoto e Energia Renovável
SANTANA, M. & CARVALHO, E. & ANDRADE, K.	Realização de um levantamento do potencial energético dos efluentes sanitários gerados no CESMAC, para posterior aproveitamento, minimização dos impactos ambientais e desenvolvimento sustentável	Santana do Ipanema - AL	Biogás, Esgoto e Energia Renovável
SILVA, H. J.	Dimensionar uma ETE com aproveitamento energético do biogás gerado anaerobiamente a partir do lodo desse esgoto para o município mineiro de Cristina, bem como o emprego da energia gerada nesse processo para a secagem e higienização da biomassa resultante para utilização desta como fertilizante	Cristina - MG	Biogás, Esgoto e Energia Renovável

BIANCHETTI, F. J. <i>et al.</i>	O desenvolvimento da ferramenta computacional Balanço de Energia e Carbono em ETE Aneróbias (BECarbon0), para avaliação da formação e emissão de CH ₄ em reatores UASB que tratam esgotos sanitários (linha de biogás, compartimento de decantação e no efluente) e a pegada de carbono resultante do controle de emissões fugitivas e do aproveitamento energético do biogás e lodo (térmico e eletricidade).	Curvelo - MG	Biogás, Tratamento de Esgoto e Energia Alternativa
MATOS, M. D. D.; PATERNOSTRO, A. D. G.	Levantamento de patentes referentes à geração de energia em estações de tratamento de esgoto.	Salvador - BA	Esgoto e Energia

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da base de dados Periódicos Capes, 2024.

Os termos de busca utilizados tiveram papel central na delimitação do universo da pesquisa, permitindo identificar estudos que abordam diferentes dimensões da viabilidade do uso energético do biogás. No campo da **viabilidade técnica**, destaca-se o trabalho de Raimundo *et al.* (2017), que, ao analisar o tratamento de efluentes em Pouso Alegre – MG, demonstrou que a combinação do modelo UASB + lodo ativado é capaz de praticamente dobrar a produção anual de energia em comparação aos modelos convencionais. Além disso, o estudo aponta ganhos ambientais significativos, como a redução das emissões de metano e o atendimento de até 95% da demanda energética da estação, reforçando a atratividade dessa tecnologia (ROSENFELDT *et al.*, 2016; RAIMUNDO *et al.*, 2017).

Esse achado converge com estudos recentes que estimam que a quantidade potencial de biometano derivado de biorresíduos no Rio de Janeiro pode variar de três a sete vezes a produção atual. Tal volume teria condições de suprir parte expressiva das necessidades de gás de cozinha, gás natural ou eletricidade no estado, sobretudo porque já existe uma rede de distribuição de gás implantada, o que vem a ser um facilitador na integração do biometano à matriz energética (OLIVEIRA *et al.*, 2024). Assim, observa-se que os ganhos técnicos se relacionam diretamente com oportunidades de infraestrutura já existente, aumentando a viabilidade prática de sua adoção.

No que concerne à **viabilidade econômica**, Garcia *et al.* (2020) indicam que a geração de energia elétrica a partir do biogás em ETEs é tecnicamente exequível, mas depende fortemente da escala de operação (COSTA, 2006). Plantas com vazões superiores a 4,1 m³/s apresentam maior potencial de retorno, podendo gerar cerca de 11 milhões de kWh/mês e amortizar os custos em aproximadamente quatro anos. Esse dado reforça que, embora promissora, a adoção em menor escala enfrenta barreiras econômicas significativas devido ao alto custo de implementação e manutenção.

Por outro lado, sobre a **viabilidade ambiental**, estudos como o de Raimundo *et al.* (2017) sinalizam uma contradição entre benefícios ambientais e limitações econômicas. Apesar da estimativa de evitar emissões de mais de 21 mil toneladas de CO₂ eq/ano, os custos de implantação e operação superariam as receitas obtidas, limitando a atratividade financeira do investimento. Essa tensão entre

ganhos ambientais e entraves econômicos revela um ponto central na discussão: a necessidade de políticas de incentivo, subsídios ou mecanismos de precificação de carbono que tornem o aproveitamento do biogás mais competitivo (BASTOS, 2025).

Assim, a análise integrada dos estudos evidencia que a viabilidade do uso energético do biogás não pode ser avaliada de forma isolada em apenas uma dimensão. Aspectos **técnicos, econômicos e ambientais estão interligados** e demandam estratégias que equilibrem esses fatores, seja por meio de inovações tecnológicas, incentivos econômicos ou políticas públicas voltadas à transição energética.

