

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**GERAÇÃO DE GÁS METANO A PARTIR DE DEJETOS DA PECUÁRIA LEITEIRA E O
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO NO PROCESSO DE ORDENHA MECÂNICA**

Juliana Yumi Watanabe

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

JULIANA YUMI WATANABE

GERAÇÃO DE GÁS METANO A PARTIR DE DEJETOS DA
PECUÁRIA LEITEIRA E O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO
NO PROCESSO DE ORDENHA MECÂNICA

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2022

W324g

Watanabe, Juliana Yumi

Geração de gás metano a partir de dejetos da pecuária leiteira e o aproveitamento energético no processo de ordenha mecânica / Juliana Yumi

Watanabe. -- Rio Claro, 2022

49 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

1. energia limpa. 2. energia renovável. 3. biogás. 4. biodigestor. 5. gases do efeito estufa. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

JULIANA YUMI WATANABE

GERAÇÃO DE GÁS METANO A PARTIR DE DEJETOS DA
PECUÁRIA LEITEIRA E O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO
NO PROCESSO DE ORDENHA MECÂNICA

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de
Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.

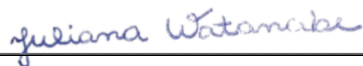
Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (orientador)

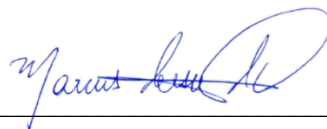
Profª. Dra. Vânia Silvia Rosolen

Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia

Rio Claro, 06 de dezembro de 2022



Assinatura da aluna



Assinatura do orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à minha família, pelo incentivo aos estudos e pelo apoio durante toda minha trajetória.

Aos meus amigos, que me apoiaram e sempre estiveram do meu lado em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Marcus, pela confiança, suporte e orientação durante a Iniciação Científica e o Trabalho de Conclusão de Curso.

À Unesp e seu corpo docente, pela paciência, dedicação e conhecimento compartilhado durante os anos de graduação.

Ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), pelo suporte financeiro com a bolsa reitoria durante o desenvolvimento da Iniciação Científica (Edital PROPe 04/2019, pedido nº 53491).

RESUMO

Em 2020, o Brasil ocupou o 5º lugar no ranking mundial de produção de leite. Esta grande produção tem relação direta com a quantidade de dejetos gerados, os quais, quando descartados de forma incorreta, causam inúmeros impactos ambientais. Uma das soluções para o tratamento dos dejetos são os biodigestores que geram energia e composto orgânico. Nesse sentido, o trabalho tem como objetivo geral o estudo do potencial de geração de energia em biodigestores alimentados com dejetos bovinos em uma propriedade de produção de leite tipo “A”. O projeto contemplou o estudo dos modelos matemáticos aplicados à conversão anaeróbia da matéria orgânica em metano e, posteriormente, sua conversão em energia elétrica. Os dados da geração de dejetos foram lançados em três modelos de estimativa de geração de biogás para o cotejo dos cenários do potencial de geração de energia. Em paralelo realizou-se a cotação de aquisição e manutenção do biodigestor, alinhado à geração de resíduos da propriedade para subsidiar a análise do tempo de retorno do capital (*payback*) com a economia de energia. Os resultados demonstraram que a geração de metano estimada pelos modelos matemáticos é suficiente para tornar a propriedade auto suficiente em energia elétrica, e o tempo de retorno do empreendimento é de 4 anos. Já com relação aos aspectos ambientais, a implicação do biodigestor diminui os impactos ambientais da atividade leiteira, proporcionando um melhor gerenciamento dos dejetos gerados.

Palavras chave: Energia limpa. Energia renovável. Biogás. Biodigestores. Gases do efeito estufa.

