

AMANDA ALVES ARRUDA

**AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE E SUSTENTABILIDADE DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOGÁS EM UM
BIODIGESTOR DE PEQUENO PORTE**

Botucatu

2024

AMANDA ALVES ARRUDA

**AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE E SUSTENTABILIDADE DE UM SISTEMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOGÁS EM UM
BIODIGESTOR DE PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Profº Drº Fernando de Lima
Caneppele

**Botucatu
2024**

A779a

Arruda, Amanda Alves

Avaliação de viabilidade e sustentabilidade de um sistema de geração de energia elétrica utilizando biogás em um biodigestor de pequeno porte / Amanda Alves Arruda. -- Botucatu, 2024

93 p. : tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Fernando de Lima Caneppele

1. Biodigestores. 2. Análise de Ciclo de Vida. 3. Análise de Viabilidade Financeira. 4. Revisão Sistematizada. 5. Geração de energia elétrica. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Avaliação de Viabilidade e Sustentabilidade de um Sistema de Geração de Energia Elétrica Utilizando Biogás em um Biodigestor de Pequeno Porte

AUTORA: AMANDA ALVES ARRUDA

ORIENTADOR: FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO DE LIMA CANEPPELE**
Data: 05/08/2024 22:45:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO DE LIMA CANEPPELE (Participação Virtual)
Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos

Documento assinado digitalmente
 **JAIR ANTONIO CRUZ SIQUEIRA**
Data: 06/08/2024 08:07:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JAIR ANTÔNIO CRUZ SIQUEIRA (Participação Virtual)
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Prof.ª Dr.ª KASSANDRA SUSSI MUSTAFÉ OLIVEIRA (Participação Virtual)
Engenharia Rural / UNESP/FCA - Botucatu/SP

Documento assinado digitalmente
 **KASSANDRA SUSSI MUSTAFÉ OLIVEIRA**
Data: 12/08/2024 20:18:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Botucatu, 05 de agosto de 2024.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e contribuição de diversas pessoas e instituições às quais gostaria de expressar minha sincera gratidão.

Aos meus queridos pais pelo apoio incondicional. Aos meus amigos, sou imensamente grata pelo apoio incondicional, pelo suporte emocional e pelas palavras de incentivo ao longo desta jornada desafiadora.

Ao Prof. Dr. Fernando, agradeço pela orientação dedicada, pelo incentivo constante, pela sua paciência e pelas valiosas sugestões que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e apoio foram essenciais para minha formação acadêmica.

À FCA, pelo acesso aos recursos bibliográficos, infraestrutura adequada e ambiente propício à pesquisa, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço a todas as demais pessoas que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, direta ou indiretamente.

RESUMO

Os estudos sobre o uso do biogás para a produção de energia elétrica ainda são escassos, mesmo sendo uma opção muito sustentável, tanto pelo descarte de resíduos contaminantes, quanto pela redução dos gastos com energia elétrica. Diante disso, o objetivo do trabalho foi projetar e avaliar um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por um biodigestor doméstico do tipo HomeBiogas 2.0, instalado na Faculdade de Ciências Agrônômicas, da Universidade Estadual Paulista, no município de Botucatu - SP. Considerando a produtividade estimada de biogás do biodigestor HomeBiogas 2.0 de acordo com a bibliografia e dados edafoclimáticos da região, foi definido o sistema motor-gerador proporcional, bem como suas expectativas de produção de energia elétrica em kWh. Alinhado aos dados produtivos, foi feita uma avaliação financeira, onde os custos de produção de energia elétrica, custos de instalação desse sistema, viabilidade e taxa de retorno de investimento foram determinados. Também considerando os componentes do sistema foi feita uma análise de ciclo de vida, com o uso do software CES EduPack, no módulo EcoAudit, discutindo sua sustentabilidade e pegada de carbono, sintetizando os resultados. Paralelamente, foi feita uma revisão sistematizada, tendo como estratégia de busca *“o uso de biodigestores para produção de biogás para geração de energia elétrica no Brasil”*. Essa estratégia foi aplicada em três bases: Science Direct, Scopus e Web Of Science, os trabalhos obtidos foram selecionados com o auxílio do software Rayyan, seguidos pela discussão e conclusão com base na busca. Por fim, considerando as análises realizadas durante a dissertação foram discutidos os aspectos financeiros (instalações e público alvo, manutenções e mão de obra, comparativo a rede convencional de distribuição) e de sustentabilidade (energias renováveis, destinação correta de resíduos sólidos e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU). Foi constatada a vantagem do uso do biogás para a produção de energia, destacando-se como uma alternativa promissora para a sustentabilidade e a redução de impactos ambientais. No entanto, a análise também revelou que, em pequenas escalas, o investimento inicial necessário para a implementação de sistemas de biogás pode ser um impeditivo.

Palavras-chave: HomeBiogas; energia elétrica; avaliação financeira; análise de ciclo de vida; ODS.

ABSTRACT

The studies on the use of biogas for electricity generation are still scarce, despite being a highly sustainable option, both in terms of disposing of contaminated waste and reducing electricity expenses. Therefore, the aim of this study was to design and evaluate an electricity generation system using biogas produced by a HomeBiogas 2.0 domestic biodigester installed at the Faculty of Agronomic Sciences, São Paulo State University, in the city of Botucatu - SP. Considering the estimated biogas productivity of the HomeBiogas 2.0 biodigester according to literature and local climatic data, a proportional motor-generator system was defined, along with its expected electricity production in kWh. A financial evaluation was conducted, assessing the costs of electricity production, installation costs of the system, feasibility, and return on investment rate. Additionally, a life cycle analysis was performed, using the CES EduPack software, EcoAudit module, to discuss its sustainability and carbon footprint, synthesizing the results. In parallel, a systematic review was conducted, with the search strategy being "*the use of biodigesters for biogas production for electricity generation in Brazil*". This strategy was applied to three databases: Science Direct, Scopus, and Web of Science. The obtained studies were selected with the assistance of the Rayyan software, followed by discussion and conclusion based on the search. Finally, considering the analyses conducted during the dissertation, financial aspects (installation and target audience, maintenance and labor, comparison to conventional grid consumption) and sustainability aspects (renewable energies, proper disposal of solid waste, and the United Nations' 2030 Agenda Sustainable Development Goals) were discussed. The advantages of using biogas for energy production have been established, highlighting it as a promising alternative for sustainability and reducing environmental impacts. However, the analysis also revealed that, on a small scale, the initial investment required for implementing biogas systems can be a significant barrier.

Keywords: HomeBiogas; electricity; financial evaluation; life cycle assessment; SDGs.

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO GERAL.....	15
	CAPÍTULO 1 - ANÁLISES DO SISTEMA.....	17
1.1	INTRODUÇÃO.....	18
1.2	OBJETIVO GERAL.....	20
1.2.1	Objetivos Específicos.....	20
1.3	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
1.3.1	Sustentabilidade e ODS.....	21
1.3.2	Energia elétrica.....	21
1.3.3	Energias alternativas.....	22
1.3.4	Motores e geradores elétricos.....	24
1.3.5	Biodigestão, biogás e suas aplicabilidades.....	25
1.3.6	Remoção de impurezas do biogás.....	28
1.3.7	Biofertilizantes.....	29
1.3.8	Política Nacional dos Resíduos Sólidos.....	30
1.3.9	Biodigestores de pequena escala.....	32
1.4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
1.4.1	Localização do experimento.....	33
1.4.2	Estrutura utilizada: biodigestor.....	35
1.4.3	Abastecimento do biodigestor e caracterização dos produtos.....	37
1.4.4	Caracterização do biogás.....	39
1.4.5	Estrutura: motor-gerador modificado.....	39
1.5	VIABILIDADE FINANCEIRA.....	41

1.6	ANÁLISE DE SWOT.....	47
1.7	ACV - Análise de Ciclo de Vida.....	48
1.8	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
1.8.1	Resultados da avaliação financeira do sistema.....	50
1.8.2	Resultados da Matriz SWOT - Análise do ambiente interno.....	52
1.8.3	Resultados da Matriz SWOT - Análise do ambiente externo.....	53
1.8.4	Identificação dos pontos focais para o planejamento estratégico...	54
1.8.5	Resultados da ACV do biodigestor.....	56
1.8.6	Resultados da ACV do gerador em uso convencional.....	58
1.8.7	Sintetização dos Resultados.....	60
1.9	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS.....	64
	CAPÍTULO 2 – VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMATIZADA DAS PERSPECTIVAS E DESAFIOS.....	72
2.1	INTRODUÇÃO.....	73
2.1.1	Diagrama de fluxo.....	74
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	75
2.2.1	Questão de Pesquisa.....	75
2.2.2	Palavras-chave e <i>Strings</i> de busca.....	75
2.2.3	Critérios de inclusão e exclusão dos resultados.....	76
2.2.4	Desenvolvimento do Mapeamento.....	76
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	81

2.4	CONCLUSÃO.....	85
	REFERÊNCIAS.....	87
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	92
	REFERÊNCIAS	93

INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, a demanda por energia elétrica está em constante crescimento, impulsionada pela necessidade de desenvolvimento do país (EPE, 2022). Além das infraestruturas básicas essenciais, como água e saneamento, a energia elétrica, os transportes e as telecomunicações são pilares fundamentais para uma qualidade de vida digna (Nahas, 2006; Borges, 2021).

Para esse suprimento é essencial que haja segurança tanto na produção quanto na distribuição, evitando possíveis impactos ambientais, culturais ou socioeconômicos à população (Dos Reis, 2006). Além disso, é necessário reduzir as emissões de gases tóxicos e o aumento das temperaturas, que estão diretamente ligadas ao uso de combustíveis fósseis (Borges, 2021).

Diante disso, o uso de biodigestores surge como alternativa viável para atender à demanda energética, principalmente em meio rural (Júnior *et al.*, 2009). De acordo com o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022, o biogás representa apenas 1,4% entre os 8,7% das energias alternativas renováveis consumidas no ano de 2021 no Brasil e quando comparado ao ano anterior teve um crescimento de 20,9%, explanando a importância do desenvolvimento, exploração e popularização desse sistema produtivo (EPE, 2022).

Além das vantagens que o biogás proporciona ao gerar calor e eletricidade, sua produção, através da biodigestão, é uma excelente alternativa para a reutilização e destinação correta de resíduos sólidos, tanto urbanos quanto rurais, como os dejetos de animais, cooperando para um futuro mais sustentável (IPEA, 2012).

Para a geração da energia elétrica, os motores à combustão interna de ciclo diesel precisam apenas de pequenas modificações para ter como novo combustível o biogás. Esses motores modificados surgem como as melhores opções em rendimento e resistência (Pereira, 2005).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise abrangente do sistema, abordando aspectos técnicos, financeiros e do ciclo de vida do projeto. Foram examinadas as viabilidades econômicas e a avaliação dos impactos ambientais do sistema como um todo. Essa análise permitiu uma visão holística, destacando os desafios e oportunidades envolvidos na implementação e operação do

sistema. Essas conclusões são cruciais para tomar decisões informadas e estratégicas, visando maximizar os benefícios econômicos e ambientais do projeto.

CAPÍTULO 1

ANÁLISES DO SISTEMA

RESUMO

A produção de energia elétrica e a gestão adequada de resíduos sólidos são questões críticas na sociedade contemporânea. A utilização de tecnologias ambientalmente sustentáveis, como o biogás proveniente de resíduos, apresenta uma solução promissora com benefícios econômicos e ambientais. Com a demanda por eletricidade no Brasil projetada para crescer nos próximos anos, a diversificação das fontes de energia se torna cada vez mais necessária. No campo do saneamento, milhões de toneladas de resíduos sólidos são coletadas, mas apenas uma fração mínima de resíduos orgânicos é reaproveitada, evidenciando um potencial ainda inexplorado. Nesse contexto, a implementação de biodigestores em pequenas propriedades rurais, especialmente para produtores isolados, pode promover a autonomia energética e reduzir a dependência da rede elétrica. Além de fornecer uma fonte renovável e sustentável de energia, o uso do biogás apoia vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, incluindo qualidade da água, energia limpa e cidades sustentáveis. Assim, este estudo visa investigar a viabilidade de sistemas de biodigestores de pequeno porte, considerando aspectos técnicos, econômicos e sociais.

Palavras-chave: biogás; biodigestores; energia renovável; resíduos sólidos; Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

ABSTRACT

The production of electric energy and the proper management of solid waste are critical issues in contemporary society. The use of environmentally sustainable technologies, such as biogas produced from waste, presents a promising solution with economic and environmental benefits. With the demand for electricity in Brazil projected to grow in the coming years, diversifying energy sources becomes increasingly necessary. In the field of sanitation, millions of tons of solid waste are collected, but only a minimal fraction of organic waste is reused, highlighting an untapped potential. In this context, the implementation of biodigesters on small rural properties, especially for isolated

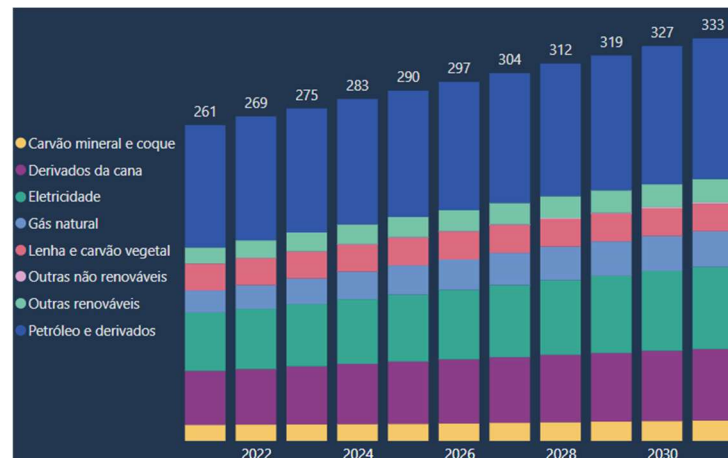
producers, can promote energy autonomy and reduce dependence on the electric grid. In addition to providing a renewable and sustainable energy source, the use of biogas supports several Sustainable Development Goals (SDGs) of the UN, including clean water, clean energy, and sustainable cities. Thus, this study aims to investigate the viability of small-scale biodigester systems, considering technical, economic, and social aspects.

Keywords: biogas; digesters; renewable energy; solid waste; Sustainable Development Goals (SDGs)

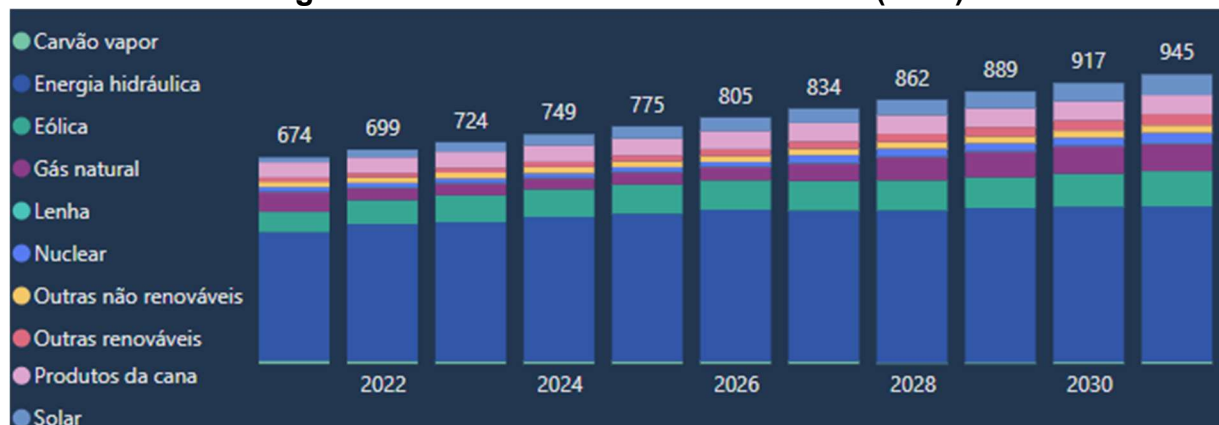
1.1 INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica e a destinação correta de resíduos sólidos são gargalos na sociedade contemporânea. Com o desenvolvimento, surgiu a necessidade de incentivar tecnologias e renovar processos, reformulando e modernizando as operações (Grisa, 2018). Esses artifícios com apelo ambiental são importantes não apenas pela manutenção do ecossistema, mas também pelos seus benefícios financeiros e sociais, proporcionando maior qualidade de vida para todos (Nahas, 2006). A possibilidade de autonomia na geração de energia associada ao manejo adequado dos resíduos é um lucro duplo, tanto individual quanto para a população geral, proporcionando um crescimento sustentável.

A demanda por energia elétrica no consumidor final, conforme previsão do "Plano Decenal de Energia 2031", conduzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), está projetada para aumentar aproximadamente 2,46% ao ano, no período de 2021 a 2031 (Figura 1). Em 2021 o consumo final de energia por fonte, tinha uma demanda média de 261 milhões de toneladas de petróleo equivalente, espera-se que esse número aumente para 333 milhões de toneladas de petróleo equivalente até 2031. Além disso, o estudo também prevê um aumento na oferta interna de eletricidade em terawatt-hora (TWh), passando de 647 TWh em 2021 para 945 TWh em 2031, representando um crescimento anual de 3,44% (Figura 2).

Figura 1 - Evolução do Consumo Final do Horizonte Decenal (MM tep)

Fonte: EPE (2022).

Figura 2 - Oferta Interna de Eletricidade (TWh)

Fonte: EPE (2022).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, em 2022, no Brasil, foram coletadas 63,8 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (SNIS, 2023), resultando em uma produção média de resíduos de 0,98 kg por habitante por dia. Aproximadamente 90,4% da população total do país foi atendida com serviços de coleta direta e indireta de resíduos domésticos. No entanto, apenas 0,17 milhão de toneladas de resíduos orgânicos recicláveis foram aproveitadas, ou seja, apenas 0,266%, destacando um significativo potencial ainda não explorado. Ainda, segundo estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, 45,30% é composto por matéria orgânica (ABRELPE, 2020).

O biogás produzido a partir de resíduos tem o potencial de promover a autonomia energética. Seu uso pode não só fornecer uma fonte de energia renovável, mas também contribuir para a valorização de resíduos que de outra forma seriam

descartados (Grisa, 2018). Na área rural, os resíduos agropecuários podem ser uma fonte significativa de energia renovável para diversos produtores. Ao fornecer uma fonte autossustentável de combustível para diversas aplicações, como a alimentação de sistemas de bombeamento para irrigação, contribuindo para a viabilidade desses empreendimentos (Andrade, 2002).

O uso de biodigestores para a produção de energia contempla pelo menos três ODS, Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, da ONU, Organização das Nações Unidas (IPEA, 2018). Em primeiro, o 6º ODS, contribuindo com a qualidade da água, por não ter o despejo de resíduos sem tratamento, protegendo mananciais (Araújo, 2017); em segundo, o 7º ODS, abordando diretamente sobre energias limpas, como a elétrica à partir da transformação do biogás e, ao mesmo tempo, acessível financeiramente, sustentável e renovável (Kunz, 2018); e, por fim, o 11º ODS, para tornar cidades e comunidades resilientes e sustentáveis, características proporcionadas por esse sistema (Carvalho, 2017).

1.2 OBJETIVO GERAL

Investigar o processo e a produção de energia elétrica a partir do biogás produzido em biodigestor de pequeno porte, especialmente para sistemas isolados e/ou pequenos produtores rurais.

1.2.1 Objetivos específicos

- a) Analisar a instalação de um sistema de produção de energia elétrica a partir do biogás de biodigestão em um biodigestor de pequeno porte nos seguintes aspectos: facilidade de encontrar mão de obra, possíveis manutenções e investimentos financeiros.
- b) Quantificar as reduções de consumo de energia da rede convencional de distribuição.
- c) Avaliar a viabilidade de uso em pequena escala ou por famílias de baixa renda.
- d) Questionar a importância do desenvolvimento desse tipo de tecnologia e traçar uma ligação aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da ONU.

1.3 REVISÃO DE LITERATURA

1.3.1 Sustentabilidade e ODS

Em suma, o termo sustentabilidade é a criação de um sistema ou projeto que seja duradouro, atendendo às necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras (Daly, 2002). Dito isso, considerando que a maior parte dos insumos, tal qual o planeta, são limitados e não renováveis, a ONU fez uma convocatória global, onde foi estabelecida a Agenda 2030. Nela, foram definidos 17 ODS, presentes na figura 3, com foco na erradicação da pobreza e da fome, proporcionando qualidade básica de vida e direitos humanos, de forma que não comprometa o planeta, mantendo estrutura e condições para as próximas gerações (Kronemberger, 2019).

Esses objetivos são: direitos à saúde, educação e igualdade de gênero, acesso à água, esgoto e energia, numa visão mais ampla, a estruturação das cidades sustentáveis, economia dos países com indústria, consumo e trabalho para a população, assim, reduzindo as desigualdades, promovendo parcerias e a paz mundial, além disso, a manutenção e o cuidado com o meio ambiente e suas mudanças climáticas, com foco nas vidas terrestres e nos ecossistemas aquáticos (IPEA, 2018).

Figura 3 - Objetivos globais de desenvolvimento sustentável



Fonte: IPEA (2018).