5. Considerações finais

De maneira geral, a análise dos artigos evidencia que a utilização do biogás em estações de tratamento de esgoto apresenta elevado potencial de contribuição para a sustentabilidade energética e ambiental no Brasil. Do ponto de vista **técnico**, os resultados demonstram que modelos mais eficientes de tratamento, como a combinação UASB + lodo ativado, ampliam consideravelmente a produção de energia e reduzem emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a **dimensão econômica** ainda se mostra um desafio: embora grandes plantas apresentem retorno financeiro em prazos relativamente curtos, a implementação em menor escala enfrenta barreiras relacionadas ao custo inicial e à manutenção do sistema. Já sob a ótica **ambiental**, os benefícios são consistentes, sobretudo no que se refere à mitigação do aquecimento global e à redução de poluentes atmosféricos.

Esse conjunto de evidências sugere que a viabilidade do biogás deve ser entendida de forma multidimensional, pois ganhos técnicos e ambientais podem ser comprometidos pela falta de atratividade econômica (SMANIOTTO, 2025). Nesse sentido, políticas públicas de incentivo, parcerias público-privadas e mecanismos de valorização ambiental, como créditos de carbono, tornam-se fundamentais para viabilizar o uso em larga escala. Além disso, a integração com infraestruturas já existentes, como redes de distribuição de gás, pode acelerar a adoção dessa fonte renovável.

Portanto, a discussão aponta para um cenário em que o aproveitamento energético do biogás, embora desafiador do ponto de vista econômico, representa uma estratégia promissora de transição energética e de sustentabilidade ambiental. O equilíbrio entre essas dimensões dependerá da articulação entre inovação tecnológica, políticas de apoio e planejamento estratégico no setor de saneamento.

Referências

ABES *et al.* **Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto: perspectivas**

para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil. São Paulo: Abiogás, 2021. 33 p.

ALVES, Marceluci de Oliveira. **Biodigestores: fonte renovável de energia.** VII Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica, 2014.

BASTOS, P. P. Z. *Um ambiente para negócios: por que os mercados de carbono não podem evitar a catástrofe climática?* Nota de Economia n.º 12, Projeto Transforma – Instituto de Economia, Unicamp, 13 mar. 2025. Disponível em: <https://transformaeconomia.org/um-ambiente-para-negocios-por-que-os-mercados-de-carbono-nao-podem-evitar-a-catastrofe-climatica/>. Acesso em: 10/09/2025.

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 Sanitaria e Ambiental, v. 21, n. 2, p. 275–282, 20 jun. 2016.

BITTON, G. **Microbial indicators of fecal contamination: application to microbial source tracking.** Report submitted to the Florida Stormwater Association, v. 719, p. 4-6, 2005.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia e inovação (MCTI). **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil.** 3ª. Edição, 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Projeto de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS.** 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/probiogas>. Acesso em: 5 set. 2025, 13:30.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS.** Disponível em: <https://www.gov.br/snus>. Acesso em: 10 ago. 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <https://www.gov.br/mma>. Acesso em: 8 ago. 2022.

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

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

CABRAL, Carolina Bayer Gomes. **Avaliação da produção de biogás para fins energéticos em reatores anaeróbios tratando esgoto sanitário.** 2016. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/169074>. Acesso em: 8 abril 2025.

CALZA, Lana F. **Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás.** Engenharia Agrícola, v.35, n.6, 2015.

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

CIBIOGÁS. **Panorama do biogás no Brasil 2021**. Foz do Iguaçu: [s. n.], 2022. Disponível em: <https://materiais.cibiogas.org/download-panorama-do-biogas-no-brasil-2021>. Acessado em: 05/09/25, às 12h31.

COLDEBELLA, A. *et al.* **Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás da suinocultura**. INFORME GEPEC. Vol. 12, nº2, 2008.

COSTA, D. F. d. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) - Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.86.2006.tde-18062024-143823. Acesso em: 2025-09-10.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. 2nd Ed. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH e Co KGaA, 2011. 550 p.

FÁBIO JOSÉ BIANCHETTI et al. **Ferramenta computacional para gestão da recuperação energética e da pegada de carbono em estações de tratamento de esgoto baseadas em reatores anaeróbios**. Engenharia sanitária e ambiental/Engenharia sanitaria e ambiental, v. 28, 1 jan. 2023.

GARCIA *et al.* (2020). **Viabilidade econômica para geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em estação de tratamento de esgoto**. Rev. Gest. Ambient. E Sust. – GeAS, 9(1), 1-17, e13443. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.13443>.