ABSTRACT

In 2020, Brazil ranked 5th in the world ranking of milk production. This large production is directly related to the amount of waste generated, which, when disposed of incorrectly, causes numerous environmental impacts. One of the solutions for the treatment of waste is biodigesters, that generate energy and organic compost. The work has the general objective of studying the potential for energy generation in biodigesters fed with bovine manure in a milk production property type "A". The project includes the study of the mathematical mathematical models, the anaerobic conversion of organic matter into methane and its conversion into electrical energy. The waste generation data reported by the studied dairy property were launched in three models of biogas generation to compare the scenarios of the potential for energy generation. In parallel, the purchase and maintenance quotation of the biodigester was carried out, in line with the generation of waste from the property to support the analysis of the return on capital (payback) with energy savings. The results showed that the methane generation estimated by the mathematical models is sufficient to make the property self-sufficient in electricity, and the return time of the project is 4 years. Regarding the environmental aspects, the implication of the biodigester involved the environmental impacts of the dairy activity providing a better management of the generated jets.

Keywords: Clean energy. Renewable energy. Biogas. Biodigesters. Energy use of waste. Greenhouse gasses.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás – Associação Brasileira do Biogás

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

CBIO – Crédito de Descarbonização

CIBiogás – Centro Internacional de Energias Renováveis

CNI – Confederação Nacional da Indústria

COP21 – 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

EBA – European Biogas Association

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

GIE – Gas Infrastructure Europe

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GN – Gás natural

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

Nm³ – Normal metro cúbico

PIB – Produto Interno Produto

PNMC – Política Nacional da Mudança do Clima

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RenovaBio – Política Nacional de Biocombustíveis

TIR – Taxa Interna de Retorno

VPL – Valor Presente Líquido

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Distribuição percentual do número de estabelecimentos e da produção de leite

FIGURA 2 – Fluxograma simplificado do processo de digestão anaeróbia

FIGURA 3 – Representação do biodigestor modelo indiano

FIGURA 4 – Representação do biodigestor modelo chinês

FIGURA 5 – Representação do biodigestor modelo canadense

FIGURA 6 – Classificação das plantas de biogás de acordo com a localização

FIGURA 7 – Classificação das plantas de biogás de acordo com a escala de produção

FIGURA 8 – Classificação das plantas de biogás de acordo com a fonte de substrato

FIGURA 9 – Animais durante a ordenha mecânica

FIGURA 10 – Dejetos gerados na rampa de alimentação encaminhados para pesagem

FIGURA 11 – Despejo do dejetos direto no solo

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Comparação de pesquisas com aplicação de biodigestores para geração de energia utilizando dejetos

TABELA 2 – Equações utilizadas por Santos & Nogueira (2012) para obter a produção de biogás

TABELA 3 – Equação utilizadas Kunz & Oliveira (2006) para obter a produção de metano

TABELA 4 – Equações utilizadas Chen & Hashimoto (1978, apud POULSEN, 2003) para obter a produção de metano

TABELA 5 – Informações sobre as empresas contatadas e o tipo de tecnologia

TABELA 6 – Comparação da porcentagem de metano na composição do biogás

TABELA 7 – Equação utilizada por Barros, Filho & Silva (2014) para obter o potencial de energia a partir do metano

TABELA 8 - – Orçamento para construção do biodigestor na propriedade

TABELA 9 – Valores adotados em cada etapa de cálculo para a estimativa de metano, biogás, energia e de receita

TABELA 10 – Resultados do potencial de geração de biogás, metano, energia e receita para a propriedade leiteira estudada

