

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo será disponibilizado somente a partir de 05/02/2026

At the author's request, the full text will not be available online until February 5, 2026

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 Biossistemas / 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.

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.