GOMES *et al.* (2017). **ESTUDO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE BIOGÁS COM E SEM PURIFICAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**. The Journal of Engineering and Exact Sciences. 3. 10.18540/jcecvl3iss7pp0899-0919.

HERNANDEZ, O. A. D. **Avaliação de sistemas de medição para controle de processo em tempo real em uma estação de tratamento de esgoto sanitário que utiliza reatores UASB**. 2019. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do saneamento**. Brasil, 2023. 20 p. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Resumo-Executivo-digital-FINAL.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2024.

JUCÁ, M. F. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE**. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LEITÃO, F. O.; DIAS, C. P.; BRISOLA, M. V. **MENSURAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO TRATAMENTO DOS DEJETOS SUÍNOS**. Informe GEPEC, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 91–115, 2020. DOI: 10.48075/igepec.v24i1.22844. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/gepec/article/view/22844>. Acesso em: 20 jul. 2024.

LIMA, C. C.; CARVALHO, L. M. de O. **A produção de energia elétrica, a exaustão ambiental da fonte hídrica e a opção proveniente da base eólica renovável**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.5, n.1, 2018.

LIMA, M. F. de. **Produção de biogás a partir de lodo de esgoto em condições mesofílicas e termofílicas**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

LOPES *et al.* (2020). **DESENVOLVIMENTO DE UM BIODIGESTOR DE BAIXO CUSTO APLICADO NA AGRICULTURA FAMILIAR**. Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas. 14. 8. 10.18011/bioeng2020v14n1p8-15.

MARIN, D. B. *et al.* **Avaliação qualiquantitativa de biogás em unidade de produção de suínos e seu reaproveitamento energético**. Revista Agrogeoambiental, [S. l.], v. 10, n. 4, 2019. DOI: 10.18406/2316-1817v10n420181247. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/1247>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MARQUES, L. **Capitalismo e colapso ambiental** / Luiz Marques. - Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2015

MARTINS, F.; OLIVEIRA, P. **Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura**. Energia na Agricultura, v.31, n.3, 2011.

MATOS, M. D. D.; PATERNOSTRO, A. de G. **PESQUISA EXPLORATÓRIA DE TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO TRATAMENTO DE EFLUENTE LÍQUIDO**. Cadernos de Prospecção, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 114, 2018. DOI: 10.9771/cp.v11i1.23199. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/23199>. Acesso em: 20 jul. 2024.

MATTOS, J. *et al.* **Metodologias de amostragem de siloxanos em biogás e biometano: análise crítica e aplicabilidade no cenário brasileiro**. Engenharia sanitária e ambiental/Engenharia sanitaria e ambiental, v. 27, n. 6, p. 1059–1065, 1 nov. 2022.

MATTOS, J. *et al.* Part A: *Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs Technical Note 1 - Topics of interest*. Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 1, n. 1, p. 5–19, 1 jan. 2021.

MELLER, L. de L. **Quantificação de emissões de gases de efeito estufa em estação de tratamento biológico de efluentes: estudo de caso da ETE CASAN Lagoa da Conceição, Florianópolis-SC**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2025.

MOURA, L. R. de; DIAS, S. L. F. G.; JUNQUEIRA, L. A. P. **Um olhar sobre a saúde do catador de material reciclável: uma proposta de quadro analítico**. Ambiente e Sociedade, v. no 2018, p. 01-20, 2018 Tradução. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0107r2vu1811ao>. Acesso em: 13 abr. 2024.

OKOLI, C.; SCHABRAM, K. *A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research*. Sprouts: Working Papers on Information Systems, v. 10, n. 26, 2010.

OLIVEIRA, H. R. *et al.* **Biogas potential of biowaste**: A case study in the state of Rio de Janeiro, Brazil. Renewable Energy, v. 221, p. 119751–119751, 1 fev. 2024.

ONU-HABITAT. **População mundial será 68% urbana até 2050**. Brasília, DF, 1º jul. 2022.

Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-popula%C3%A7%C3%A3o-mundial-ser%C3%A1-68-urbana-at%C3%A9-2050>. Acesso em: 5 set. 2025.

PEREIRA, V. da S. F. **BIODIGESTORES EM PROPRIEDADES RURAIS: ESTUDO DE CASO DE CANTAGALO/RJ** – Trabalho de Conclusão de Curso: Engenharia Civil – UFRJ/Campos Macaé - Vinicius da Silva Ferreira Pereira. Orientação: Profa. Dra. Monique Amaro de Freitas Rocha Nascimento – Rio de Janeiro, 2021. 63 f.