1.3.2 Energia elétrica

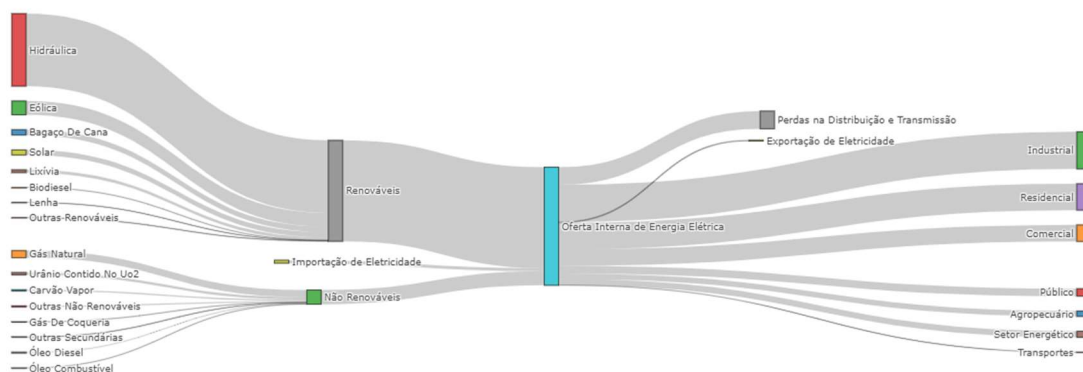
Conforme foram introduzidas mudanças no setor elétrico brasileiro, a energia elétrica passou a ter valor comercial, ganhando destaque com a publicação da lei de

concessões, nº 9.074 de 7 de Julho de 1995, abrindo espaço para privatizações, e, com a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) em 1996, uma autarquia responsável por estabelecer as diretrizes e regras do mercado de energia elétrica (BRASIL, 1995; Gomes, 2009).

Atualmente tem-se mais de 1,5 milhão de quilômetros de rede de transmissão instalados, sendo uma das maiores do mundo (EPE, 2023), mas nem sempre foi assim, até o ano de 1997, 67% das propriedades não tinham energia elétrica (Ribeiro, 2003). A falta de incentivo para as companhias de energia tornava o custo de instalação muito elevado para a população de baixa renda (Kurahassi, 2001). O contexto começou a mudar com a criação do programa Luz para Todos, do governo federal, no ano de 2003, levando acesso à energia elétrica gratuitamente para 10 milhões de pessoas (Camargo, 2008).

O Brasil é rico em recursos naturais que podem ser aproveitados para a geração de energia renovável. Quando focado especificamente para a matriz elétrica, 85% da oferta de energia elétrica no país é de origem renovável, como no fluxo histórico apresentado na Figura 4 (EPE, 2023).

Figura 4 - Fluxo histórico de matriz elétrica no Brasil



Fonte: BEN Interativo (2023).

1.3.3 Energias alternativas

Naturalmente renovadas e não contribuintes para a emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa, o Brasil é um dos principais produtores mundiais de energia com origens renováveis. Em 2022, as fontes renováveis de energia representaram 40,5% do potencial de geração energética do Brasil, apresentando sua

distribuição na Tabela 1 (EPE, 2023).

O potencial de produção de energia renovável, está dividido em produtos da cana, a fonte renovável com maior potencial de expansão, representando 13,5% da produção; em seguida, a energia hidráulica, segunda maior fonte, respondendo por 10,4% do total; a lenha, responsável por 7,7%; a energia eólica, respondendo por 2%; a energia solar, correspondendo a 1% e as outras fontes renováveis em conjunto, compõem os 6% restantes (EPE, 2023).

Alinhado ao ODS 7, na Agenda 2030 do Acordo de Paris, o Brasil se comprometeu a gerar 45% de sua energia a partir de fontes renováveis, valor que está cada vez mais próximo de ser atingido (IPEA, 2018). Além disso, ficou estabelecido um acordo de cooperação internacional para a troca de tecnologias e pesquisas, gerando o compromisso de entregar infraestrutura para levar energia elétrica de qualidade à população, com confiança, credibilidade e apresentando valores acessíveis para todos os habitantes poderem usufruir desse sistema (Leão, 2019).

Tabela 1 - Percentual do potencial de produção de energia renovável anual

Fonte energética	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Hídrica	13,9%	13,0%	11,8%	10,8%	11,1%	10,5%	10,9%	10,5%	10,0%	9,3%	10,4%
Eólica	0,2%	0,2%	0,4%	0,6%	1,0%	1,2%	1,4%	1,5%	1,4%	1,8%	2,0%
Lenha	10,0%	9,5%	9,1%	8,7%	7,8%	8,1%	8,3%	7,9%	7,5%	7,8%	7,7%
Cana	17,6%	19,1%	18,1%	17,6%	17,2%	16,4%	16,5%	16,2%	16,3%	14,7%	13,5%
Solar	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,4%	1,0%
Outras	3,7%	3,9%	4,2%	4,3%	4,4%	4,5%	5,0%	4,7%	5,1%	5,5%	6,0%
Total	45,3%	45,8%	43,6%	42,1%	41,5%	40,8%	42,1%	40,9%	40,6%	39,5%	40,5%

Fonte: Balanço Energético Nacional da Empresa de Pesquisa Energética (2023), adaptado pela autora.

1.3.4 Motores e geradores elétricos

O motor elétrico é a escolha predominante para impulsionar mecanismos tanto em ambientes industriais quanto em aplicações comerciais e residenciais, representando aproximadamente 46% do consumo global de energia elétrica (Waide, 2011). Regulamentações que estabelecem os níveis mínimos de eficiência para motores elétricos têm sido implementadas em diversos países, concentrando-se principalmente nos motores de indução trifásicos (BRASIL, 2021).

Desempenhando um papel fundamental na vida cotidiana, estão presentes em diversos ambientes e desempenham várias funções. Cada tipo de motor apresenta vantagens e desvantagens específicas, sendo a escolha adequada determinada pelas necessidades de cada aplicação. Além dos requisitos de desempenho, é crucial considerar a eficiência de produção e os aspectos construtivos do motor, bem como a correta alimentação de energia elétrica (GRUPO WEG, 2019).

Um grupo motor-gerador é um sistema versátil, disponível em uma variedade de tamanhos e capacidades de produção de energia. Ele une a capacidade de transformar energia térmica em energia mecânica, geralmente por meio de um motor de combustão interna ou outro mecanismo similar, e, em seguida, converte essa energia mecânica em eletricidade utilizando um gerador (Mamede, 2017). Conceitualmente, os componentes de um motor gerador incluem o motor, projetado para melhorar a produtividade e o desempenho; o quadro de transferência de cargas, que alterna fontes de energia principal e auxiliar, garantindo fornecimento contínuo, para geradores de emergência ou uso em horários de pico; o painel de controle, responsável pelo monitoramento e proteção do gerador; e o sistema de combustível, que inclui um tanque com capacidade adequada para a operação do gerador, além de componentes comuns como conexões de tubulação, bomba de combustível e injetor (Grupel, 2018).

Ao longo dos anos, observou-se um aumento substancial nas regulamentações ambientais e na conscientização da sociedade. Essa crescente consciência ambiental tornou os consumidores mais exigentes, buscando o uso responsável dos recursos (Faruk, 2012). Isso inclui a preferência por tecnologias biodegradáveis, ecológicas e renováveis, juntamente com a promoção de materiais recicláveis e sustentáveis. Os

investimentos em energias de matriz renovável aumentaram 40% desde 2020 (IEA, 2023).

Nesse contexto, a escolha entre os diversos tipos de motores elétricos não apenas se baseia nas considerações técnicas, mas também na necessidade de atender a padrões ambientais e práticas sustentáveis. A implementação de motores mais eficientes e a adoção de tecnologias ambientalmente amigáveis são aspectos cruciais para um desenvolvimento tecnológico alinhado com os princípios da sustentabilidade (Ljungberg, 2007; Rassölkin, 2020).

1.3.5 Biodigestão, Biogás e suas aplicabilidades

O processo de biodigestão é um tipo de fermentação anaeróbia de matéria orgânica realizada por diversos microorganismos e bactérias metanogênicas numa câmara chamada biodigestor, um dispositivo que permite a decomposição da matéria orgânica em biofertilizantes e outros produtos gasosos. Os biodigestores possuem uma variedade de formas e tamanhos, mas todos operam com o mesmo princípio básico (Geron, 2014).

Podem ser alimentados com diferentes fontes de matéria orgânica, desde resíduos agropecuários ou lixo orgânico até esgoto, cada um desses insumos vai possuir um potencial de produção de biogás (Magalhães, 1986). Quanto mais rica em amidos, proteínas e carboidratos e mais pobre em resíduos fibrosos e de baixa digestibilidade, maior será o potencial de produção (Gryschek; Belo, 1983).

Os biodigestores têm muitas vantagens quando comparado a outros métodos de decomposição da matéria orgânica, pois são relativamente baratos, tanto para construir, quanto para operar, além de ser usados para tratar uma grande variedade de resíduos, são responsáveis pela diminuição da poluição e da presença de agentes patogênicos; requerem uma área e um tempo de retenção hidráulica menores quando em comparação a outros sistemas anaeróbios existentes (Colatto; Langer, 2012).

Através de diversos estudos, considerando plantas de biodigestores diferentes, Rasi *et al* (2007) definiram parâmetros típicos da composição do biogás, seu alto teor de metano é o responsável pelo potencial de geração de energia, quanto maior for sua presença, maior o potencial, conforme descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição típica do biogás

Componente	Porcentagem
CH ₄	44% - 68%
CO ₂	24% - 41%
H ₂ S	15 - 427,5 ppm
O ₂	0% - 2,5%
N ₂	0% - 17%

Fonte: Rasi, Veijanen e Rintala, 2007, adaptado pela autora.

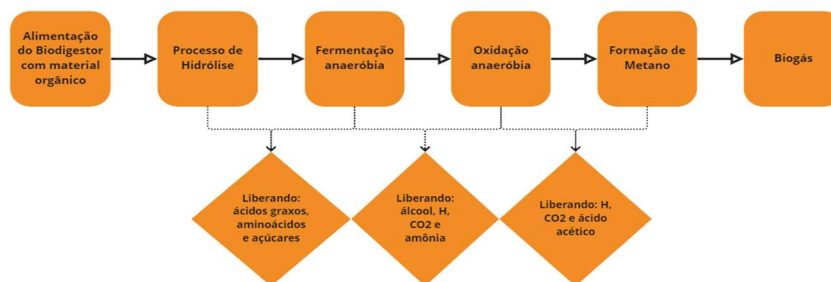
Na figura 5 temos a biodigestão esquematizada, iniciada pela entrada de materiais orgânicos no sistema, a primeira transformação ocorrida é o processo de hidrólise, realizado por bactérias hidrolíticas, torna o material orgânico insolúvel em material orgânico solúvel através da quebra das cadeias carbônicas das proteínas, dos carboidratos e dos lipídios em compostos mais simples como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares (Soares, 2017).

Após essa transformação, esse substrato torna-se mais absorvível pelas paredes celulares das bactérias acidogênicas. Na fermentação anaeróbia, também chamada de acidogênese, os produtos formados durante a hidrólise são consumidos pelos microrganismos, metabolizando os álcoois, a amônia, o dióxido de carbono e o hidrogênio (Gehring, 2014).

Em seguida, temos a fase oxidativa, também chamada acetogênese, que, como o nome sugere, oxida os produtos da fase anterior, gerando ácidos orgânicos graças às bactérias sintróficas acetogênicas (Araújo, 2017).

A fase mais delicada e prolongada da biodigestão é a metanogênese, sensível às condições operacionais, como temperatura, composição do substrato, taxa de alimentação, tempo de retenção, pH e concentração de amônia (Seadi *et al.*, 2008). Neste estágio, os microrganismos metanogênicos consomem hidrogênio, dióxido de carbono e acetato para produzir metano e gás carbônico, os principais componentes do biogás (Kunz *et al.*, 2022).

Figura 5 - Fluxo de produção de biogás



Fonte: Soares, 2007, adaptado pela autora.

O biogás, por sua alta concentração de metano, pode ser usado para produzir energia, seja térmica ou elétrica, o que torna o processo de biodigestão uma opção atraente para muitas comunidades, viabilizando e reduzindo custos com energia elétrica. Para esse uso, é recomendável que o biogás produzido passe por um tratamento para a remoção do excesso de enxofre, presente no gás sulfídrico, um componente prejudicial que gera danos no sistema (Rasi *et al*, 2011), assim como o dióxido de carbono, que aumenta os riscos de corrosão. Um outro prejuízo apresentado quando há a presença de substâncias não combustíveis, como a água, é a redução do poder calorífico do biogás, ou seja, seu poder de queima (Costa, 2006).

Com o aumento da demanda por energia elétrica, é crucial explorar novas alternativas, especialmente para áreas rurais (EPE, 2022; Júnior *et al.*, 2009). A expansão do agronegócio traz consigo duas questões essenciais: em primeiro lugar, a qualidade, estabilidade e distribuição inadequadas da energia elétrica nessas áreas, frequentemente fornecida de forma monofásica e incapaz de atender plenamente às necessidades dos produtores. Em segundo lugar, o aumento do número de granjas destaca a importância crescente do manejo adequado de resíduos e dejetos para mitigar os riscos de contaminação ambiental, refletindo a valorização ambiental e a preocupação com a sustentabilidade (Souza, 2022).

A produção de biogás não apenas possibilita a democratização da produção e do uso de energia, mas também reduz os custos com tratamento de efluentes, viabiliza a comercialização do excedente para as concessionárias, gera renda adicional, promove a criação de empregos, diminui a emissão de metano na atmosfera, alcança a autossuficiência energética e contribui para o desenvolvimento regional, entre outros aspectos (Sanz-Bobi, 2014).

1.3.6 Remoção de impurezas do biogás

Devido à composição específica do biogás, é imprescindível empregar sistemas eficientes para a remoção de gases indesejáveis presentes. Além disso, é essencial empregar métodos de amostragem capazes de representar com precisão a verdadeira composição dos gases (Borschiver, 2014). A necessidade de purificação do biogás para a produção de biometano é evidente. Diversos métodos de purificação do biogás estão disponíveis, visando a redução da concentração de gases indesejáveis. Por exemplo, o dióxido de carbono (CO_2), que possui propriedades anti-chamas e diminui o poder calorífico do biogás, e o sulfeto de hidrogênio (H_2S), um gás incolor, tóxico, com características corrosivas, influenciando na periculosidade do biogás, são alvos desse processo de purificação (Mainier *et al.* 2007).

Com o objetivo principal de realizar a purificação do biogás, a primeira planta-piloto foi estabelecida na Suécia em 1992, utilizando técnicas de adsorção por mudança de pressão (PSA) para a remoção de CO_2 (Persson, 2003). Desde 2015, normativas relacionadas ao uso de biocombustíveis estão em vigor, destacando-se o biometano, obtido por meio da purificação do biogás. No Brasil, o biometano deve estar em conformidade com as exigências estabelecidas pela ANP (Resolução N°8 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2015), essa resolução define os padrões de qualidade necessários para esse combustível, incluindo suas especificações para uso em veículos automotores, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação do Biometano

Característica	Unidade	Limite
Metano (CH_4)	% mol.	96,5
Oxigênio (O_2)	% mol.	0,5
Dióxido de Carbono (CO_2)	% mol.	3,0
$\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$	% mol.	3,5
Enxofre total	mg/m ³	70
Gás Sulfídrico (H_2S)	mg/m ³	10

Fonte: Resolução N°8 da ANP (2015), adaptado pela autora.

De acordo com Naja *et al.* (2011), diversos processos e técnicas são empregados para a purificação e enriquecimento do biogás, concentrando-se principalmente na remoção de água, H_2S e CO_2 . A Tabela 4 apresenta alguns desses métodos.

Tabela 4 - Processos utilizados para a purificação e enriquecimento de biogás

Componente do Biogás	Técnica
Eliminação da água (H ₂ O)	Demister (eliminador de névoa) Separador ciclônico Condensação Secagem Adsorção em sílica
Eliminação do Gás Sulfídrico (H ₂ S)	Oxidação biológica aeróbica Adição de FeCl ₃ ao digestor Adsorção em Fe ₂ O ₃ Absorção (NaOH) Absorção (solução de ferro) Separação por membrana Filtros biológicos Carvão ativado Peneiras moleculares
Eliminação do Dióxido de Carbono (CO ₂)	Adsorção por variação de pressão (PSA) Técnicas baseadas em absorção física Separação por membrana Técnicas baseadas em absorção química Adição de propano Criogenização

Fonte: Naja *et al.* (2011), adaptado pela autora.

1.3.7 Biofertilizantes

Após a fermentação de resíduos agrícolas ou dejetos animais para a produção de biogás, são gerados subprodutos nesse processo anaeróbico, os biofertilizantes (Sahoo, 2012).

Esse digestato pode ser utilizado como uma fonte de matéria orgânica, exibindo uma composição complexa de macro e micronutrientes essenciais para as plantas, como fósforo e nitrogênio e com um pH de 7,5, básico, os biofertilizantes, além de corretivos e adubos, podem ser usados para combater insetos-praga e doenças (Machado, 2023; Silva, 2007).

A aplicação de biofertilizantes em cultivos agrícolas melhora a saúde e a vitalidade do solo, além de aumentar sua permeabilidade. Esses fertilizantes podem ser líquidos ou sólidos, resultantes do processo de biodigestão. Eles devem ser aplicados após chuvas ou irrigações, com frequência e dosagem ajustadas de acordo com as necessidades das plantas. Embora os biofertilizantes possam substituir os

adubos químicos, é crucial observar as regulamentações para evitar desequilíbrios no solo (De Medeiros, 2006; BRASIL, 2008).

Embora os biofertilizantes possam oferecer uma alternativa viável aos adubos químicos, demonstrando resultados promissores no cultivo de cereais, pastagens e hortaliças, é fundamental ressaltar que, no contexto brasileiro, a aplicação de fertilizantes derivados de dejetos animais em culturas de hortaliças consumidas cruas é proibida por regulamentação (Mattos, 2009; Mattos e Cantillano, 2016; Sao Jose e Silva, 2014).

1.3.8 Resíduos e Política Nacional de Resíduos Sólidos

Um dos mais significativos desafios enfrentados pela sociedade contemporânea reside na necessidade de solucionar de maneira eficaz a problemática relacionada à produção de resíduos sólidos, bem como garantir sua disposição final de forma ambientalmente segura. Compete à administração pública municipal a gestão dos resíduos sólidos em todas as etapas do processo, desde a fase de coleta até a sua destinação final, a qual requer ser realizada de maneira ambientalmente segura (Jacobi, 2011).

Os resíduos rurais são derivados das operações agrícolas, florestais e pecuárias. Dentro dessa classificação, os resíduos agrícolas compreendem diversos materiais, como, a palha, os restos de colheita e os resíduos provenientes da cana-de-açúcar. Os resíduos pecuários, por sua vez, consistem em compostos como esterco e outros produtos derivados da atividade metabólica de animais como bovinos, suínos e caprinos. O valor desses resíduos fundamenta sua utilização para fins energéticos, destacando-se como matéria-prima na produção de biogás, contribuindo, desse modo, para a promoção da sustentabilidade e da eficiência energética nas comunidades rurais (Souza, 2004).

O aproveitamento energético de resíduos representa não apenas a busca por soluções adequadas para a disposição correta desses materiais, mas também a exploração de alternativas para sua utilização como recurso energético (EPE, 2022). Esta abordagem não só visa substituir combustíveis não renováveis, mas também contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e o aprimoramento da eficiência dos processos produtivos. A versatilidade dessa prática possibilita a utilização de diferentes matérias-primas e rotas de processamento, resultando em

uma ampla gama de aplicações energéticas. Entre elas, destacam-se a produção de biometano para uso como combustível veicular, assim como a geração de eletricidade por meio do aproveitamento do biogás ou da incineração dos resíduos (EPE, 2022).

A gestão inadequada e a disposição inadequada dos resíduos sólidos têm sido associadas a diversos impactos socioambientais adversos. Entre esses impactos, destacam-se a degradação do solo, o comprometimento de corpos d'água e mananciais, o aumento da frequência e intensidade de enchentes, a contribuição para a poluição do ar e a proliferação de vetores de doenças de importância sanitária em áreas urbanas. Além disso, a prática de catadores em condições insalubres nas ruas e nas áreas de disposição final dos resíduos representa um desafio adicional para a saúde pública e o bem-estar das comunidades locais (Besen *et al.*, 2010). Esses impactos ressaltam a urgência de políticas e práticas de gestão de resíduos mais eficazes e sustentáveis, visando mitigar tais consequências negativas e promover um ambiente mais saudável e equilibrado.

Indicando a relevância do aproveitamento energético de resíduos e a fim de regulamentar a gestão de resíduos, em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída no Brasil com o objetivo de reduzir o impacto dos resíduos no meio ambiente (BRASIL, 2010). Essa Lei Federal estabelece diretrizes e metas de gerenciamento ambiental que devem ser cumpridas em todo o território nacional. As organizações que não cumprem as normas podem ser punidas, incluindo penas passíveis de prisão. As indústrias e outras empresas, incluindo as tratadoras, podem ser autuadas em valores que variam de 500 a 2 milhões de reais.

De acordo com o Art. 9º da Lei 12.305 que dispõe sobre a PNRS (BRASIL, 2010), a gestão e gerenciamento de resíduos sólidos devem seguir a ordem de prioridade apresentada na figura 6: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada aos rejeitos.

Figura 6 - Ordem de Prioridade de Geração de Resíduos

Fonte: Elaborado pela autora.

Na prática, isso significa que as empresas são responsáveis por processar adequadamente todos os resíduos antes da destinação final. Entre as soluções estão a reciclagem, práticas de educação sanitária e ambientais, logística reversa, coleta seletiva, compostagem e biodigestão (Grisa, 2018). As empresas também devem criar estratégias para minimizar a geração de resíduos. A falta de um gerenciamento apropriado pode prejudicar tanto o meio ambiente quanto a população, além de causar impactos diretos para as organizações (Hart, 2004).

O Plano está relacionado com outros planos nacionais, como os Planos Nacionais de Mudanças do Clima (PNMC), de Recursos Hídricos (PNRH), de Saneamento Básico (Plansab) e de Produção e Consumo Sustentável (PPCS), e apresenta conceitos e propostas para vários setores da economia, conciliando crescimento econômico e preservação ambiental para promover o desenvolvimento sustentável (BRASIL, 1997; BRASIL, 2007; BRASIL, 2009). No que diz respeito à componente de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, definida no Plano Nacional de Saneamento Básico - Plansab, inclui as atividades, infraestruturas e instalações operacionais relacionadas à coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final de resíduos sólidos, incluindo o lixo doméstico e o lixo originário da varrição e limpeza de logradouros e vias públicas (BRASIL, 2007).

1.3.9 Biodigestores de pequena escala

Os biodigestores de pequenas proporções têm algumas diferenças de público focal e seus usos quando comparamos aos biodigestores convencionais. Um estudo realizado pela Embrapa Agroenergia (2023) evidencia que a adoção de biodigestores por pequenas propriedades rurais brasileiras pode gerar significativas economias econômicas e ambientais. Seu principal uso seria para a substituição do gás liquefeito

de petróleo (GLP) pelo biogás, podendo resultar em uma economia anual de até 1,45 bilhão de reais, além de uma redução estimada de 595,2 mil toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano. Os biodigestores produzem também o biofertilizante a partir dos resíduos, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis.

Barichello (2015), investigou a adoção de biodigestores na Microrregião de Santa Rosa, impulsionada por iniciativas privadas após o Protocolo de Kyoto. A tecnologia valorizada pela sua capacidade de reduzir emissões de gases do efeito estufa, possibilita a comercialização de créditos de carbono. No entanto, cerca de um terço dos biodigestores na região estão inativos, evidenciando desafios na implementação e operação. A análise do perfil das propriedades, as dificuldades enfrentadas pelos proprietários e o impacto dos biodigestores na energia e no meio ambiente local são pontos de atenção para o desenvolvimento dessa atividade.

A necessidade de políticas públicas e parcerias para facilitar a adoção da tecnologia entre os pequenos produtores, enfatiza a importância da assistência técnica inicial para garantir sua eficácia e adoção contínua.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

1.4.1 Localização do experimento

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido no município de Botucatu - SP (Figura 7), considerando a instalação existente no Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (FCA/UNESP), localizado sob as coordenadas: 22° 85' 25,66" Sul e 48° 43' 04,01" Oeste, com 786 m de altitude, local com o marcador azul na figura 8.

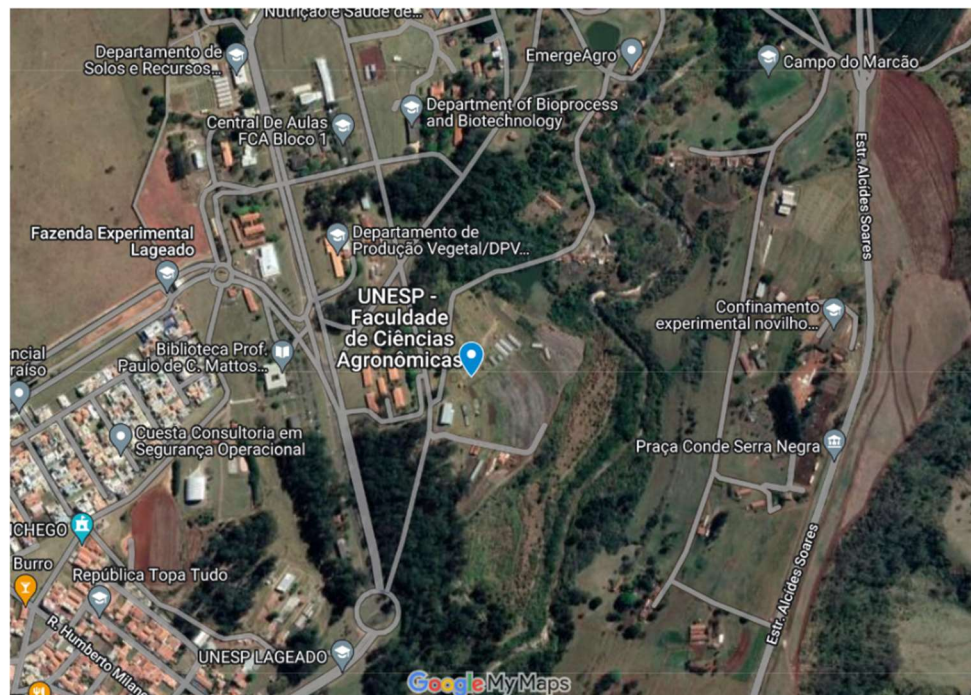
Segundo a classificação climática de Köppen e Geiger, a classificação do município de Botucatu - SP é do tipo Aw - clima de savana tropical (Franco *et al.* 2023), com pluviosidade média anual de 1.500 mm e temperatura média de 21,34°C.

Figura 7 - Mapa do Estado de São Paulo: Município de Botucatu



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 - Imagem de satélite da localização do experimento



Fonte: Google MyMaps (2023).

1.4.2 Estrutura utilizada: Biodigestor

Para o desenvolvimento do trabalho de pesquisa foi considerado um biodigestor HomeBiogas™ no modelo 2.0 (Figura 9), apresentando uma capacidade de 1.200L no tanque de digestão flexível e com uma capacidade de armazenamento de gás de 700L (Figura 10). As dimensões do sistema instalado são 210 cm de comprimento por 115 cm de largura e 125 cm de altura e o peso total do sistema montado é de aproximadamente 1.270 kg. Segundo informações do fabricante, a saída nominal diária de biogás é de até 700 L (Tabela 5).

Figura 9 - Biodigestores HomeBiogas™ instalados



Fonte: Acervo pessoal (2022).

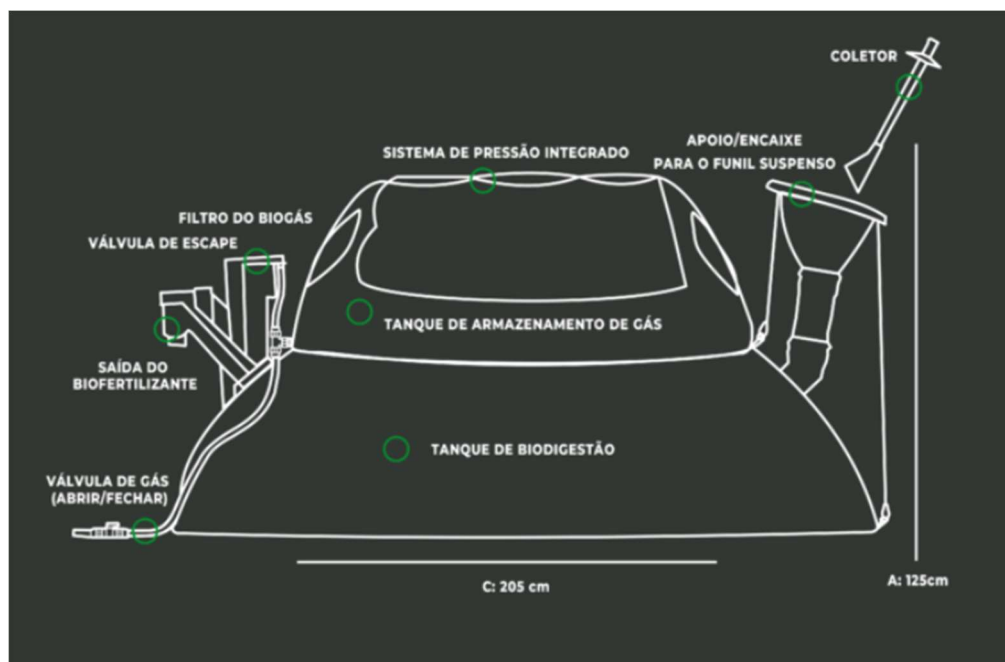
A estrutura do sistema é composta por um tanque de biodigestão, equipado com uma entrada para resíduos orgânicos por meio de um funil suspenso, e uma saída para o biofertilizante. Além disso, conta com um tanque de armazenamento de gás, que inclui um sistema de pressão, uma válvula de escape e um filtro para o biogás, com uma válvula para a saída do biogás pronto para uso (conforme representado na Figura 10). As especificações técnicas detalhadas estão disponíveis na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo de Características Técnicas – HomeBiogas 2.0

Itens	Valores
Dimensões da Caixa de Transporte	60 cm (comprimento) x 50 cm (largura) x 53 cm (altura)
Peso do sistema na Caixa	24 kg
Dimensões do sistema montado	210 cm (comprimento) x 115 cm (largura) x 125 cm (altura)
Peso aproximado do sistema montado	1.270 kg
Volume do tanque digestor	1.200 L
Volume do tanque de gás	700 L
Quantidade diária máxima de resíduos alimentares	Até 12 L
Quantidade diária máxima de esterco animal	Até 40 L
Pressão nominal do gás na saída do sistema	10 mbar
Quantidade diária típica de saída de energia	4,4 kWh
Quantidade de produção de fertilizante	o mesmo volume de resíduos orgânicos que entra no sistema
Temperatura ótima de desempenho	> 25°C
Temperatura boa de desempenho	> 20°C
Vida útil estimada	10 anos
Substituição do filtro de purificação do biogás	6 meses a 1 ano

Fonte: HomeBiogas™ (2021).

Figura 10 - Estrutura do Biodigestor HomeBiogas™ 2.0



Fonte: HomeBiogas (2023).

1.4.3 Abastecimento do biodigestor e caracterização dos produtos

Quando avaliado o abastecimento do biodigestor, sabe-se que diferentes fontes de abastecimento, apresentam potencial produtivo maiores ou menores de metano (Tabela 6).

Tabela 6 - Capacidade de produção de metano máxima

Matriz	Média B0 (m ³ CH ₄ kg sv ⁻¹)			
	IPCC	Hashimoto	Chen	Média
Suíno	0,29-0,48	-	0,32-0,52	0,41
Bovino de Corte	0,10-0,19	0,15-0,28	-	0,18
Bovino de leite	0,13-0,24	0,17-0,25	-	0,20

Fonte: IPCC (2006), Hashimoto (1981), Chen (1983), adaptado pela autora.

Quando alimentado com dejetos suínos, a produção de biogás sofre um aumento significativo comparando a dejetos bovinos, por exemplo, chegando a mais que o dobro da produção de metano em média. Essa produção de metano está ligada diretamente ao potencial de produção de energia.

Como forma de dimensionar o potencial de produção de energia do biogás, determinou-se o poder calorífico médio do dejetos antes de passar pelo processo de biodigestão (Tabela 7), durante o processo de biodigestão, as perdas nesse processo e o poder calorífico do biogás. O poder calorífico quantifica a energia liberada por unidade de massa ou volume durante a combustão completa de um material utilizado como combustível.

Tabela 7 - Poder calorífico médio (kJ kg⁻¹)

Referência	Fonte (Valor em kJ kg)		
	Matéria orgânica	Esterco Bovino	Esterco Suíno
Gomes <i>et al</i> 2017	14566	-	-
Komillis <i>et al</i> 2012	16316	-	-
Montejo <i>et al</i> 2011	14905	-	-
Santos <i>et al</i> 2012	-	16235	-
Oshiro 2015	-	13075	-
FontPalma 2019	-	13500	-
Fatobene <i>et al</i> 2021	-	-	11663
Sharara <i>et al</i> 2014	-	-	19300
Média	14905	13500	15481,5

Fonte: Gomes (2017), Komillis (2012), Montejo (2011), Santos (2012), Oshiro (2015), FontPalma (2019), Fatobene (2021), Sharara (2014), adaptado pela autora.

Segundo Octavianthy (2018), 58% do poder calorífico do dejetos é perdido no processo de biodigestão e, dos 42% do biogás, 65% desse poder é perdido na transformação para energia elétrica.

1.4.4 Caracterização do biogás

O biogás produzido pelo biodigestor HomeBiogas 2.0 foi caracterizado e quantificado por Gautam (2020) com o uso de um analisador de fluxo de gás do tipo Geotech biogás 5000. A composição mostrou um teor de metano de 58,1% e uma baixa concentração de H_2S de 40 ppm. Além disso, os teores de CO_2 , CO, NH_3 e O_2 também foram medidos de 37,1%, 0, 28 ppm e 11,7%, respectivamente. Diante desses valores, conclui-se que o sistema HomeBiogas 2.0 pode substituir 3.064 kg de GLP por mês.

Já Silva (2021), obteve um teor de metano de 65,44% com um teor de CO_2 de 38,55%. A qualidade do biogás está em conformidade com os padrões esperados e discutidos, atendendo aos níveis mínimos necessários para garantir seu potencial de geração de energia (Selvaraj, 2017; Deublein, 2011, Tasnim, 2017).

1.4.5 Estrutura utilizada: Motor-gerador modificado

Para aproveitar o biogás como combustível, ele é submetido a um sistema de filtragem conectado ao biodigestor. Este filtro, composto por carbono ativado, é responsável por remover o sulfeto de hidrogênio. De acordo com as instruções do fabricante, recomenda-se a substituição do filtro a cada seis meses a um ano (Tabela 5). No entanto, é importante observar que o filtro não elimina o dióxido de carbono, o que resulta em uma redução parcial do poder calorífico do biogás.

Para a projeção, foi escolhido um gerador comercial portátil, que opera com combustíveis fósseis convencionais, como gasolina. Com base na saída média diária de biogás, conforme identificado por Silva (2021), de 105,35 litros por dia, estima-se uma produção média diária de energia de 0,7 kWh. O modelo selecionado é o Gerador 1200 da marca Matsuyama (Tabela 8), que opera com gasolina e gera energia de forma monofásica. Este gerador é equipado com partida manual.

Tabela 8 - Resumo de Características Técnicas – Gerador Matsuyama

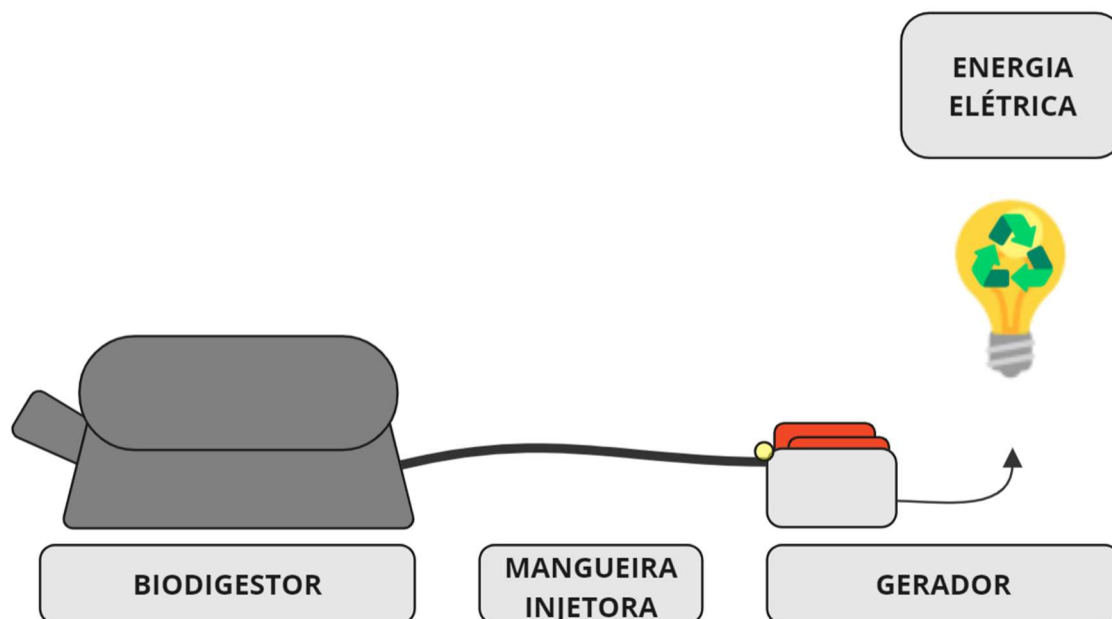
Itens	Valores
Tensão de saída	127V~ ou 220V~
Frequência	60 Hz
Potência de partida	1,2 KVA
Potência nominal	1,0 KVA
Corrente nominal	127V - 6,8 A / 220V - 3,4 A
Potência	2,5 HP
Carregador de bateria	12 V - 8,3 A
Partida	Partida manual
Dimensões	480 (mm) comprimento x 360 (mm) largura x 395 (mm) altura
Peso	27 kg
Vida útil estimada	17 anos

Fonte: Matsuyama™ (2024), adaptado pela autora.

Esse gerador passaria por pequenas adequações, como na injeção do biogás no grupo motor gerador, através de uma mangueira injetora específica, acoplando o gás diretamente no carburador (Almeida, 2012). O sistema de modificação dos motores apresenta várias gerações, sendo os mais recentes empregados em sistemas de injeção eletrônica multiponto, com um melhor controle das emissões de gases de efeito estufa.

Contudo, o grupo motor gerador proposto, por sua simplicidade, assemelha-se à estrutura dos motores automotivos mais antigos, caracterizados pela injeção monoponto não gerenciada (carburadores), nos quais o gás é aspirado de maneira fixa e constante (Costa, 2021), então, optou-se pelo sistema de 2ª geração acoplado a saída de biogás do biodigestor ao sistema motor-gerador.

Figura 11 - Esquema do sistema de produção de energia elétrica



Fonte: Elaborado pela autora.

1.5 VIABILIDADE FINANCEIRA

Na avaliação de viabilidade financeira foi utilizada a metodologia desenvolvida e descrita por Souza *et al.* (2004). Segundo Souza, o custo estará sempre associado ao capital investido durante a construção da planta, ou seja, o biodigestor e sua manutenção e o gerador e sua manutenção. Importante considerar que quanto menor for o tempo de operação, maior será o custo para a geração de energia elétrica e, por consequência, aumentará o tempo de retorno do investimento.

O biodigestor foi considerado sob condições adequadas de operação e manutenção. O “payback” do investimento foi avaliado nos cálculos de viabilidade de instalação do sistema.

Foi utilizada uma taxa de desconto de 8%, taxa usual de financiamento do governo federal nas atividades de produção agrícola. Os gastos com manutenção durante o ano, representam cerca de 4% do investimento total. Também foi levantado o valor da tarifa de energia elétrica local para obtermos o tempo de retorno do investimento.

A equação 1 apresenta o custo de produção de energia elétrica via biogás em função do custo anualizado do investimento no motor/gerador (CAG), do gasto anual

com biogás (CAB) e da produção de eletricidade pela planta de biogás (PE). Para transformar isso em uma equação, podemos utilizar uma abordagem simples de custo médio:

$$Ce = \frac{CAG + CAB}{PE} \quad (1)$$

Onde:

Ce é o custo de energia elétrica produzida via biogás (R\$/kWh)

CAG é o custo anualizado do investimento no motor/gerador (R\$/ano)

CAB é o gasto anual com biogás (R\$/ano)

PE é a produção de eletricidade pela planta de biogás (kWh/ano)

Essa equação representa o custo médio por quilowatt-hora (kWh) de energia elétrica produzida pela planta de biogás, considerando os custos de investimento e operacionais. Quanto menor for o valor de Ce , mais eficiente é a produção de energia elétrica via biogás.

A equação 2 apresenta a produção de eletricidade (PE) como o produto da potência nominal da planta (Pot) pela sua disponibilidade anual (T). Pode-se expressar isso em uma equação da seguinte forma:

$$Pe = Pot \times T \quad (2)$$

Onde:

PE é a produção de eletricidade (em kWh)

Pot é a potência nominal da planta (em kW)

T é a disponibilidade anual da planta (em horas/ano)

Essa equação multiplica a potência nominal da planta pela sua disponibilidade anual para determinar a quantidade total de eletricidade produzida. Quanto maior a potência da planta e mais tempo ela está disponível para operar, maior será a sua produção de eletricidade ao longo do ano.

A Equação 3 apresenta o cálculo do custo anualizado do investimento no motor/gerador (CAG) em função do custo do investimento no motor/gerador (CIG), do fator de recuperação de capital (FRC) e do custo com organização e manutenção (OM). Podemos expressar isso em uma equação da seguinte forma:

$$CAG = (CIG \times FRC) + (CIG \times \frac{OM}{100}) \quad (3)$$

Onde:

CAG é o custo anualizado do investimento no motor/gerador (R\$/ano)

CIG é o custo do investimento no motor/gerador (R\$)

FRC é o fator de recuperação de capital

OM é o custo com organização e manutenção (em porcentagem do custo do investimento, por ano)

Essa equação representa o custo anualizado do investimento no motor/gerador, levando em consideração o custo inicial do investimento, o fator de recuperação de capital e o custo com organização e manutenção ao longo do ano. O termo $CIG \times FRC$ representa a recuperação do capital investido ao longo do tempo, enquanto $CIG \times \frac{OM}{100}$ representa o custo anual com organização e manutenção.