PEREIRA, V. da S. F. **Publicações por ano, periódico e quantidade.** Base de Periódicos da CAPES, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 04 abr. 2024.

PODER360. *População mundial chegará a 8,09 bilhões em 2025*. Poder360, 31 dez. 2024. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-internacional/populacao-mundial-cheagara-a-809-bilhoes-em-2025/>. Acesso em: 5 set. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE AMERICANA. *Existência e importância da ETE*. Americana, 2023. Disponível em: <https://www.americana.sp.gov.br/americana-index.php?a=noticia&id=28858>. Acesso em: 5 set. 2025.

RAFAEL, G. et al. Part A: *Advances in tools and techniques for estimating biogas production and treatment in anaerobic-based STPs Technical Note 2 - Software for estimation of biogas production in UASB reactors - ProBio 2.0*. Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 1, n. 1, p. 21–34, 1 jan. 2021.

RAIMUNDO, D. R. et al. **Estudo das emissões evitadas de GEE e da viabilidade econômica da produção energética do biogás gerado no tratamento de efluentes, aplicados à cidade de pouso alegre – MG**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.6, n.5, p. 995-1016, 2017.

ROCKSTRON, J. *A safe operating space for humanity*. Nature. v.461, n24, p. 472-475, 2009.

ROSA, A. P. et al. **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 Sanitaria e Ambiental, v. 21, n. 2, p. 315–328, 20 jun. 2016.

ROSENFELDT, S. et al. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás/Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

ROSSETTO, C. & SOUZA, S. & KLAUS, O. (2014). **DESEMPENHO DE MOTOR-GERADOR DE CICLO OTTO OPERADO COM GASOLINA E BIOGÁS PROVENIENTE DE SUINOCULTURA / PERFORMANCE MOTOR-GENERATOR OPERATED WITH OTTO CYCLE GASOLINE AND BIOGAS FROM THE PIG**. Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas. 8. 10.18011/bioeng2014v8n1p34-42.

SANTANA, M. & CARVALHO, E. & ANDRADE, K.. (2020). **Estudo do potencial para geração de energia a partir dos efluentes sanitários gerados no Centro Universitário Cesmac**. Diversitas Journal. 5. 2597-2607. 10.17648/diversitas-journal-v5i4-1151.

SEMAE. Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (2011). “**Estudo Técnico de**

Viabilidade – Cogeração de Energia a partir de biogás e do Lodo Proveniente de Reatores Anaeróbios da ETE Rio Preto". São José do Rio Preto: SP, 42 p.

SILVA, E. Avanços tecnológicos em ETEs. Saluta, 2024. Disponível em: <https://saluta.com.br/avancos-tecnologicos-em-etes/>. Acesso em: 5 set. 2025.

SILVA, H. J. DA. PRODUÇÃO DE BIOFERTILIZANTES E APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS PROVENIENTE DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DO LODO PRODUZIDO EM ETE: UMA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA CIDADE DE CRISTINA (MG). Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 4, n. 4, 1 dez. 2015.

SILVEIRA, L. C. da; et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto. Brasília: Programa de Energia para o Brasil, 2015. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-guia-etes.pdf>. Acesso em: 8 abril 2025.

SOARES, I. P. [et al.]. Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. 29 p. il. color. (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439; 49).

SOUSA, A. L.; RIZZATTO, M. L.. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. Scientific Electronic Archives, [S. l.], v. 15, n. 2, 2022. DOI: 10.36560/15220221511. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/index.php/SEA/article/view/1511>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SMANIOTTO, B., & BECKER, M. R. 2025. Viabilidade técnica e econômica de uma planta de biogás para aproveitamento de resíduos orgânicos em Foz do Iguaçu-PR. Revista Políticas Públicas & Cidades, 14(1), e1584. <https://doi.org/10.23900/2359-1552v14n1-64-2025>

TANAKA et al. (2020). Simulação de um modelo de otimização de biodigestores para a produção sustentável de bioenergia. Brazilian Journal of Business. 2. 1140-1150. [10.34140/bjv2n2-021](https://doi.org/10.34140/bjv2n2-021).

VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. v. 1. 452p. [S.l.]. 2005.

WÓRTICE. Como funcionam as turbinas em uma usina termoelétrica e sua importância para a geração de energia. Sertãozinho, SP, 12 ago. 2024. Disponível em: <https://wortice.com.br/como-funcionam-as-turbinas-em-uma-usina-termoeletrica-e-sua-importancia-para-a-geracao-de-energia>. Acesso em: 5 set. 2025.