A equação 4 apresenta o cálculo do gasto anual com biogás (*CAB*) em função do custo do biogás (*CB*) e do consumo de biogás pelo conjunto motor/gerador (*CNB*). Podemos expressar isso em uma equação da seguinte forma:

$$CAB = CB \times CNB \quad (4)$$

Onde:

CAB é o gasto anual com biogás (R\$/ano)

CB é o custo do biogás (R\$/m³)

CNB é o consumo de biogás pelo conjunto motor/gerador (m³/ano)

Essa equação multiplica o custo do biogás pelo seu consumo anual para determinar o gasto total com biogás ao longo do ano. Quanto maior o custo do biogás ou maior o consumo pelo conjunto motor/gerador, maior será o gasto anual com biogás. Essa é uma medida importante para entender o custo operacional da planta de biogás.

A equação 5 apresenta o cálculo do fator de recuperação de capital (*FRC*) em função da taxa de desconto (*j*) e do número de anos para a amortização do investimento (*n*). Podemos expressar isso em uma equação da seguinte forma:

$$FRC = \frac{(j \times (1+j)^n)}{(1+j)^n - 1} \quad (5)$$

Onde:

FRC é o fator de recuperação de capital

j é a taxa de desconto (em percentual por ano)

n é o número de anos para a amortização do investimento

Essa equação é usada para calcular o fator pelo qual um investimento inicial é multiplicado para determinar o valor total recuperado ao longo do tempo. O numerador calcula o valor presente do fluxo de caixa ao longo do período de amortização, enquanto o denominador é usado para descontar esse valor presente para a taxa de desconto. Quanto maior o valor de *FRC*, mais rápida é a recuperação do capital investido. Esse fator é útil para avaliar o retorno financeiro de projetos de investimento ao longo do tempo.

A equação 6 apresenta o cálculo do custo do biogás (*CB*) em função do custo anualizado do investimento no biodigestor (*CAiB*) e da produção anual de biogás (*PAB*). Podemos expressar isso em uma equação da seguinte forma:

$$CB = \frac{CAiB}{PAB} \quad (6)$$

Onde:

CB é o custo do biogás (R\$/m³)

CAiB é o custo anualizado do investimento no biodigestor (R\$/ano)

PAB é a produção anual de biogás (m³/ano)

Essa equação calcula o custo por metro cúbico de biogás produzido pela planta, dividindo o custo anualizado do investimento no biodigestor pela produção anual de biogás. Quanto maior o custo anualizado do investimento no biodigestor em relação à produção anual de biogás, maior será o custo por metro cúbico de biogás. Essa medida é importante para avaliar a viabilidade econômica da produção de biogás.

A equação 7 mostra o cálculo do custo anualizado do investimento no biodigestor (*CAiB*) em função do custo de investimento no biodigestor (*CIB*), do fator de recuperação de capital (*FRC*) e do custo com organização e manutenção (*OM*). Podemos expressar isso em uma equação da seguinte forma:

$$CAiB = (CIB \times FRC) + (CIB \times \frac{OM}{100}) \quad (7)$$

Onde:

CAiB é o custo anualizado do investimento no biodigestor (R\$/ano)

CIB é o custo de investimento no biodigestor (R\$)

FRC é o fator de recuperação de capital

OM é o custo com organização e manutenção (em percentagem do custo do investimento, por ano).

Essa equação calcula o custo anualizado do investimento no biodigestor, levando em consideração o custo inicial do investimento, o fator de recuperação de capital e o custo com organização e manutenção ao longo do ano. O termo $CIB \times FRC$ representa a recuperação do capital investido ao longo do tempo, enquanto $CIB \times \frac{OM}{100}$ representa o custo anual com organização e manutenção. Essa medida é essencial para entender o custo operacional associado ao investimento no biodigestor e para avaliar a viabilidade financeira do projeto.

A equação 8 expressa o gasto anual com energia elétrica adquirida na rede (A) como o produto do custo de investimento no sistema de biodigestor/motor e gerador (CI) pelo fator de recuperação de capital (FRC), adicionado aos gastos anuais de amortização e manutenção da planta (OM), ambos em percentagem do custo de investimento.

$$A = CI \times \left(FRC + \frac{OM}{100} \right) \quad (8)$$

Essa equação reflete o custo anual total associado à aquisição de energia elétrica da rede em um sistema que utiliza um biodigestor/motor e gerador. O termo FRC representa a parte do investimento que é recuperada anualmente ao longo do período de amortização, enquanto $\frac{OM}{100}$ representa os gastos anuais com a manutenção da planta, ambos proporcionais ao custo de investimento, permitindo uma avaliação detalhada dos custos anuais de operação do sistema, considerando não apenas a aquisição de energia elétrica, mas também os custos de investimento e manutenção associados à utilização do biodigestor/motor e gerador.

A equação 9 apresenta o cálculo do tempo de retorno de investimento (TRI) em anos, baseado no parâmetro de viabilidade econômica (k) e na taxa de desconto (j), dada por:

$$TRI = \frac{\ln\left(\frac{k}{j-k}\right)}{\ln(1+j)} \quad (9)$$

O tempo de retorno do investimento representa o período necessário para recuperar o investimento inicial realizado em um projeto, considerando a viabilidade

econômica e a taxa de desconto aplicada. O parâmetro k é uma medida da atratividade financeira do projeto, enquanto j é a taxa de desconto que reflete o custo de oportunidade do capital investido.

Essa equação permite uma avaliação precisa da atratividade financeira de um projeto. Um tempo de retorno menor indica que o investimento inicial é recuperado mais rapidamente, o que pode ser interpretado como uma maior atratividade do projeto. Por outro lado, um tempo de retorno mais longo sugere uma menor atratividade financeira ou um retorno mais demorado do investimento.

O parâmetro k (equação 10) pode ser entendido como uma medida de viabilidade econômica que avalia a capacidade de um sistema de biodigestor/motor e gerador em compensar os gastos anuais com energia elétrica adquirida na rede. Ele é calculado como a razão entre o gasto anual com energia elétrica (A) e o custo de investimento no sistema (CI), ajustado pelos gastos anuais de amortização e manutenção da planta (OM). A fórmula para k é:

$$k = \frac{A}{CI} - \frac{OM}{100} \quad (10)$$

O valor de k indica o quanto o investimento no sistema de biodigestor/motor e gerador é capaz de compensar os custos anuais de energia elétrica adquirida na rede, levando em conta os custos de manutenção. Um valor de k superior a 1 indica que o investimento é suficiente para cobrir completamente os custos de energia elétrica. Por outro lado, se k for inferior a 1, sugere que o investimento não é suficiente para cobrir completamente esses gastos.

Essa métrica é importante para avaliar a eficácia do sistema de biodigestor/motor e gerador na redução dos custos de energia elétrica e determinar sua viabilidade financeira. Com base nesses resultados foi determinada a viabilidade de instalação do sistema comparando com os sistemas convencionais já citados em diversos estudos.

1.6 ANÁLISE DE SWOT

A metodologia central empregada nesta etapa baseia-se na análise SWOT, uma ferramenta estratégica que permite a investigação de setores, temas e instituições. Esta análise é fundamentada em quatro pilares: forças e fraquezas, que se referem a fatores internos relacionados à problemática em questão, e oportunidades e ameaças, que dizem respeito a fatores externos sobre os quais há pouca ou nenhuma possibilidade de controle (Kotler, 2012).

A aplicação da análise SWOT facilita a identificação de pontos fortes e fracos, bem como oportunidades e ameaças, relativos a um setor ou caso específico (Tabela 9). Esse entendimento aprofundado torna mais fácil a adoção de atitudes sustentáveis, promovendo uma abordagem estratégica e consciente em relação aos desafios e potencialidades observados (Kotler, 2012).

Com base nessa análise foi examinado o uso de biodigestores na produção de biogás destinado à geração de energia elétrica. Com isso, é possível avaliar a viabilidade e a sustentabilidade dessa tecnologia no contexto energético atual, proporcionando uma visão estratégica sobre seu potencial de contribuição para a geração de energia limpa e renovável.

Tabela 9 - Modelo de Análise FOFA (SWOT)

Avaliação Interna	Avaliação Externa
Forças (Strenghts)	Oportunidades (Opportunities)
Fraquezas (Weakness)	Ameaças (Threats)

Fonte: Elaborado pela autora, adaptado de Kotler (2012).

1.7 ACV - ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

Na elaboração de produtos sustentáveis, é realizada uma seleção criteriosa dos materiais, levando em conta todas as fases do ciclo de vida envolvidas. Durante esse processo, certas etapas são identificadas como críticas e complexas devido ao seu potencial de impacto ambiental, como a extração e o refinamento dos materiais, o transporte utilizado, seu período de utilização e suas opções de reciclagem ou descarte (Boughanmi, 2012).

Avaliar o impacto ambiental resultante do uso desses produtos deve ser considerado tão decisivamente quanto os fatores econômicos e as demandas do mercado. Essa abordagem busca garantir que a sustentabilidade seja um elemento-chave na tomada de decisões relacionadas ao desenvolvimento e produção, levando em consideração os efeitos em todas as fases do ciclo de vida (Boughanmi, 2012).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia utilizada para avaliar o impacto ambiental de um produto ou serviço ao longo de todas as etapas do seu ciclo de vida. Isso inclui desde a extração de matérias-primas até o descarte ou reciclagem do produto. A ACV considera aspectos como o uso de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia, geração de resíduos e outros impactos ambientais. É uma ferramenta importante para identificar oportunidades de melhoria ambiental, orientar decisões de negócios e políticas públicas, e promover o desenvolvimento sustentável. Com base nos resultados da ACV, estratégias podem ser desenvolvidas para melhorar o desempenho ambiental dos produtos e serviços ao longo de todo o ciclo de vida. A ACV é composta por quatro fases: definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação do impacto e interpretação dos resultados, conforme estabelecido pela norma ISO 14040 (ABNT, 2010).

Na fase de definição do objetivo e escopo da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), estabelece-se o propósito da avaliação e o âmbito do estudo. O objetivo deve ser claro e específico, indicando os resultados esperados. O escopo define o sistema que será avaliado, incluindo seus limites, unidades funcionais, processos, e as entradas e saídas envolvidas.

Na etapa de análise do inventário da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), são coletados dados sobre as entradas e saídas do sistema avaliado, abrangendo a extração de matérias-primas, produção, transporte, uso e disposição final do produto

ou serviço. O objetivo é identificar e quantificar as entradas e saídas de energia, materiais e emissões de gases de efeito estufa em cada fase do ciclo de vida do produto ou serviço.

Na etapa de avaliação do impacto da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), os dados coletados na etapa anterior são analisados para avaliar o impacto ambiental do produto ou serviço em estudo. Os impactos ambientais avaliados podem incluir mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, uso de água, entre outros. O objetivo é compreender como o produto ou serviço afeta o meio ambiente ao longo de seu ciclo de vida.

Na etapa final da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), conhecida como interpretação dos resultados, os resultados obtidos são analisados e interpretados. O objetivo é identificar os principais impactos ambientais associados ao ciclo de vida do produto ou serviço avaliado, bem como identificar oportunidades de melhoria. Essa análise permite comparar os resultados com alternativas e serve como base para orientar decisões de negócios, políticas públicas e estratégias de desenvolvimento sustentável.

Diante das exigências em relação aos impactos e regulamentações ambientais, surge a necessidade de avaliar a sustentabilidade dos equipamentos disponíveis no mercado, o Ecodesign, utilizado para avaliar os efeitos de novas tecnologias. Com o intuito de realizar tais avaliações, a utilização do software CES Edupack (Cambridge Engineering Selector) surge como uma ferramenta que possibilita a seleção de materiais e demonstra, por meio de gráficos, suas características e restrições em relação ao projeto em questão (Asbjørn Sørensens; Jagtap; Warell, 2016).

Para a condução deste estudo, foi empregado o software Cambridge Engineering Selector Edupack, especificamente o módulo Eco Audit Tool (Granta Design, 2016). Essa ferramenta de seleção de materiais foi desenvolvida pela empresa Granta Design, fundamentada no trabalho de Michael Ashby e David Cebon (Granta Industrial Intelligence, 2017). Foram realizadas avaliações das propriedades físicas, químicas e mecânicas do sistema em estudo, bem como a quantificação de seu impacto ecológico. Consideramos os componentes da ficha técnica disponibilizada pela HomeBiogas (2021), para o biodigestor, e pela Matsuyama (2024), para o gerador. Dentre os aspectos analisados para determinar a sustentabilidade, destaca-se a avaliação do ciclo de vida (ACV), abrangendo desde

sua produção, logística e uso até sua disposição final.

A plataforma CES Edupack dispõe de uma extensa base de dados que provê informações sobre materiais, processos de produção e consumo energético, a fim de facilitar as avaliações necessárias. Essa análise visa atender aos requisitos da certificação ISO 14001 (ABNT, 2015), que estabelece um sistema padronizado de gestão ambiental, abordando de maneira estratégica, além do ciclo de vida dos produtos, questões relacionadas à logística reversa e à cadeia de valor.

1.8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.8.1 Resultados da avaliação financeira do sistema

Considerando os dados produtivos do biodigestor (Tabela 10) encontrados por Silva (2021), a estimativa diária de produção é de 0,7 kW/dia, mantendo o sistema em operação por uma hora. O custo do biodigestor representa cerca de R\$6716,66/suíno e o conjunto motor-gerador R\$2143,00/kW, seus dados produtivos estão na tabela 11. Considerando os dados de vida-útil do biodigestor fornecidos pela HomeBiogas (2022) e estimativas de ciclo de vida dos materiais, o tempo de amortização do investimento foi de 5, 10 e 15 anos, para comparação (Tabela 12).

Tabela 10 - Resumo de dados produtivos do biodigestor

Capacidade do biodigestor (m³)	Produção resíduo diária/suíno (m³)	Produção de biogás (m³/dia)	Custo total do biodigestor (R\$)
1,2	0,775	0,105	10.400,00

Fonte: HomeBiogas (2022), Souza (2004), Silva (2021), HomeBiogas (2024), adaptado pela autora.

Tabela 11 - Resumo de dados do motor-gerador

Estimativa diária da produção (kW)	Custo total do motor-gerador (R\$)
0,7	1.500,00

Fonte: Silva (2021), Kennedy (2024), adaptado pela autora.

Tabela 12 - Tempo de amortização

Anos	Custo do biogás (R\$/m³)	Custo da Eletricidade (R\$/kWh), 1 hora de operação
5	89,90	15,43
10	49,87	8,56
15	38,59	6,62

Fonte: Elaborado pela autora.

A análise da produção de energia elétrica por biogás no sistema em estudo demonstra a inviabilidade econômica dessa alternativa, quando comparada ao custo da energia fornecida pela concessionária no estado de São Paulo. Considerando os períodos de amortização, os resultados mostram que o custo de produção de energia elétrica por biogás é significativamente superior ao valor atual de R\$0,656/kWh praticado pela ANEEL.

Para um período de amortização de 5 anos, o custo de produção é de R\$15,43/kWh, o que representa um aumento de 2253,35% em relação ao custo da energia da concessionária. Em um período de 10 anos, o custo reduz para R\$8,56/kWh, ainda assim, resultando em um aumento de 1204,26%. Mesmo ao considerar uma amortização de 15 anos, nos limites de produção do sistema, o custo de produção permanece elevado, com um valor de R\$6,62/kWh, o que corresponde a um aumento de 910,67%.

Esses valores ilustram claramente que, apesar das potencialidades ambientais e sustentáveis do biogás, a produção de energia elétrica através desse sistema é economicamente inviável nas condições analisadas, devido ao elevado custo em comparação com a energia fornecida pela concessionária. Portanto, a adoção de biogás para geração de energia elétrica no contexto estudado não se mostra competitiva economicamente.

1.8.2. Resultados da Matriz SWOT - Análise do ambiente interno

Focando nas forças (Tabela 13) presentes nos biodigestores, além de poder gerar energia, os biodigestores ajudam na destinação correta de resíduos, contribuindo para a redução do impacto ambiental e promovendo uma gestão sustentável dos resíduos sólidos, proporcionando diversos benefícios socioambientais.

Tabela 13 - Forças

FORÇAS	
Aproveitamento dos resíduos para a geração de energia elétrica	1
Transformação dos resíduos em biofertilizante	2
Melhoria do saneamento através do uso do biodigestor	3
Geração de energia pode ter custo reduzido	4
Substituição do GLP: cocção de alimentos	5
Oportunidades de comercialização da eletricidade gerada	6
Redução de odores caso não haja destinação correta dos resíduos	7
Diminuição das emissões de metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂)	8
Potencial de obtenção de Créditos de Carbono	9

Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise das Fraquezas (Tabela 14), foram identificados problemas estruturais e de gestão que prejudicam a eficiência da atividade de biogás.

Tabela 14 – Fraquezas

FRAQUEZAS	
Dependendo do tamanho da planta, o valor é inviável	1
Aduos comerciais podem ter melhor relação custo-benefício que o biofertilizante	2
Biogás possui componentes corrosivos	3
Outras formas de geração de energia elétrica mais populares	4

Fonte: Elaborado pela autora.

1.8.3 Resultados da Matriz SWOT - Análise do ambiente externo

Pensando nos benefícios que a população pode obter ao utilizar esse sistema, enumeramos as oportunidades tanto em termos de impacto local quanto estrutural (Tabela 15).

Tabela 15 - Oportunidades

OPORTUNIDADES	
Política Nacional dos Resíduos Sólidos incentiva o uso de biodigestores	1
Incentivos governamentais (isenção de taxas)	2
Valorização de tecnologias sustentáveis/renováveis	3
Opções de subsídios bancários e governamentais	4

Fonte: Elaborado pela autora.

Considerando as ameaças desse sistema, a mão de obra especializada é um dos principais gargalos (Tabela 16). As manutenções, preventivos e monitoramento precisam ser padronizadas e seguidas, a fim de evitar gastos desnecessários.

Tabela 16 - Ameaças

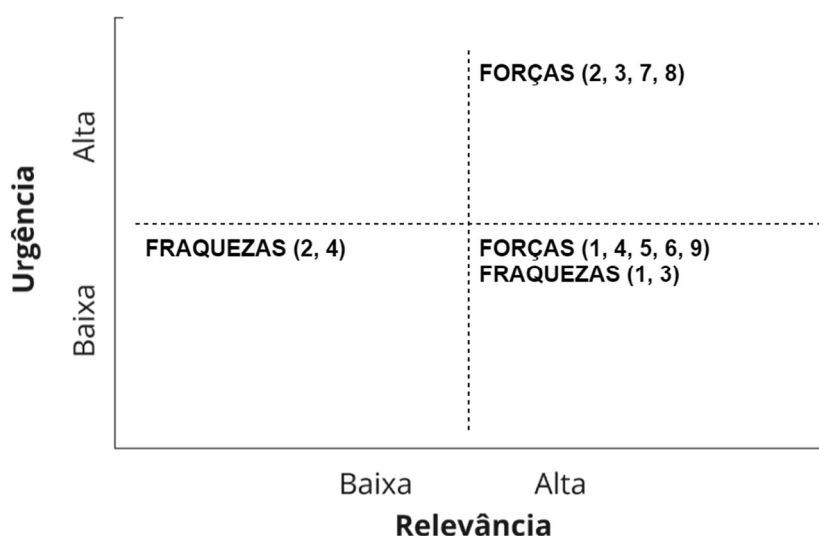
AMEAÇAS	
Mão de obra especializada difícil de encontrar	1
Custos altos do sistema	2
Regulamentação específica	3

Fonte: Elaborado pela autora.

1.8.4 Identificação dos pontos focais para o planejamento estratégico

Dado o levantamento feito pela análise de SWOT, foi montado o quadro de pontos focais, separando os resultados de acordo com sua urgência e relevância (Figura 12).

Figura 12 - Pontos Focais



Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se citar como pontos focais com alta urgência e alta relevância: a transformação dos resíduos em biofertilizantes e a melhoria do saneamento através do uso do biodigestor, sendo uma destinação correta de resíduos, reduzindo potencialmente os riscos de contaminação do solo e lençóis freáticos; mitigar odores decorrentes da deposição inadequada de resíduos, melhorando assim a qualidade de vida dos moradores da região; a diminuição das emissões de metano e de dióxido de carbono, gases que proporcionam o efeito estufa.

Os pontos focais de alta relevância, mas com baixa urgência, são as forças: aproveitamento de resíduos para a geração de energia elétrica; geração de energia com chances de custo reduzido (quando comparada às fontes convencionais); substituição do gás de cozinha tradicional, o GLP, pelo biogás, uma alternativa renovável, utilizando-o para a cocção de alimentos; potencial de obtenção de créditos de carbono.

As fraquezas de alta relevância e baixa urgência são: alto valor de instalação do sistema, o planejamento deve ser feito para se ter precisão nos gastos e evitar a criação de uma dívida, dependendo do tamanho da planta esse uso torna-se inviável; compostos do biogás que tem potencial corrosivo, esses compostos podem corroer os componentes do sistema por onde esse gás passa, daí a importância de fazer a filtragem do gás para proteger as estruturas envolvidas no processo.

Por último, tem-se os pontos focais de baixa relevância e baixa urgência, representados pelas fraquezas: adubos comerciais com melhor custo-benefício que o biofertilizante, para contornar essa situação devemos olhar o todo, o biofertilizante é um dos subprodutos, mas considerando todos, o sistema torna-se mais sustentável, sua qualidade vai depender dos insumos colocados no biodigestor, algo que também pode ser alterado com a intenção de melhorar a qualidade do adubo; outras formas de geração de energia elétrica mais populares, aqui entra a necessidade da divulgação do sistema, do apoio governamental e dos incentivos financeiros, todas essas medidas associadas a uma boa divulgação podem melhorar a realidade dos biodigestores espalhados pelo país e todo o potencial de expansão.

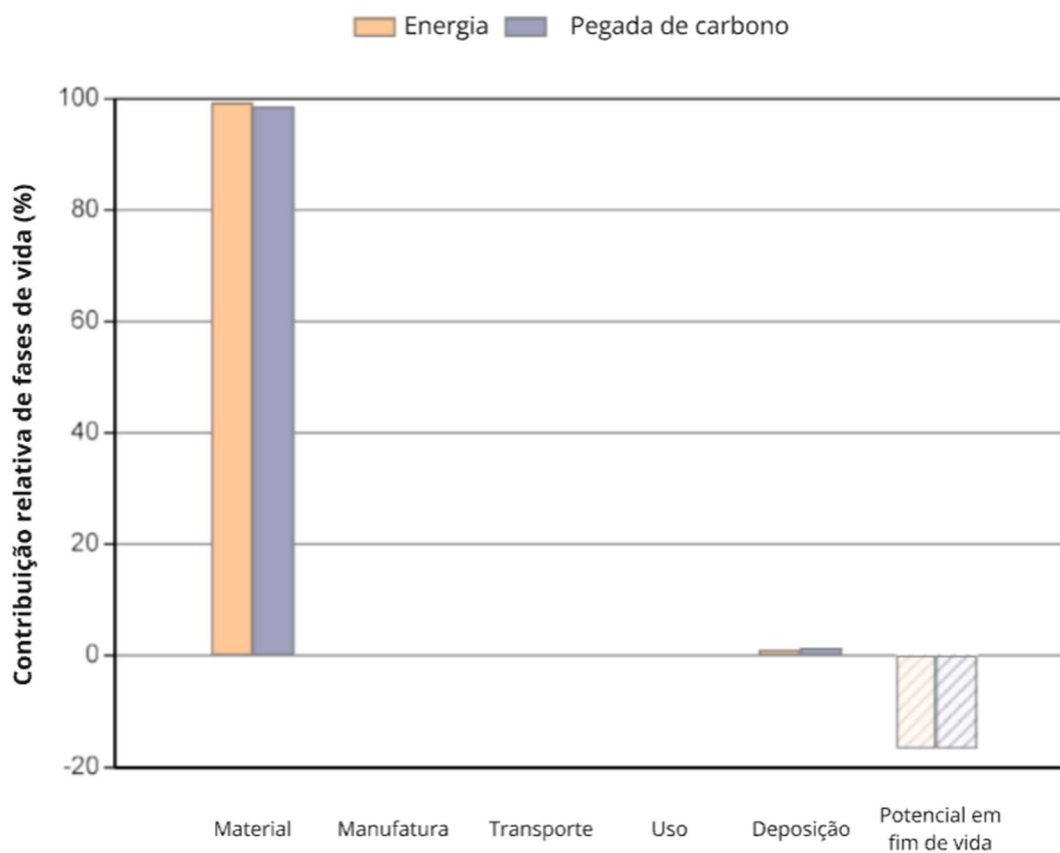
Esse mapeamento detalhado através da análise SWOT fornece uma base sólida para a implementação estratégica de soluções sustentáveis, destacando tanto os desafios a serem enfrentados, quanto às oportunidades significativas para o avanço e desenvolvimento sustentável na área de gestão de resíduos e energia

renovável.

1.8.5. Resultados da ACV do biodigestor

Com o auxílio do software CES EduPack, os dados dos componentes do biodigestor foram listados e inseridos no sistema para as análises. Nas figuras 13, 14, 15, 16 e 17 estão os resultados encontrados.

Figura 13 - Pegada de carbono e consumo de energia do biodigestor (gráfico)

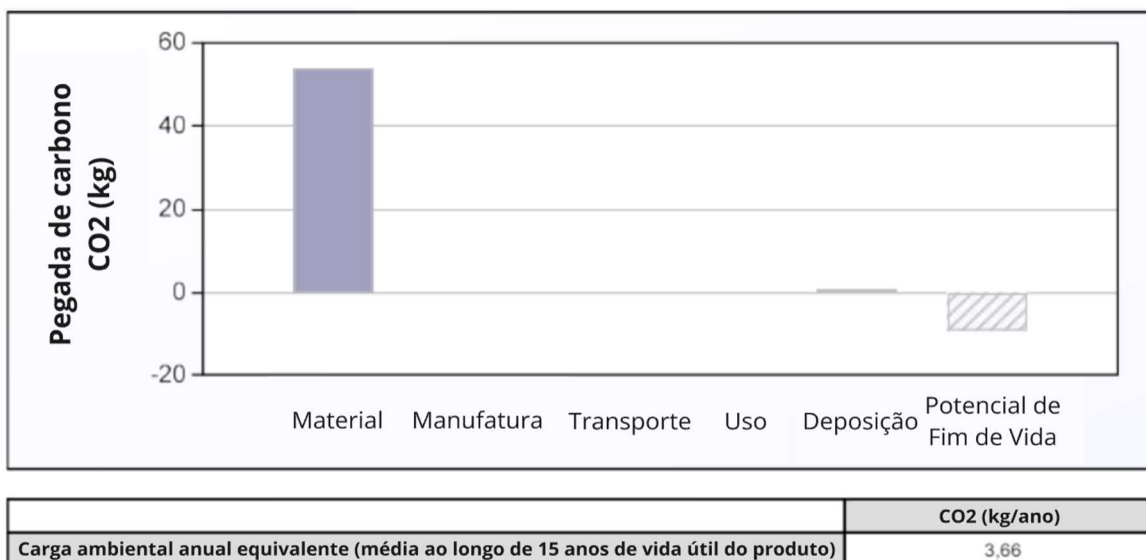


Fonte: CES EduPack

Figura 14 - Pegada de carbono e consumo de energia do biodigestor (dados)

Fase	Energia (J)	Energia (%)	Pegada de Carbono (kg)	Pegada de Carbono (%)
Material	1,28e+09	99,2	54,1	98,6
Manufatura	0	0,0	0	0,0
Transporte	0	0,0	0	0,0
Uso	0	0,0	0	0,0
Deposição	1,07e+07	0,8	0,749	1,4
Total (para a primeira vida)	1,29e+09	100	54,8	100
Potencial ao final da vida	-2,14e+08		-9,07	

Fonte: CES EduPack

Figura 15 - Pegada de carbono do biodigestor (gráfico)

Fonte: CES EduPack

Figura 16 - Componentes do biodigestor (dados)

Componente	Material	Conteúdo Reciclado (%)	Massa da Peça (kg)	Qtdd.	Massa total processada (kg)	Pegada de Carbono (kg)	%
Lona do biodigestor	PVC: 20% fibra de vidro, moldagem	Virgem (0%)	20	1	20	47	87,7
Funil suspenso e válvulas	PP: copolímero de impacto baixa fluidez	Virgem (0%)	2	1	2	6,6	12,3
Total				2	22	54	100

Fonte: CES EduPack

Figura 17 - Potencial de reciclagem ou destinação itens do biodigestor (dados)

Componente	Opção de Fim de Vida	% Reciclada	Pegada de Carbono (kg)	%
Lona do biodigestor	Reciclagem Descendente	90,0	0,66	87,9
Funil suspenso e válvulas	Reciclagem	90,0	0,091	12,1
Total			0,75	100

Fonte: CES EduPack

O biodigestor HomeBiogas tem o maior consumo energético na fase de obtenção do seu material. Como ele é composto basicamente pela lona plástica de PVC e seus componentes de polipropileno, há um consumo maior de energia em sua origem. Ao final de seu ciclo de vida estima-se que 90% dos componentes do sistema sejam reciclados, nesse momento também há um pequeno consumo energético.

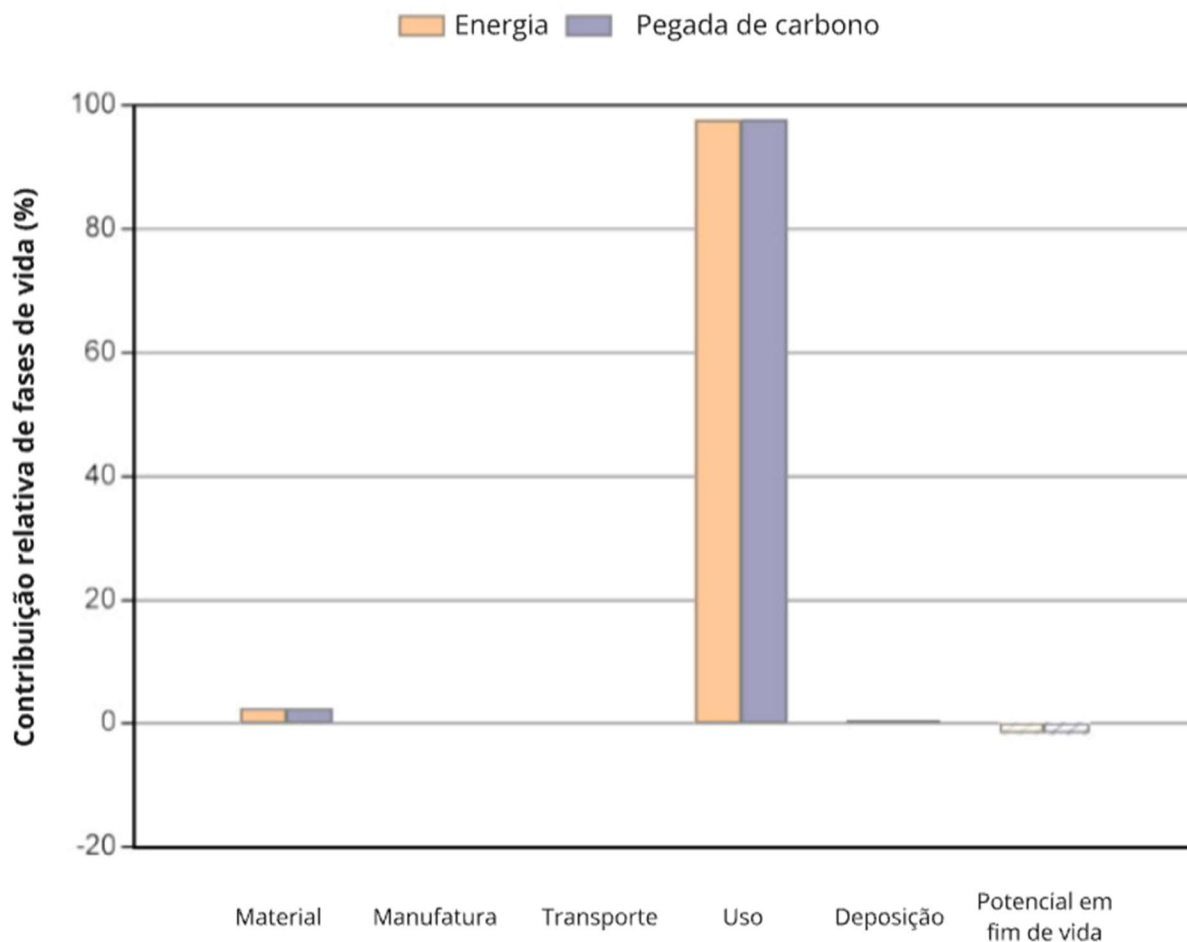
Em relação à pegada de carbono o comportamento se repete, a maior parte das emissões são durante a obtenção do seu material e o total, durante todo o ciclo

de vida do biodigestor, em quilos, estimado é de 54,8kg.

1.8.6 Resultados da ACV do gerador em uso convencional

Os dados dos componentes do grupo motor gerador foram listados e inseridos no sistema para as análises. Nas figuras 18, 19, 20, 21 e 22 estão os resultados encontrados.

Figura 18 - Pegada de carbono e consumo de energia do motor-gerador



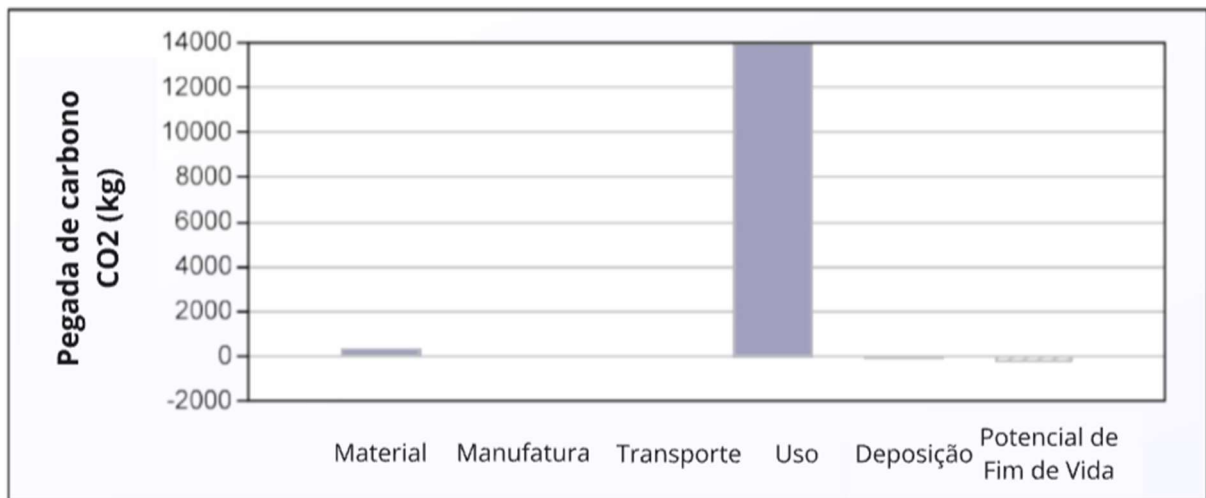
Fonte: CES EduPack

Figura 19 - Pegada de carbono e consumo de energia do motor gerador (dados)

Fase	Energia (J)	Energia (%)	Pegada de Carbono (kg)	Pegada de Carbono (%)
Material	4,66e+09	2,3	337	2,4
Manufatura	0	0,0	0	0,0
Transporte	0	0,0	0	0,0
Uso	1,97e+11	97,7	1,4e+04	97,6
Deposição	5,64e+07	0,0	3,94	0,0
Total (para a primeira vida)	2,01e+11	100	1,43e+04	100
Potencial ao final da vida	-3,27e+09		-231	

Fonte: CES EduPack

Figura 20 - Pegada de carbono do motor gerador (gráfico)



	CO2 (kg/ano)
Carga ambiental anual equivalente (média ao longo de 15 anos de vida útil do produto)	842

Fonte: CES EduPack

Figura 21 - Componentes do motor gerador (dados)

Componente	Material	Conteúdo Reciclado (%)	Massa da Peça (kg)	Qtdd.	Massa total processada (kg)	Pegada de Carbono (kg)	%
CARCAÇA DO MOTOR À COMBUSTÃO	Ferro fundido austenítico (nodular), EN GJSA XNiSiCr30 5 5	Virgem (0%)	35	1	35	1,8e+02	54,0
PISTÃO E VIRABREQUIM	Aço de baixa liga, SAE 4335M, fundido, temperado e revenido	Virgem (0%)	15	1	15	36	10,5
NÚCLEOS MAGNÉTICOS DO GERADOR	Liga magnética macia, 2,5% Si-Fe, de fácil usinagem	Virgem (0%)	20	1	20	48	14,1
EIXO DO GERADOR	Aço carbono, AISI 1020, normalizado	Virgem (0%)	1	1	1	2,4	0,7
BOBINAS DO GERADOR	Cobre, C14200, macio (cobre desoxidado com fósforo e arsenical)	Virgem (0%)	4	1	4	14	4,3
TAMPAS DO GERADOR	Alumínio, 332.0, fundido em molde permanente, temperado T5	Virgem (0%)	2	1	2	24	7,0
BATERIA	Bateria de chumbo-ácido para carros	Virgem (0%)	12	1	12	17	5,1
ESTRUTURA	Aço carbono, AISI 1010, termicamente tratado	Virgem (0%)	6	1	6	14	4,2
Total				8	95	3,4e+02	100

Fonte: CES EduPack

Figura 22 - Potencial de reciclagem ou destinação do motor gerador

Componente	Opção de Fim de Vida	% Reciclada	Pegada de Carbono (kg)	%
CARCAÇA DO MOTOR À COMBUSTÃO	Reciclagem	90,0	1,6	40,4
PISTÃO E VIRABREQUIM	Reciclagem	90,0	0,68	17,3
NÚCLEOS MAGNÉTICOS DO GERADOR	Reciclagem	90,0	0,91	23,1
EIXO DO GERADOR	Reciclagem	90,0	0,046	1,2
BOBINAS DO GERADOR	Reciclagem	90,0	0,18	4,6
TAMPAS DO GERADOR	Reciclagem	90,0	0,091	2,3
BATERIA	Remanufatura	100,0	0,17	4,3
ESTRUTURA	Reciclagem	90,0	0,27	6,9
Total			3,9	100

Fonte: CES EduPack

O grupo motor-gerador tem o maior consumo energético na sua fase de uso, cerca de 97% se concentra nessa fase, seguido pela obtenção do seu material, 3%. Ao final de seu ciclo de vida estima-se que 90% dos componentes do sistema sejam reciclados ou remanufaturados, nesse momento também há um pequeno consumo energético.

Em relação à pegada de carbono o comportamento se repete, a maior parte das emissões são durante o seu uso e o total, por ano, em quilos, é de 842 kg.

1.8.7 Sintetização dos Resultados

A análise econômica da produção de energia elétrica por biogás no sistema estudado revela sua inviabilidade financeira, especialmente quando comparada ao custo da energia fornecida pela concessionária no estado de São Paulo. De acordo com os dados, o custo atual da energia elétrica, conforme estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), é de R\$0,656/kWh. No entanto, a produção de energia elétrica por biogás apresenta custos significativamente superiores.

Esses dados indicam claramente que, apesar dos benefícios ambientais e sustentáveis associados ao biogás, a produção de energia elétrica por meio deste sistema não é economicamente viável nas condições analisadas. A alta diferença de custo, mesmo em períodos de amortização mais longos, sugere que essa abordagem

não é competitiva em termos financeiros comparada à energia fornecida pela concessionária.

A análise SWOT identificou diversos pontos focais críticos. Entre os pontos de alta urgência e relevância, destacam-se a transformação de resíduos em biofertilizantes e a melhoria do saneamento através do uso de biodigestores. Essas práticas são essenciais para a correta destinação dos resíduos, potencialmente reduzindo os riscos de contaminação do solo e dos lençóis freáticos. Adicionalmente, a mitigação dos odores decorrentes da deposição inadequada de resíduos melhora significativamente a qualidade de vida dos moradores da região. Outro benefício ambiental significativo é a redução das emissões de metano e dióxido de carbono, gases que contribuem para o efeito estufa.

Em termos de relevância, mas com menor urgência, o aproveitamento de resíduos para a geração de energia elétrica aparece como uma oportunidade, apesar dos desafios econômicos previamente discutidos. A geração de energia por biogás oferece a vantagem de um custo potencialmente reduzido em comparação às fontes convencionais e abre a possibilidade de obtenção de créditos de carbono, incentivando práticas mais sustentáveis. A substituição do gás de cozinha tradicional, o GLP, pelo biogás também é uma alternativa renovável viável, embora economicamente desafiante nas condições atuais.

No entanto, o sistema apresenta fraquezas significativas. O alto valor de instalação inicial dos biodigestores e sistemas de produção de biogás é um obstáculo considerável, exigindo planejamento financeiro detalhado para evitar endividamento, especialmente em plantas de maior porte. Além disso, a presença de compostos corrosivos no biogás demanda sistemas de filtragem eficientes para proteger as estruturas envolvidas no processo, aumentando ainda mais os custos operacionais.

1.9 CONCLUSÃO

Os resultados indicam que, sob as condições analisadas, a produção de energia elétrica por biogás é economicamente inviável quando comparada ao custo da energia fornecida pela concessionária. Mesmo com os períodos de amortização mais longos, os custos permanecem substancialmente elevados, tornando esta alternativa não competitiva em termos financeiros. Apesar disso, os benefícios ambientais e sustentáveis do uso de biogás não podem ser ignorados.

A transformação de resíduos em biofertilizantes e a melhoria do saneamento com biodigestores continuam sendo estratégias cruciais para a gestão sustentável de resíduos, contribuindo significativamente para a proteção ambiental e a melhoria da qualidade de vida. Contudo, a viabilidade econômica dessas soluções depende de um planejamento financeiro cuidadoso e de inovações tecnológicas que possam reduzir os custos iniciais e operacionais.

Enquanto a geração de energia elétrica por biogás não se mostra competitiva atualmente, outros usos do biogás, como a substituição do GLP e a obtenção de créditos de carbono, ainda apresentam oportunidades viáveis. Para maximizar os benefícios e superar as fraquezas identificadas, é essencial um enfoque estratégico que inclua apoio governamental, incentivos financeiros e uma maior divulgação dos benefícios ambientais e econômicos potenciais dos biodigestores.

A análise da instalação de um sistema de produção de energia elétrica a partir do biogás de biodigestão deve considerar a disponibilidade de mão de obra qualificada, a frequência e o custo das manutenções, bem como os investimentos financeiros necessários. A dificuldade de encontrar profissionais qualificados para operar e manter esses sistemas é um fator crítico para sua viabilidade. Além disso, a manutenção regular e adequada é essencial para garantir a eficiência e a longevidade do sistema, o que pode implicar em custos adicionais e necessidade de treinamento especializado.

A viabilidade do uso de sistemas de produção de biogás em pequena escala, especialmente por famílias de baixa renda, também deve ser avaliada. O custo inicial de instalação pode ser proibitivo, programas de subsídios governamentais e financiamentos acessíveis podem tornar essa tecnologia mais viável para esses grupos. A utilização de biogás em pequena escala pode proporcionar benefícios

significativos com a melhoria das condições de saneamento, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, mas mostrou-se inviável para a produção de energia elétrica.

Em termos de sustentabilidade, o uso de ferramentas como o Cambridge Engineering Selector Edupack e a avaliação do ciclo de vida (ACV) proporcionam insights valiosos sobre o impacto ecológico e a eficiência energética dos sistemas. A análise detalhada do biodigestor HomeBiogas e do grupo motor-gerador destaca a necessidade de considerar todo o ciclo de vida dos produtos, desde a obtenção de materiais até a disposição final, para uma avaliação precisa de sua sustentabilidade ambiental.

O desenvolvimento de tecnologias de biogás está diretamente ligado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, especialmente no que se refere à energia limpa e acessível (ODS 7), saneamento adequado (ODS 6), e ações contra a mudança global do clima (ODS 13). A promoção e implementação de sistemas de biogás contribuem para a transição para uma economia de baixo carbono, melhorando a gestão de resíduos e promovendo a inclusão social através do acesso a tecnologias sustentáveis.

Assim, conclui-se que, embora a produção de energia elétrica por biogás não seja viável economicamente nas condições avaliadas, a integração de biogás em outras aplicações e a adoção de uma abordagem estratégica podem promover a sustentabilidade e a eficiência na gestão de resíduos e energia renovável. Através de apoio governamental, incentivos financeiros e uma maior divulgação dos benefícios ambientais e econômicos potenciais dos biodigestores, é possível avançar significativamente na adoção de tecnologias sustentáveis alinhadas aos ODS da Agenda 2030.

REFERÊNCIAS

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em: <https://www.abrema.org.br/download/90934/?tmstv=1714748373>. Acesso em: abr. 2024.

ALMEIDA, S. C. A., NIRENBERG, H., BELCHIOR, C. R. P. Adaptações no motor para operar com biogás. CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7 (CONEM), 2012, **Anais** [...] ABCM, 2012. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-0701.pdf> Acesso em: 28 abr. 2024.

ANDRADE, M. A. N.; RANZI, T. J. D.; MUNIZ, R. N. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. *In: Anais do 4º Encontro de Energia no Meio Rural*. Campinas, SP, 2002. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000100030&lng=pt&nrm=iso Acesso em: abr. 2024.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ASBJØRN SÖRENSEN, C.; JAGTAP, S.; WARELL, A. Material selection in industrial design education—a literature review. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND PRODUCT DESIGN EDUCATION*, Aalborg University, Denmark. Institution of Engineering Designers, 2016. p. 708-713.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040:2010**: Gestão ambiental, Avaliação do ciclo de vida, Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001:2015**: Sistemas de gestão ambiental, Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

BARICHELLO, R.; HOFFMANN, R.; DA SILVA, S. O. C.; DEIMLING, M. F.; CASAROTTO FILHO, N. O uso de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região Noroeste do Rio Grande do Sul. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 8, n. 2, p. 333-355, 2015.

BESSEN, G.R.; GÜNTHER, W. M. R.; RODRIGUES, A.C.; BRASIL, A.L. **Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas: a insustentabilidade da geração excessiva de resíduos sólidos**. Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles. Tradução. São Paulo: Ex-Libris, 2010. Acesso em: 28 abr. 2024.

BORSCHIVER, S.; DA SILVA, A. L. R. **Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais.** In: Congresso Brasileiro De Engenharia Química. v. 20, p. 8757-8765, 2014

BOUGHANMI, W.; MANATA, J. P.; ROGER, D.; JACQ, T.; STREIFF, F. Life cycle assessment of a three-phase electrical machine in continuous operation. **IET electric power applications**, v. 6, n. 5, p. 277-285, 2012.

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

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF: 8 jan. 1997.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e para a política federal de saneamento básico. Diário Oficial da União, Brasília, DF: 8 jan. 2007.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução normativa nº 64**, de 18 de dezembro de 2008. Brasília, DF, 2008.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Diário Oficial da União, Brasília, DF: 30 dez. 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF: 3 ago. 2010. Seção 1, p. 1.

BRASIL. **Portaria nº 290, de 7 de Julho de 2021.** Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo – Consolidado. 02 de agosto de 2021.

CAMARGO, E.; RIBEIRO, F. S.; GUERRA, S. M. G. O programa Luz para Todos: metas e resultados. **Espaço Energia**, v. 9, p. 21-24, 2008.

CARVALHO, E. S.; NESKE, D. A. L.; SALZER, E.; JOHANN, J. A. **Viabilidade e benefícios de implantação de pequenos biodigestores em propriedades de agricultura familiar.** VI Simpósio Internacional De Gestão De Projetos, Inovação e Sustentabilidade - VI SINGEP, 2017.

CHEN, Y. R. Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications. **Agricultural Wastes**, v. 8, n. 2, p. 65-81, 1983. Acesso em: abr. 2024.

COLATTO, L.; LANGER, M. Biodigestor–resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unesc & Ciência-ACET**, v. 2, n. 2, p. 119-128, 2012.

COSTA, B.N.; GUARDIA, L. G. P. Conversão de um motor de ciclo otto para uso de gás natural ou BIOGÁS. **Monografia do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Mackenzie**, v. 73, 2021.

COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. **Dissertação (Mestrado)** – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DALY, H. E. Desenvolvimento sustentável: definições, princípios, políticas. **Cadernos de estudos sociais**, v. 18, n. 2, 2002.

DE MEDEIROS, M. B.; DA SILVA LOPES, J. **Biofertilizantes líquidos e sustentabilidade agrícola**. Bahia Agrícola. Salvador, BA, v. 7, 2006.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from waste and renewable resources: an introduction**. John Wiley & Sons, 2011.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica> Acesso em: 03 jan. 2024

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben> Acesso em: 10 dez. 2023

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Expansão de energia 2031**. Ministério de Minas e Energia. Brasília - DF, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf 2022. Acesso em 20 de mai de 2024.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BEN) 2022**: Ano base 2021. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf Acesso em: 20 abr. 2024.

FARUK, O.; BLEDZKI, A. K.; FINK, H. P.; SAIN, M. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. **Progress in polymer science**, v. 37, n. 11, p. 1552-1596, 2012.

FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; SANCHÉZ-ROMÁN, R. M. Atualização Da Normal Climatológica E Classificação Climática De Köppen Para O Município De Botucatu-Sp. **IRRIGA**, v. 28, n. 1, p. 77-92, 2023.

GAUTAM, B.; JHA, A. K. Performance analysis of homebiogas and comparison with modified GGC-2047 model biogas plant. **Artech Journal Effective Research in Engineering and Technology (AJERET)**, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2020. Disponível em: https://artechjournals.com/uploads/documents/file_317_60.pdf Acesso em: 18 mai. 2024.

GERON, V. L. O uso do biogás no âmbito rural como proposta de desenvolvimento sustentável. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, v. 5, n.1, p. 140-149, 2014. Acesso em: 10 mai. 2024.

GEHRING, C. G. **Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbia de vinhaça**. Trabalho de Conclusão de Curso. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação. São Carlos, 2014.

GOMES, J. P. P.; VIEIRA, M. M. F. O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002. **Revista de Administração Pública**, v. 43, p. 295-321, 2009.

GRANTA DESIGN. **Eco Audit Tool**. Disponível em: <https://www.grantadesign.com/products/ecoaudit/>. Acesso em dez. 2023.

GRANTA INDUSTRIAL INTELLIGENCE. **What is CES EduPack?** 2017. Disponível em: <http://www.grantadesign.com/education/edupack/>. Acesso em dez. 2023.

GRISA, D. C.; CAPANEMA, L. X. de L. Resíduos sólidos. In: PUGA, F. P.; CASTRO, L. B. de (org.). **Visão 2035: Brasil, país desenvolvido: agendas setoriais para alcance da meta**. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018. p. 415-438.

GRUPEL (Brasil). **O que é um grupo gerador**. 2018. Disponível em: <https://grupel.eu/grupel/grupo-gerador/> Acesso em: 10 mar. 2024.

GRUPO WEG (2019). **Guia de Especificação: Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul.

GRYSCHKE, J.M.; BELO, F. R. **Produção e uso do gás metano na agricultura e agroindústria**. ESALQ, Piracicaba, SP, 1983.

HART, S. L.; MILSTEIN, M. B. Criando valor sustentável. **RAE executivo**, v. 3, n. 2, p. 65-79, 2004. Disponível em: <https://rae.fgv.br/gv-executivo/vol3-num2-2004/criando-valor-sustentavel>. Acesso em: 18 mai. 2024.

HASHIMOTO, A. G.; CHEN, Y. R.; VAREL, V. H. Anaerobic fermentation of beef cattle manure. **Solar Energy Research Institute**, 1981.

HomeBiogas - **Biomovement**. Disponível em: <https://homebiogas.com.br/> Acesso em: nov. 2022.

HomeBiogas - Technical Specifications - **Biomovement**. 2021. Disponível em: https://www.homebiogas.com/wp-content/uploads/2021/03/HB2GF_0321_print_v2.pdf Acesso em: nov. 2022.

HomeBiogas - Biodigestor Autônomo - **Biomovement**. 2024. Disponível em: <https://www.homebiogas.com.br/product-page/homebiogas-2-0-biodigestor-autonomo> Acesso em: abr. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **ODS – Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria n.º 488, de 08 de dezembro de 2010**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br>. Acesso em: jan. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2023**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <http://www.iea.org>. Acesso em: fev. 2024.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change. Emissions from livestock and manure management. **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use**, v. 4, p. 76-81, 2006.

JACOBI, P. R., BESEN, G. R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos avançados**, v. 25, p. 135-158, 2011.

KOTLER, P., & KELLER, K. L. **Administração de Marketing**. Tradução de Sônia Midori Yamamoto. Revisão técnica Edson Crescitelli, 2012.

KUNZ, A.; OTENIO, M. H.; LEITÃO, R. C.; GAMBETTA, R. **Energia limpa e acessível: contribuições da Embrapa**, 2018.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. 2ª ed. rev - Concórdia - SC, Sbera, **Embrapa suínos e aves** - ISBN 978-65-88155-02-8, p. 211, 2022.

KURAHASSI, L. F. **A eletrificação rural em São Paulo: custos e padrões**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

KRONEMBERGER, D. M. P. Os desafios da construção dos indicadores ODS globais. **Ciência e cultura**, v. 71, n. 1, p. 40-45, 2019.

LEÃO, R. A Agenda 2030 das Nações Unidas e as energias renováveis no Brasil. **Radar: tecnologia, produção e comércio exterior**, n. 60, p. 7-11, ago. 2019.

LJUNGBERG, LENNART Y. Materials selection and design for development of sustainable products. **Materials & Design**, v. 28, n. 2, p. 466-479, 2007.

MACHADO, L. T. S.; LEROY, K. A.; OLIVEIRA, K. S. M.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Caracterização De Digestato De Resíduos Orgânicos Residenciais E Viabilidade De Uso Na Agricultura Irrigada. **Irriga**, v. 28, n. 1, p. 48-59, 2023.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás**: um projeto de saneamento urbano. Editora Nobel, 1986.

MAINIER, F. B.; SANDRES, G. C.; TAVARES, S. S. M. (2007) **Corrosão por sulfeto de hidrogênio (H₂S) e suas implicações no meio ambiente e na segurança industrial**. In: 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. Cuzco, Peru.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2017.

MATSUYAMA MÁQUINAS E MOTORES **Manual de instruções**. (2024) - Disponível em: <https://www.matsuyama.ind.br/> Acesso em: abr. 2024.

MATTOS, L. M.; MORETTI, C. L.; DE MOURA, M. A.; MALDONADE, I. R.; SILVA, E. Y. Y. D. Produção segura e rastreabilidade de hortaliças. **Horticultura Brasileira**, v. 27, p. 408-413, 2009.

MATTOS, M. L. T.; CANTILLANO, R.F.F. Capítulo 20: Segurança Alimentar e Ambiental. In: ANTUNES, L. E. C.; REISSER JÚNIOR, C.; SCHWENGBER, J. E. (orgs.). **Morangueiro**. 1. ed. Brasília: Embrapa, p. 537-562, 2016.

MEDEIROS, M. B. de; WANDERLEY, P. A.; WANDERLEY, M. J. A. **Biofertilizantes líquidos: processo trofobiótico para proteção de plantas em cultivos orgânicos**. Biotecnologia: Ciência e Desenvolvimento, v. 31, p. 38-44, 2003.

NAJA, G. M.; ALARY, R.; BAJEAT, P.; BELLENFANT, G.; GODON, J. J.; JAEG, J. P.; KECK, G.; LATTES, A.; LEROUX, C.; MODELON, H.; MOLETTA-DENAT, M.; RAMALHO, O.; ROUSSELLE, C.; WENISCH, S.; ZDANEVITCH, I. Assessment of biogas potential hazards. **Renewable energy**, v. 36, n. 12, p. 3445-3451, 2011.

NAHAS, M. I. P.; PEREIRA, M. A. M.; ESTEVES, O. A.; GONÇALVES, E. Metodologia de construção do Índice de Qualidade de Vida Urbana dos municípios brasileiros (IQVU-BR). In: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais da Associação Brasileira de Estudos Populacionais., 2006, Caxambu, MG. **XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais da Associação Brasileira de Estudos Populacionais**. Campinas: ABEP, 2006.

OCTAVIANTHY, D.; PURWANTO, W. W. Designing smart energy system for smart city through municipal solid waste to electricity: techno-economic analysis. In: E3S web of conferences. **EDP Sciences**, p. 02044, 2018.

PERSSON, M. Evaluation of Swedish plants for upgrading of biogas. **Swedish Gas Center**, report 142, 2003.

PRATI, L. Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores. **Monografia do Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná**, v. 14, p. 15, 2010.

RASI, S.; VEIJANEN, A.; RINTALA, J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. **Energy**, v. 32, n. 8, p. 1375-1380, 2007.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review. **Energy conversion and Management**, v. 52, n. 12, p. 3369-3375, 2011.

RASSÖLKIN, A.; BELAHSEN, A.; KALLASTE, A.; VAIMANN, T.; LUKICHEV, D. V.; ORLOVA, S.; HEIDARA, H.; ASAD, B.; ACEDO, J. P. Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, v. 69, n.2, p. 162-177, 2020.

RIBEIRO, F. S.; PAZZINI, L. H. A.; PELEGRINI, M. A.; KURAHASSI, L. F.; GALVÃO, L. C. R. Programa “Luz da Terra”: modelo de eletrificação rural participativo. In: **Anais do 3º encontro de energia no meio rural**, Campinas, 2003.

SAHOO, R. K.; BHARDWAJ, D.; TUTEJA, N. **Biofertilizers: a sustainable eco-friendly agricultural approach to crop improvement**. In: Plant acclimation to environmental stress. New York: Springer New York. p. 403-432, 2012.

SAO JOSE, J. F. B.; SILVA, L. F. Ocorrência de patógenos em frutas e hortaliças. **Higiene Alimentar**, v. 28, n. 234/235, p. 96-101, 2014. Acesso em: abr. 2024.

SANZ-BOBI, M. A. Use, operation and maintenance of renewable energy systems: experiences and future approaches. **Springer**, 2014. Acesso em: abr. 2024.

SELVARAJ, R.; NASIR, K. T. A.; VASA, N. J.; NAGENDRA, S. M. S. Monitoring of CO₂ and CH₄ composition in a biogas matrix from different biomass structures. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 249, p. 378-385, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400517307049> Acesso em: 18 mai. 2024.

SILVA, A. F.; PINTO, J. M.; FRANÇA, C. R. R. S.; FERNANDES, S. C.; GOMES, T. C. de A.; SILVA, M. S. L. da; MATOS, A. N. B. **Preparo e uso de biofertilizantes líquidos**. 2007. Acesso em: abr. 2024.

SILVA, C. E. V. Sustentabilidade: Avaliação da produção de biogás em um biodigestor de pequena escala. **Dissertação de Mestrado**. PPGAD; Ambiente e Desenvolvimento. 2021. Acesso em: abr. 2024.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO – SNIS.

Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos. Site institucional, 2023. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: abr. 2024.

SOARES, C. M. T.; FEIDEN, A.; TAVARES, S. G. Fatores que influenciam o processo de digestão anaeróbia na produção de biogás. **Nativa**, v. 5, p. 522-528, 2017. Acesso em: abr. 2024.

SOUZA, A. C. C. L.; MARTINS, G. Biodigestor Boitatá: possibilidades para a recuperação energética descentralizada. **Revista RedBioLAC**, v. 6, n. 1, p. 4-9, 2022. Acesso em: abr. 2024.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E. C.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 26, 2004, p. 127-133. Acesso em: abr. 2024.

TASNIM, F.; IQBAL, S. A.; CHOWDHURY, A. R. Biogas production from anaerobic co-digestion of cow manure with kitchen waste and Water Hyacinth. **Renewable Energy**, v. 109, p. 434-439, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117302379?via%3Dihub> Acesso em: mai. 2024.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems. **International Energy Agency (IEA) working paper**. 2011. Disponível em: www.iea.org/publications/freepublications/publication/EE_for_ElectricSystems.pdf.

CAPÍTULO 2¹

VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL: UMA REVISÃO SISTEMATIZADA DAS PERSPECTIVAS E DESAFIOS

Amanda Alves Arruda, Fernando de Lima Caneppele, Jair Antônio Cruz Siqueira, Kassandra Sussi Mustafé Oliveira

RESUMO

Através de uma revisão sistematizada foi avaliada a viabilidade do uso de biodigestores para a produção de biogás e geração de energia elétrica no Brasil. Seguindo a metodologia de Scannavino *et al.* (2017), o estudo divide-se em planejamento, execução e análise. No planejamento, definem-se os parâmetros e critérios para a seleção dos estudos. A execução incluiu buscas em bases de dados e avaliação dos artigos com o apoio da plataforma Rayyan.AI. A análise utiliza a estratégia PRISMA para organizar e visualizar as fases do processo. Os resultados revelam que a geração de energia a partir de biogás é economicamente viável, com retornos positivos e custos operacionais competitivos. Além disso, o biogás contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e promove uma economia de baixo carbono, oferecendo uma solução sustentável para o gerenciamento de resíduos e mitigação das mudanças climáticas. Assim, o uso de biogás apresenta-se como uma oportunidade significativa para garantir segurança energética, reduzir impactos ambientais e fomentar o desenvolvimento sustentável no Brasil.

Palavras-chave: biogás; geração de energia elétrica; revisão sistematizada; prisma; Rayyan.

FEASIBILITY OF USING DIGESTERS FOR BIOGAS PRODUCTION AND ELECTRICITY GENERATION IN BRAZIL: A SYSTEMATIC REVIEW OF PERSPECTIVES AND CHALLENGES

¹ Capítulo redigido de acordo com as normas do periódico "ReBram"

ABSTRACT

A systematic review was conducted to assess the feasibility of using digesters for biogas production and electricity generation in Brazil. Following the methodology of Scannavino *et al.* (2017), the study is divided into planning, execution, and analysis. During the planning phase, the parameters and criteria for selecting studies are defined. The execution phase included searches in databases and evaluation of articles with the support of the Rayyan.AI platform. The analysis employs the PRISMA strategy to organize and visualize the stages of the process. The results reveal that biogas-based electricity generation is economically viable, with positive returns and competitive operational costs. Additionally, biogas contributes to the reduction of greenhouse gas emissions and promotes a low-carbon economy, offering a sustainable solution for waste management and climate change mitigation. Thus, the use of biogas represents a significant opportunity to ensure energy security, reduce environmental impacts, and promote sustainable development in Brazil.

Keywords: biogas; electricity generation; systematic review; prisma; Rayyan.

2.1 INTRODUÇÃO

O processo de mapeamento sistemático nesta investigação seguiu a metodologia apresentada por Scannavino *et al.* (2017), que se divide em três etapas distintas: planejamento, execução e análise.

Durante a etapa de planejamento, são delimitados os parâmetros e o âmbito para a seleção dos estudos considerados no mapeamento. Esse processo abrange a definição das questões de pesquisa, a elaboração da estratégia de busca, a identificação das fontes de pesquisa, a seleção de palavras-chave e seus equivalentes, a formulação da string de busca, a estipulação dos critérios de inclusão e exclusão, bem como a definição dos padrões para avaliar a qualidade dos artigos escolhidos (Scannavino, 2017).

Na etapa de execução, foram conduzidas buscas abrangentes nas bases de dados designadas, empregando os termos de busca previamente estipulados na fase

de planejamento, e aplicando os critérios de inclusão e exclusão. Os estudos selecionados foram então avaliados de acordo com os critérios predefinidos, seguidos por uma leitura completa dos artigos identificados. Essa leitura abrangente visou aplicar critérios de qualidade e extrair informações pertinentes, com o objetivo de assegurar a consistência e confiabilidade dos resultados obtidos. A triagem inicial de resumos e títulos dos trabalhos selecionados foi feita na plataforma de inteligência artificial desenvolvida para revisão sistemática chamada Rayyan.AI (Ouzzani, 2016) e teve apoio o uso do diagrama de fluxo da *PRISMA Statement*, uma estratégia utilizada para apresentação dos resultados (Liberati, 2009).

Por último, na etapa de análise, os dados extraídos passam por síntese e interpretação, identificando tendências, lacunas e conclusões primordiais dos estudos incorporados ao mapeamento e é obtido um texto geral do tema estudado.

Essas informações desempenham um papel crucial na resposta às questões de pesquisa estabelecidas no início do estudo, bem como na formulação da discussão e divulgação dos resultados obtidos ao longo das etapas. Elas são fundamentais para apoiar tanto a elaboração quanto a avaliação usando esse método, garantindo a eficácia e a robustez do mapeamento sistemático.

2.1.1 Diagrama de fluxo

A etapa de execução teve o uso do *flow diagram*, ou diagrama de fluxo, da *PRISMA Statement*. Ele é uma estratégia para apresentação da execução dessa etapa e dos resultados obtidos. No fluxo são apresentados quadros separados em quatro fases: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão, tornando o processo mais visual e sintetizado (Moher, 2010; Liberati, 2009).

Na fase de identificação há o número total de artigos identificados por meio das pesquisas nas bases de dados eletrônicas e o número final de artigos após a remoção de duplicatas.

Já na fase de seleção dos artigos é feita a primeira etapa de seleção, a triagem, realizada com base na análise do título e resumo dos artigos, excluindo os trabalhos repetidos.

Em seguida, temos a fase de elegibilidade, nesta etapa são selecionados, com base em critérios de elegibilidade previamente estabelecidos, os artigos que serão

incluídos na revisão, assim como, são indicados os artigos excluídos e as razões para sua exclusão.

Por fim, na fase de inclusão dos artigos, o número final de estudos incluídos na síntese é apresentado e estes trabalhos são submetidos à leitura do texto na íntegra.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Questão de Pesquisa

As questões do mapeamento sistemático são delineadas em uma abordagem ampla, voltada para a identificação de padrões de crescimento nas pesquisas. O propósito central reside em discernir potenciais diretrizes de pesquisa, como destacado por Scannavino *et al.* (2017). Com o intuito de cumprir o objetivo deste estudo, foi formulada uma pergunta norteadora que serviu de base para a definição da estratégia de busca.

Pergunta norteadora:

“Qual a viabilidade do uso de biodigestores para a produção de biogás para geração de energia elétrica no Brasil?”.

2.2.2 Palavras-chave e *Strings* de busca

As palavras-chave escolhidas foram “*biogas digester*”, “*anaerobic digester*” e “*electrical energy from biogas*”. E foram inseridas nas bases *Scopus*, *Web Of Science* e *Science Direct* da seguinte forma:

TITLE-ABS-KEY (electrical AND energy AND biogas AND anaerobic digester OR biodigester) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2025 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE , "final")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English") OR LIMIT-TO (LANGUAGE , "Portuguese")) AND (LIMIT-TO (OA , "all")) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY , "Brazil"))

2.2.3 Critérios de inclusão e exclusão dos resultados

Os critérios de inclusão adotados foram: apenas artigos de pesquisa e revisão já publicados; artigos que respondam às questões norteadoras da pesquisa.

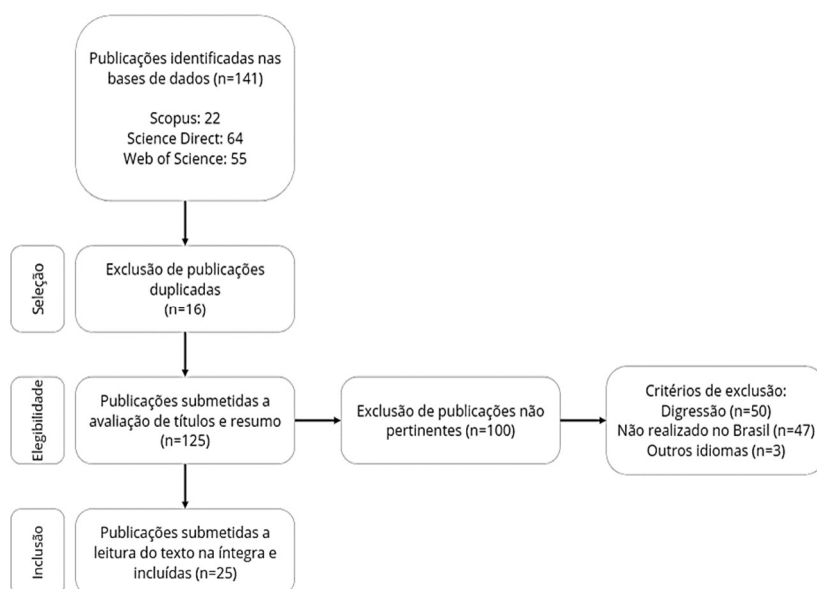
Os critérios de exclusão foram: *preprint* (trabalhos ainda não publicados); não apresentam vínculo ao tema da pesquisa; não possuem título ou resumo; o texto completo não está disponível para acesso.

2.2.4 Desenvolvimento do Mapeamento

Na etapa de execução, seguindo a ferramenta *flow diagram*, *PRISMA Statement* (Figura 1) foram submetidas as *strings* em cada uma das bases escolhidas, resultando em 141 artigos e seus dados foram inseridos na ferramenta Rayyan.ai.

A partir da leitura dos títulos e resumos, foram selecionados os artigos com base nos critérios já estabelecidos de inclusão ou exclusão. Também foram excluídos os arquivos em duplicidade. A plataforma Rayyan detectou por similaridade 16 artigos repetidos entre as plataformas, descartando-os da análise.

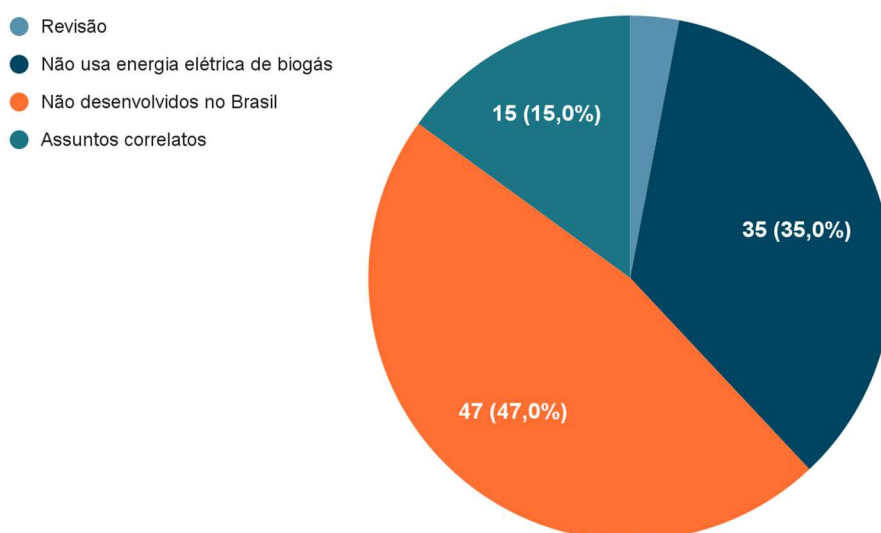
Figura 1 – Fluxo do mapeamento



Fonte: Elaborado pela autora.

Foram excluídos 116 artigos (Figura 2) e os três motivos de rejeição nos trabalhos analisados foram: em primeiro lugar, a exclusão de estudos realizados fora do contexto brasileiro; em segundo lugar, a utilização de idiomas não contemplados na estratégia de busca; e por último, a divergência do foco central da pesquisa, manifestada através da abordagem de temas periféricos, tais como avaliações de digestibilidade de diversos tipos de resíduos, potencial de aplicação como adubo, análises microbiológicas e introdução de microrganismos nas bateladas, tratamento de resíduos sem o emprego de biodigestores, além de considerações sobre medição, qualificação e viabilidade financeira dos gases resultantes, que não se adequaram ao escopo temático determinado para a investigação.

Figura 2 – Artigos Excluídos



Fonte: Elaborado pela autora.

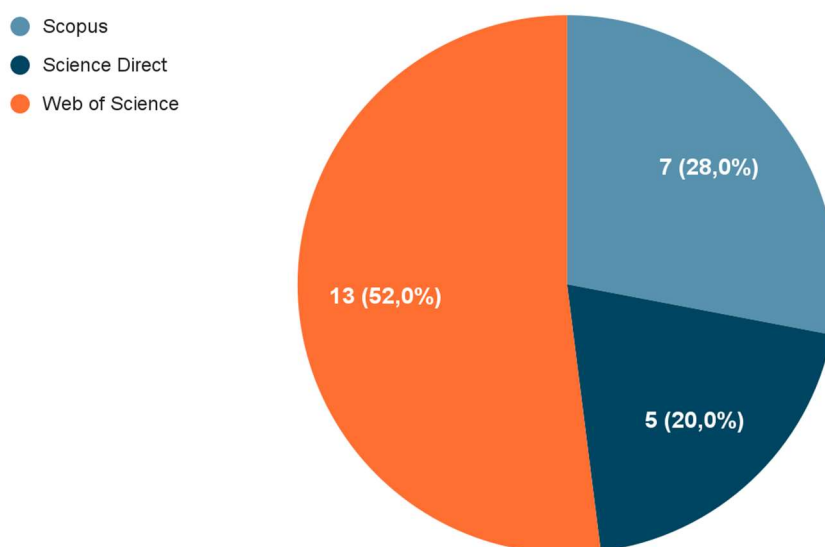
No total encontrado, após todo o processo de seleção, 25 artigos foram selecionados para leitura completa, avaliação e extração de dados (Tabela 1).

Tabela 1 - Artigos encontrados, aceitos, rejeitados e duplicados

Plataforma	Encontrados	Aceitos	Rejeitados	Duplicados
Scopus	22	7	15	9
Science Direct	64	5	59	4
Web Of Science	55	13	42	3

Fonte: Elaborado pela autora.

Dos 25 artigos selecionados (Tabela 2), podemos dividir os trabalhos encontrados pelas plataformas de busca utilizadas (Figura 3). Na plataforma Scopus, foram encontrados 7 trabalhos, na plataforma Science Direct, foram encontrados 5 trabalhos e na plataforma Web Of Science foram encontrados 13 trabalhos.

Figura 3 – Artigos Selecionados por plataforma

Fonte: Elaborado pela autora.

Durante a leitura dos trabalhos selecionados, foi feita a avaliação e separação dos temas, além da extração dos dados com base nas perguntas estabelecidas inicialmente. Após essa classificação, foi feita a discussão e sintetização da busca.

Tabela 2 - Artigos selecionados

Nº	Título	Autores	Tema
1	A proposal to evaluate the potential of biogas and lifetime of landfills for the production of electrical energy	GONÇALVES, M. N.; MARTINS, M. R.; CAMACHO, J. R..	Avaliação do potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários.
2	Digestão anaeróbia para produção de energia renovável	DE MENDONÇA, H. V.; OTENIO, M. H.; DE PAULA, V. R.	Avaliação do potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás de dejetos de bovinos leiteiros.
3	Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos	BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. L.	Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás em uma estação de tratamento de esgoto.
4	Evaluation of Biogas Energy from Co-Digestion of Organic Urban Solid Waste with Lime Mud	COELHO, U.R.S.; CRISPIM, A.M.C.; MARTINS, M.A.B.; BARROS, R.M.; RENO, M.L.G.; TIAGO FILHO, G.L.; SANTOS, I.F.S.	Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos urbanos com lodo de cal da indústria de papel.
5	Proposal of a Supervisory System for Energy Microgeneration: Case Study Granja Colombari	OTTO, R. B., ALVAREZ-FERREIRA, L. R., SILVA, F. P., SANTOS, R. F., NOGUEIRA, C. E. C., DE SOUZA, S. N. M., ANDO JUNIOR, O. H.	Sistema de geração distribuída de eletricidade utilizando biogás de pequenas propriedades agrícolas.
6	Supplying the energy demand in the chicken meat processing poultry with biogas	FERRAREZ, A. H. OLIVEIRA, D., LACERDA, A. F., COSTA, J. M., APARISI, F. S.	Avaliação do potencial de produção de energia elétrica a partir de biogás do processamento de cama de frango.
7	Ultrasonic pretreatment of brewers' spent grains for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development	BULLER, L. S., SGANZERLA, W. G., LIMA, M. N., MUENCHOW, K. E., TIMKO, M. T., FORSTER-CARNEIRO, T.	Tratamentos para aumentar a produção de biogás
8	Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a Stirling engine	CAETANO, B. C., SANTOS, N. D. S. A., HANRIOT, V. M., SANDOVAL, O. R., HUEBNER, R.	Análise da viabilidade da geração de energia utilizando biogás de resíduos de criação animal.
9	Energy potential from the generation of biogas from anaerobic digestion of olive oil extraction wastes in Brazil	BÔAS, T. F. V., BARROS, R. M., PINTO, J. A., DOS SANTOS, I. F. S., LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., DE OLIVEIRA MACHADO, G.	Avaliação de viabilidade financeira do potencial energético do biogás de resíduos de extração de azeite de oliva.
10	Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions	VILLARROEL-SCHNEIDER, J., HÖGLUND-ISAKSSON, L., MAINALI, B., MARTÍ-HERRERO, J., CARDOZO, E., MALMQUIST, A., MARTIN, A.	Avaliação do potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás de esterco bovino.
11	Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis	PINTO, J. A., BARROS, R. M., DOS SANTOS, I. F. S., TIAGO FILHO, G. L., DE OLIVEIRA BOTAN, M. C., BÔAS, T. F. V., DE CÁSSIA CRISPIM, A. M.	Avaliação teórica da viabilidade da geração de energia elétrica a partir de biogás da co-digestão de esterco bovino e suíno.

- 12 Study on preliminary economic availability of electric energy use from drying bed sludge by biogas from anaerobic digestion and incineration in Brazil SILVA, A. P. M., BARROS, R. M., LORA, E. E. S., DOS SANTOS, I. F. S., RIBEIRO, E. M., DE FREITAS, J. V. R., DE CASSIA CRISPIM, A. M. Viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de biogás e incineração de lodo de estação de tratamento de águas residuais.
- 13 Análise da implantação e um biodigestor: estudo de caso na área central de Itacoatiara/AM VIEGAS, B. K. R.; GUIMARÃES, G. dos A.; KUWANO, R. T.; OLIVEIRA, B. O. S.; ALVES, R. Avaliação do potencial de produção de energia elétrica de biogás de resíduos sólidos orgânicos.
- 14 Biogas and Biomass Implementation in Rural Areas SANDIM, A. A.; BATISTA, A. G.; BARETA, M. L. E.; BETINI, R. C.; PEPFLOW, L. A. Uso de biogás e biomassa para energia elétrica em pequenos produtores rurais.
- 15 Biogas production and electricity generation from a quail manure wastewater treatment system per water depth DUARTE JUNIOR, R.; ROSSA, Übersen B.; CHIARELLO, L. M.; SCHARF, D. R.; SOMENSI, C. A.; VISCHETTI, C.; GONÇALVES, L. F. S. Uso de resíduos líquidos da coturnicultura para produção de energia elétrica a partir de biogás.
- 16 Biogas production from malt bagasse from craft beer industry: kinetic modeling and process simulation TSCHOEKE, I. C. P., FRAGA, T. J. M., DA SILVA, M. P., COSTA E SOUZA, T. P., CHINELATE, G. C. B. Uso de bagaço de malte enriquecido com cerveja artesanal para gerar energia a partir de biogás.
- 17 Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás CALZA, L. F., LIMA, C. B., NOGUEIRA, C. E., SIQUEIRA, J. A., SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de construção e operação de modelos de biodigestores e seus potenciais produtivos de energia elétrica.
- 18 Economic and environmental feasibility of cogeneration from food waste: a case study in São Paulo city DE OLIVEIRA, D.E.P.; MIRANDA, A.C.; JUNIOR, M.V.; SANTANA, J.C.C.; TAMBOURGI, E.B.; FACCHINI, F.; IAVAGNILIO, R.; PINTO, L.F.R. Produção de eletricidade a partir de resíduos de alimentos em São Paulo.
- 19 Economic, energetic and environmental analysis of the utilization of swine manure in Brazil: Opportunities and challenges DE ARAUJO, G. J.; DE OLIVEIRA, S. V. W. B. Potencial econômico, energético e ambiental da reutilização de esterco suíno em unidades de criação.
- 20 Análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica por biomassa provinda de propriedades rurais MARTINS, L. C.; TINOCO, C. MENDONÇA M.; MARTINS, G.; CEZARINO, L. O.; SCANAVEZ, P. H. F.; MARTINS, J. C.; DE MATOS, L. C. Viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de biomassa de dejetos animais.
- 21 Viabilidade econômica da implantação de um biodigestor tipo canadense para a geração de energia elétrica destinada à atividade leiteira DEMEU, F. A.; LOPES, M. A.; REIS, E. M. B.; LIMA, A. L. R.; CARVALHO, F. M. de; PALHARES, J. C. P.; OTENIO, M. H. Viabilidade econômica da geração de energia elétrica
- 22 Economic viability to generate electricity from the biogas produced in the wastewater treatment plant GARCIA, I. G. B., HOFFMANN, R., MAYER, F. D., PAINES, P. A., & POSSAMAI, O. Viabilidade técnica e econômica da geração de eletricidade a partir do biogás do esgoto
- 23 Energy potential and economic feasibility of biogas: case study of a landfill in Minas Gerais, Brazil SOUZA, T. L. de C.; ROCHA, A. L. M.; BRIANEZI, D. Produção de energia elétrica a partir do biogás de aterro sanitário
- 24 Energy potential of biogas from pig farms in the state of Minas Gerais, Brazil SOUSA, I. D. P., ROSA, A. P., BORGES, A. C., & RENATO, N. D. S. Produção de biogás e energia elétrica em propriedades rurais
- 25 Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil NASCIMENTO, M. C. B., FREIRE, E. P., DANTAS, F. D. A. S., GIANSANTE, M. B. Potencial de aproveitamento do biogás de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil para geração de energia elétrica e biometano

Fonte: Elaborado pela autora.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos estudos relacionados à utilização de biogás para geração de energia revela um panorama promissor e multifacetado sobre o tema. Os resultados obtidos abrangem diferentes aspectos, desde avaliações financeiras até considerações sobre produtividade e potencial de energia limpa.

Do ponto de vista financeiro, os estudos abordados nos artigos 4, 6, 9, 12, 19, 20, 21, 22 e 23 destacam a viabilidade econômica dos projetos de geração de energia com biogás.

O 4º artigo avalia a viabilidade econômica da co-digestão de resíduos sólidos urbanos orgânicos e lama de cal para a produção de biogás, obtendo um resultado positivo no valor presente líquido.

O 6º artigo examina a viabilidade de utilizar biogás gerado a partir de dejetos de aves para suprir a demanda energética de uma unidade de processamento de frangos. Os resultados mostram que a geração de biogás pode atender e até exceder as necessidades energéticas da planta, tornando sua implementação vantajosa ao reduzir custos e aumentar a competitividade na indústria.

O estudo apresentado no 9º artigo avalia o potencial energético do biogás produzido a partir da digestão anaeróbica de resíduos da extração de azeite. A análise, realizada em diversas regiões do Brasil, obteve resultados financeiros positivos apenas na região Sul, devido aos créditos de redução de emissões certificadas.

O 12º trabalho investigou a viabilidade técnica e econômica de diversos sistemas de secagem térmica para lodo de esgoto em Itajubá, MG. A análise considerou aspectos ambientais e eficiência energética, com a secagem térmica apresentando o melhor desempenho técnico-financeiro.

O 19º artigo avalia o potencial econômico, ambiental e energético do aproveitamento de esterco de suínos no Brasil, que pode produzir biogás, eletricidade e biofertilizantes. O estudo destaca a viabilidade financeira do setor e a importância de políticas públicas para promover o uso dessa biomassa, contribuindo para a matriz energética e o desenvolvimento da economia agrícola.

O 20º artigo analisa a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir de biomassa em propriedades rurais no Brasil. Comparando três tipos de

fazendas (suínos, bovinos e aves), o estudo conclui que a suinocultura é a mais econômica, com um Valor Presente Líquido (VPL) 26,52% superior ao das aves e 47,39% superior ao dos bovinos.

O 21º artigo avaliou a viabilidade econômica de um biodigestor canadense para a geração de energia em uma fazenda leiteira no sul de Minas Gerais. Foram examinados diferentes cenários, todos indicando viabilidade econômica com um Valor Presente Líquido positivo e um custo de energia elétrica variando de R\$ 0,1791 a R\$ 0,3308 por kWh.

O 22º artigo realizou uma avaliação técnica e econômica da geração de eletricidade a partir do biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgoto Serraria, em Porto Alegre, RS. Os resultados indicaram viabilidade financeira para a implementação do sistema.

O 23º artigo teve como objetivo estimar a produção de metano em um aterro sanitário em Minas Gerais e avaliar a viabilidade econômica de um projeto para aproveitar o biogás na geração de energia elétrica. A metodologia do IPCC foi utilizada para estimar a produção de metano, enquanto ferramentas como Valor Presente Líquido, *payback* descontado e Taxa Interna de Retorno foram empregadas para a análise econômica, resultando em um retorno econômico positivo para o projeto.

Todas essas análises evidenciam retornos positivos sobre o investimento, custos operacionais competitivos e potencial para atrair investimentos em infraestrutura energética sustentável.

No que diz respeito à produtividade, os artigos 2, 3, 5, 7, 13, 15, 16, 17 e 24 apresentam resultados sobre a capacidade dos sistemas de produção de biogás em gerar energia elétrica de forma eficiente a partir de diferentes fontes de resíduos. Esses estudos demonstram a importância de considerar a produtividade como um indicador-chave para avaliar a eficácia e a sustentabilidade dos projetos de geração de energia.

O 2º artigo descreveu um estudo sobre a digestão anaeróbia de dejetos bovinos para a produção de biogás. O biodigestor funcionou por um período de 8 meses, com um tempo de retenção hidráulica de 32 dias. A produção de biogás variou de acordo com a carga orgânica, apresentando concentrações de metano entre 54% e 70%. A eficiência na remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias e Demanda Química de Oxigênio foi de 75,8% e 70%, respectivamente.

O 3º artigo quantificou a energia produzida a partir do biogás em uma estação de tratamento de esgotos e estimou a quantidade de emissões de gases de efeito estufa evitadas.

O 5º artigo descreve um sistema de supervisão para a microgeração de energia a partir de biogás em pequenas propriedades rurais. Este sistema monitorou variáveis ambientais, elétricas e mecânicas, além de armazenar dados para análise e suporte à tomada de decisões.

O estudo descrito no 7º artigo investigou o uso do pré-tratamento ultrassônico em grãos de cervejaria para digestão anaeróbica. A integração de ultrassom com digestão anaeróbica resultou em um aumento de 27% na produção de metano e uma melhoria na recuperação de energia elétrica e térmica.

O 13º artigo avaliou a instalação de um biodigestor para resíduos sólidos orgânicos em Itacoatiara, AM. Os resultados indicaram uma produção de 132,57 m³ de metano por dia, gerando 9.843,9 kWh por mês, o que é suficiente para abastecer 51 residências.

O 15º artigo apresentou um estudo sobre a digestão anaeróbica dos dejetos líquidos de codornas, que pode gerar biogás e biofertilizantes, beneficiando tanto a produção de energia quanto a redução de impactos ambientais. Os resultados mostraram que a maior produção de biogás foi obtida com um substrato de 30 dias de deposição, gerando 104,64 kWh de energia elétrica ao longo de 45 dias.

No 16º estudo, investigou-se a produção de biogás a partir do bagaço de malte da indústria cervejeira, apresentando um modelo cinético eficiente. Foi construído um biodigestor de bancada, que demonstrou que a temperatura é a variável mais impactante, levando a um elevado rendimento de metano e significativa produção de energia limpa. Os parâmetros cinéticos obtidos indicam uma boa eficiência do processo.

O 17º estudo examinou os custos de construção e operação de biodigestores (modelos indiano, chinês e canadense) em Cascavel, PR, utilizando dejetos de caprinos, bovinos e suínos. A pesquisa avaliou a viabilidade econômica da geração de energia a partir do biogás produzido, levando em conta propriedades rurais com diferentes quantidades de animais. Os resultados mostram que a utilização de resíduos de origem animal em sistemas integrados oferece benefícios tanto econômicos quanto ambientais.

O 24º estudo analisou a produção de biogás em fazendas de suínos em Minas Gerais, focando na capacidade elétrica gerada por biodigestores. A análise revela que a maior parte da potência gerada está concentrada em duas mesorregiões específicas. O estudo recomenda aprimoramentos na eficiência dos biodigestores e a capacitação profissional para promover uma maior sustentabilidade energética.

Por fim, as considerações sobre o potencial de energia limpa são destacadas nos artigos 1, 8, 10, 11, 14, 18, 25. Esses estudos ressaltam o papel fundamental do biogás na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção da transição para uma economia de baixo carbono. Além disso, enfatizam a importância do biogás como uma solução ambientalmente sustentável para o gerenciamento de resíduos, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a preservação do meio ambiente.

O 1º estudo investigou o potencial dos aterros para gerar energia elétrica a partir do biogás, utilizando a metodologia do IPCC para calcular as emissões de metano e um software específico para medir essas emissões no aterro de Uberlândia, MG. Os resultados confirmam a viabilidade da produção de energia a partir de resíduos sólidos e enfatizam a importância de uma gestão ambiental eficaz.

O 8º artigo explorou a conversão de biogás gerado a partir de esterco de gado em energia elétrica utilizando um motor Stirling. O estudo avalia modelos matemáticos para um sistema descentralizado de produção de biogás e geração de energia, concluindo que são necessários 88 porcos ou 26 vacas leiteiras para gerar 2.089 kW de potência de eixo, ou 50 kWh por dia.

O 10º artigo discutiu a autossuficiência energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa em fazendas de laticínios na América Latina, por meio da implementação de soluções baseadas em biogás. O estudo propõe o uso de biodigestores para a produção de biogás a partir de esterco bovino, com o objetivo de fornecer energia e fertilizantes orgânicos, ao mesmo tempo que reduz custos e emissões.

O 11º estudo analisou a viabilidade técnica e econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás obtido pela co-digestão anaeróbica de esterco bovino e suíno. A pesquisa identificou a proporção ideal de 4 partes de esterco bovino para 1 parte de esterco suíno. Foram empregadas ferramentas de análise econômica, como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e Custo Nivelado de Energia, para

avaliar a viabilidade do processo.

O 14º artigo abordou a implementação de biogás e biomassa em áreas rurais, analisando os métodos de produção, custos e benefícios associados. O estudo destaca que a produção de biogás requer o uso de compressores e chillers, com um custo de investimento aproximado de 14 milhões de dólares e custos operacionais de 2 milhões de dólares. A adoção dessas tecnologias pode diminuir os custos de produção agrícola e fornecer energia adicional, oferecendo vantagens econômicas e energéticas significativas.

O 18º artigo, apresentou um estudo de caso realizado em São Paulo que avalia a viabilidade econômica e ambiental da cogeração utilizando resíduos alimentares. A pesquisa demonstrou que a produção de biogás conseguiu reduzir o consumo de eletricidade em 14%, gerou créditos de carbono e obteve um retorno sobre investimento de 433%, com um período de retorno de 1,01 anos.

O 25º artigo apresentou um estudo que examina o potencial do biogás gerado a partir de resíduos sólidos urbanos. Entre 2004 e 2015, o Brasil instalou 9 usinas termelétricas que geraram 86,3 MW de energia elétrica a partir desse recurso. No entanto, o país utiliza apenas de 7 a 20% do biogás disponível, indicando um grande potencial não explorado.

Considerando os resultados e as contribuições dos estudos analisados, fica evidente que a utilização de biogás para geração de energia representa uma oportunidade significativa para promover a segurança energética, reduzir os impactos ambientais, reduzindo as emissões de metano e dióxido de carbono, e impulsionar o desenvolvimento sustentável em escala global.

2.4 CONCLUSÃO

A análise dos estudos sobre a utilização de biogás para geração de energia revela um potencial significativo e multifacetado. Os resultados destacam a viabilidade econômica dos projetos, com retornos positivos sobre o investimento e custos operacionais competitivos, indicando atratividade para investimentos em infraestrutura sustentável.

Além disso, os estudos ressaltam o papel crucial do biogás na redução das emissões de gases de efeito estufa e na promoção de uma economia de baixo

carbono, sendo uma solução ambientalmente sustentável para o gerenciamento de resíduos, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Contudo, de acordo com o tamanho das usinas de biodigestão, avaliamos que para pequenas propriedades, com plantas de pequeno porte, o investimento torna-se muito alto, inviabilizando o sistema. Cada projeto deve ser avaliado de acordo com as condições locais.

Portanto, a utilização de biogás para geração de energia surge como uma oportunidade importante para fortalecer a segurança energética, mitigar impactos ambientais e promover o desenvolvimento sustentável em escala global. No entanto, é essencial que essa aplicação seja adaptada às condições específicas de cada local.

REFERÊNCIAS

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**, v. 21, p. 275-282, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/9FZgZyXyXNKBZcq9b38jVRQ/abstract/?lang=pt> Acesso em: 15 mai. 2024.

BÔAS, T. F. V.; BARROS, R. M.; PINTO, J. A.; DOS SANTOS, I. F. S.; LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; TIAGO FILHO, G. L.; ALMEIDA, K. A.; DE OLIVEIRA MACHADO, G. Energy potential from the generation of biogas from anaerobic digestion of olive oil extraction wastes in Brazil. **Cleaner Waste Systems**, v. 4, n. 100083, abr. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100083> Acesso em: 10 mai. 2024.

BULLER, L. S.; SGANZERLA, W. G.; LIMA, M. N.; MUENCHOW, K. E.; TIMKO, M. T.; FORSTER-CARNEIRO, T. Ultrasonic pretreatment of brewers' spent grains for anaerobic digestion: Biogas production for a sustainable industrial development. **Journal of Cleaner Production**, v. 355, n. 131802, abr. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622014135> Acesso em: 15 mai. 2024.

CAETANO, B. C.; SANTOS, N. D. S. A.; HANRIOT, V. M.; SANDOVAL, O. R.; HUEBNER, R. (2022). Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a Stirling engine. **Energy Conversion and Management: X**, v. 15, n. 100224, abr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100224> Acesso em: 15 mai. 2024.

CALZA, L. F.; LIMA, C. B.; NOGUEIRA, C. E.; SIQUEIRA, J. A.; SANTOS, R. F. Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 990-997, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p990-997/2015> Acesso em: 10 mai. 2024.

COELHO, U. R. D. S.; CRISPIM, A. M. D. C.; MARTINS, M. A. D. B.; BARROS, R. M.; RENO, M. L. G.; TIAGO FILHO, G. L.; SANTOS, I. F. S. Evaluation of Biogas Energy from Co-Digestion of Organic Urban Solid Waste with Lime Mud. **Recycling MDPI**, v. 8, n. 57, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling8040057> Acesso em 15 mai. 2024.

DE ARAUJO, G. J. F.; DE OLIVEIRA, S. V. W. B. Economic, energetic and environmental analysis of the utilization of swine manure in Brazil: Opportunities and challenges. **Energy Strategy Reviews**, v. 47, n. 101089, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101089> Acesso em: 10 mai. 2024.

DE MENDONÇA, H. V.; OTENIO, M. H.; DE PAULA, V. R. Digestão anaeróbia para produção de energia renovável. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**. v. 14,

n. 3, e7667, 2021. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/352800162_Digestao_anaerobia_para_producao_de_energia_renovavel Acesso em: 15 mai. 2024.

DE OLIVEIRA, D. E. P.; MIRANDA, A. C.; JUNIOR, M. V.; SANTANA, J. C. C.; TAMBOURGI, E. B.; FACCHINI, F.; IAVAGNILIO, R.; PINTO, L. F. R. Economic and Environmental Feasibility of Cogeneration from Food Waste: A Case Study in São Paulo City. **Sustainability** **2024 MDPI**, v. 16, n. 7, 2979. Disponível em:
<https://doi.org/10.3390/su16072979> Acesso em: 10 mai. 2024.

DEMEU, F. A.; LOPES, M. A.; REIS, E. M. B.; LIMA, A. L. R.; CARVALHO, F. M. de; PALHARES, J. C. P.; OTENIO, M. H. Viabilidade econômica da implantação de um biodigestor tipo canadense para a geração de energia elétrica destinada à atividade leiteira. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 375–394, 2021. Disponível em:
<https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/40592>. Acesso em: 10 mai. 2024.

DUARTE JUNIOR, R.; ROSSA, Übersen B.; CHIARELLO, L. M.; SCHARF, D. R.; SOMENSI, C. A.; VISCHETTI, C.; GONÇALVES, L. F. S. Biogas production and electricity generation from a quail manure wastewater treatment system per water depth. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, Rio de Janeiro, RJ, v. 58, n. 2, p. 293–303, 2023. Disponível em:
https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/1562. Acesso em: 10 mai. 2024.

FERRAREZ, A. H.; OLIVEIRA, D.; LACERDA, A. F.; COSTA, J. M.; APARISI, F. S. Supplying the energy demand in the chicken meat processing poultry with biogas. **Ingeniería e Investigación**, v. 36, n. 1, p. 118-121, 2016. Disponível em:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092016000100016 Acesso em: 15 mai. 2024.

GARCIA, I. G. B.; HOFFMANN, R.; MAYER, F. D.; PAINES, P. A.; POSSAMAI, O. Economic viability to generate electricity from the biogas produced in the wastewater treatment plant. **Journal of Environmental Management & Sustainability**, v. 9, n.1, e13443, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.13443> Acesso em: 10 mai. 2024.

GONÇALVES, M. N.; MARTINS, M. R.; CAMACHO, J. R. A Proposal to Evaluate the Potential of Biogas and Lifetime of Landfills for the Production of Electrical Energy. **Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)**, v. 1, n. 16, p. 26-32, 2018. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/323783386_A_Proposal_to_Evaluate_the_Potential_of_Biogas_and_Lifetime_of_Landfills_for_the_Production_of_Electrical_Energy Acesso em: 15 mai. 2024.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GÖTZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A.; CLARKE, M.; DEVEREAUX, P. J.; KLEIJNEN, J.; MOHER, D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **PLoS Med** v. 151, n. 4, p. W-65-W-94, 2009. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosmedicine/article?id=10.1371/journal.pmed.1000100> Acesso em: 10 mar. 2024

MARTINS, L. C.; TINOCO, C.; MENDONÇA, M.; MARTINS, G.; CEZARINO, L. O.; SCANAVEZ, P. H. F.; MARTINS, J. C.; DE MATOS, L. C. Análise de viabilidade econômica da geração de energia elétrica por biomassa provinda de propriedades rurais. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 13, n. 3, p. 1258–1279, 2022. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/1400>. Acesso em: 10 mai. 2024.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. The Prisma Group. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **International journal of surgery**, v. 8, n. 5, p. 336-341, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20171303/> Acesso em: 10 mar. 2024.

NASCIMENTO, M. C. B.; FREIRE, E. P.; DANTAS, F. D. A. S.; GIANSANTE, M. B. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 143-155, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019171125> Acesso em: 10 mai. 2024.

OTTO, R. B.; ALVAREZ-FERREIRA, L. R.; SILVA, F. P.; SANTOS, R. F.; NOGUEIRA, C. E. C.; DE SOUZA, S. N. M.; FRIGO, J. P.; ANDO JUNIOR, O. H. Proposal of a Supervisory System for Energy Microgeneration: Case Study Granja Colombari. **Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)**. v. 1, n. 15, p. 160-166, abr. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/316304473_Proposal_of_a_Supervisory_System_for_Energy_Microgeneration_Case_Study_Granja_Colombari Acesso em: 10 mar. 2024.

OUZZANI, M.; HAMMADY, H.; FEDOROWICZ, Z.; ELMAGARMID, A. Rayyan - a web and mobile app for systematic reviews. **Systematic reviews**, v. 5, p. 1-10, dez. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311443509_Rayyan-a_web_and_mobile_app_for_systematic_reviews. Acesso em: 10 dez. 2023.

PINTO, J. A.; BARROS, R. M.; DOS SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; DE OLIVEIRA BOTAN, M. C.; BÔAS, T. F. V.; DE CÁSSIA CRISPIM, A. M. Study of the anaerobic co-digestion of bovine and swine manure: Technical and economic feasibility analysis. **Cleaner Waste Systems**, v. 5, n. 100097, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100097> Acesso em: 10 mai. 2024.

SANDIM, A. A.; BATISTA, A. G.; BARETA, M. L. E.; BETINI, R. C.; PEPFLOW, L. A. Biogas and Biomass Implementation in Rural Areas. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, p. e19190001, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-smart-2019190001> Acesso em: 10 mai. 2024.

SCANNAVINO, K. R. F.; NAKAGAWA, E. Y.; FABBRI, S. C. P. F.; FERRARI, F. C. **Revisão Sistemática da Literatura em Engenharia de Software**: teoria e prática. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

SILVA, A. P. M.; BARROS, R. M.; LORA, E. E. S.; DOS SANTOS, I. F. S.; RIBEIRO, E. M.; DE FREITAS, J. V. R.; DE CASSIA CRISPIM, A. M. Study on preliminary economic availability of electric energy use from drying bed sludge by biogas from anaerobic digestion and incineration in Brazil. **Cleaner Waste Systems**, v. 6, n. 100117, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2023.100117> Acesso em: 10 mai. 2024.

SOUSA, I. D. P.; ROSA, A. P.; BORGES, A. C.; RENATO, N. D. S. Energy potential of biogas from pig farms in the state of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 3, p. 396-404. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n3p396-404/2020> Acesso em: 10 mai. 2024.

SOUZA, T. L. de C.; ROCHA, A. L. M.; BRIANEZI, D. Energy potential and economic feasibility of biogas: case study of a landfill in Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)**, Rio de Janeiro, v. 56, n. 4, p. 643–653, 2021. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/935. Acesso em: 10 mai. 2024.

TSCHOEKE, I. C. P., FRAGA, T. J. M., DA SILVA, M. P., COSTA E SOUZA, T. P., CHINELATE, G. C. B. Biogas production from malt bagasse from craft beer industry: kinetic modeling and process simulation. **Journal of material cycles and waste management**, v. 25, p. 2809-2821, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01715-7> Acesso em: 10 mai. 2024.

VIEGAS, B. K. R.; GUIMARÃES, G. dos A.; KUWANO, R. T.; OLIVEIRA, B. O. S.; ALVES, R. C. Análise Da Implantação De Um Biodigestor: Estudo De Caso Na Área Central De Itacoatiara/AM . **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, v. 14, n. 1, p. 152–168, 2023. Disponível em: <https://revista.unifaema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/1227>. Acesso em: 10 mai. 2024.

VILLARROEL-SCHNEIDER, J.; HÖGLUND-ISAKSSON, L.; MAINALI, B.; MARTÍ-HERRERO, J.; CARDOZO, E.; MALMQUIST, A.; MARTIN, A. Energy self-sufficiency and greenhouse gas emission reductions in Latin American dairy farms through massive implementation of biogas-based solutions. **Energy Conversion and**

Management, v. 261, n. 115670, jun. 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115670> Acesso em: 10 mai. 2024.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada evidencia que, embora a produção de energia elétrica a partir do biogás não se mostre economicamente viável nas condições atuais, sua relevância transcende questões financeiras. O biogás, gerado pela biodigestão de resíduos, apresenta benefícios significativos para a sustentabilidade, contribuindo para a gestão adequada de resíduos sólidos e promovendo melhorias no saneamento. Esses aspectos são fundamentais para a qualidade de vida das comunidades, especialmente em áreas rurais e em famílias de baixa renda.

Além disso, o desenvolvimento e a popularização de tecnologias de biogás estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, refletindo um compromisso com a energia limpa e acessível, bem como ações eficazes contra a mudança climática. A implementação de biodigestores pode não apenas ajudar na redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também transformar resíduos em recursos valiosos, como biofertilizantes.

Entretanto, para que essas tecnologias se tornem uma realidade viável, é necessário que haja um suporte governamental robusto, incluindo incentivos financeiros e programas de subsídios, capacitação da mão de obra e conscientização sobre os benefícios do biogás, garantindo a operação eficiente e a manutenção dos sistemas.

Embora o uso de biogás para geração de eletricidade tenha limitações financeiras, suas aplicações alternativas e os potenciais impactos positivos na gestão de resíduos e no meio ambiente são promissores. A adoção de uma abordagem estratégica e integrada pode, portanto, fomentar um futuro mais sustentável, promovendo o acesso a tecnologias que beneficiem tanto o meio ambiente quanto as comunidades.

REFERÊNCIAS

BORGES, F. Q. Estrutura institucional do setor de energia elétrica no Brasil e o desenvolvimento sustentável. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218, v. 2, n. 3, p. 198-212, 2021.

DOS REIS, L. B.; SANTOS, E. C. **Energia elétrica e sustentabilidade**: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais. Barueri: Editora Manole, 2006.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional (BEN) 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben> Acesso em: 10 dez. 2023.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Expansão de energia 2031**. Ministério de Minas e Energia. Brasília - DF, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf 2022. Acesso em 20 de mai de 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Diagnóstico dos resíduos orgânicos do setor agrossilvopastoril e agroindústrias associadas**. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

JÚNIOR, C. B.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da biomassa residual: perspectivas energéticas, socioeconômicas e ambientais**. 2ª ed. rev - Foz do Iguaçu/Brasília: Itaipu Binacional. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik Editora, 2009, 129 p.

NAHAS, M. I. P.; PEREIRA, M. A. M.; ESTEVES, O. A.; GONÇALVES, E. Metodologia de construção do Índice de Qualidade de Vida Urbana dos municípios brasileiros (IQVU-BR). In: XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais da Associação Brasileira de Estudos Populacionais., 2006, Caxambu, MG. **XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais da Associação Brasileira de Estudos Populacionais**. Campinas: ABEP, 2006.

PEREIRA, R. H.; BRAGA, C. V. M.; BRAGA, S. L.; FREIRE, L. G. M. Geração Distribuída de Energia Elétrica - Aplicação de Motores Bicom bustível Diesel/Gás Natural. In: III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - IBP. **Anais do III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás - IBP**, Salvador, BA, 2005.