TABELA 11 – Análise do fluxo de caixa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Contextualização do setor leiteiro no Brasil	15
3.2. Processo de produção do leite tipo “A”	16
3.3. Destinação dos resíduos animais	16
3.4. Aproveitamento dos dejetos animais	17
3.5. Biodigestão anaeróbica	17
3.6. Biodigestores	19
3.7. Panorama da produção de biogás do Brasil	21
3.7.1. Panorama das iniciativas e programas de incentivo à produção de biogás	24
3.8. Aplicação de biodigestores no tratamento de dejetos e na geração de energia	27
3.9. Roteiros de cálculo para estimativa de produção de biogás em biodigestores operados com dejetos de animais	29
3.9.1. Roteiro utilizado por Santos & Nogueira (2012)	29
3.9.2. Roteiro utilizado por Kunz & Oliveira (2006, apud MITO et al, 2019)	29
3.9.3. Roteiro utilizado por Chen & Hashimoto (1978, apud POULSEN, 2003)	30
4. MATERIAL E MÉTODOS	31
4.1. Revisão bibliográfica	31
4.2. Caracterização da propriedade	31
4.3. Pesquisa de mercado	31
4.4. Análise de viabilidade financeira	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1. Diagnóstico das práticas adotadas na propriedade	35
5.2. Análise da viabilidade financeira	37
5.2.1. Custos de investimento, operação e manutenção	37
5.2.2. Receitas da economia de energia	38
5.2.3. Comparação da economia de energia em relação ao retorno	39
6. CONCLUSÃO	41
7. REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Anuário Leite de 2021 da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, o Brasil ocupou o 5º lugar no ranking mundial de produção de leite em 2020, representando cerca de 25 milhões de toneladas de leite produzidas. Destas, 27,11% é originário do estado de Minas Gerais, o maior polo leiteiro brasileiro (HOTT, ANDRADE e MAGALHÃES, 2021). Considerando as pessoas envolvidas em todos os níveis da atividade leiteira, o ramo pecuário empregou cerca de 4 milhões de pessoas em 2020, assim como, também representou 26,6% do Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio, de acordo com os estudos realizados pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, CEPEA (CEPEA, 2021).

Conforme a Pesquisa da Pecuária Municipal (2020), feita pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), existem 218 milhões de cabeças de gado no Brasil, dessas, 16,2 milhões são fêmeas leiteiras. Considerando que cada vaca leiteira produz, em média, 45 kg/dia de dejetos (KONZEN & ALVARENGA, 2009), estimam-se que sejam geradas cerca de 730 mil toneladas/dia. Essa elevada quantidade de resíduos gerados na produção leiteira, caso não seja gerenciada de forma adequada nas propriedades rurais, pode gerar diversos impactos ambientais.

De acordo com Barbosa e Langer (2011), o descarte incorreto dos dejetos bovinos pode ocasionar diversos impactos ambientais como: agravamento do efeito estufa, devido a geração de metano a partir das fezes; eutrofização e redução dos níveis de oxigênio dissolvido em corpos d'água superficiais, acarretando na mortalidade de animais aquáticos; e a proliferação de vetores.

Por outro lado, os dejetos da pecuária leiteira possuem uma alta biodegradabilidade e elevado potencial para a geração de metano, via biodigestores anaeróbios, os quais podem ser utilizados para gerar energia e alimentar a própria propriedade.

Conforme o art. 19 da Lei 12.305 de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos deve realizar um diagnóstico da situação dos resíduos gerados no respectivo território, dentre estes estão os agrossilvopastoris (BRASIL, 2010). Desta forma, o levantamento de dados a respeito da geração, da destinação final e das práticas adotadas nas propriedades previstas, vai ao encontro da legislação vigente.

Em relação aos tipos de tratamento dos dejetos bovinos, um dos métodos utilizados é o uso dos biodigestores (SILVA, 2018; MATOS, 2016). Segundo Nogueira (1986), estes consistem numa câmara hermeticamente fechada onde ocorre a biodigestão/fermentação bacteriana anaeróbia da matéria orgânica. Quando metabolizado, o resultado é uma mistura de compostos reduzidos (biofertilizante) e gases (biogás), cuja composição é dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4), majoritariamente. O poder calorífico do biogás está na faixa de 5.000 a 6.000 kcal/m³, dependendo da porcentagem de metano presente, segundo Filho (1981).

A partir da geração do metano nos biodigestores, uma das possibilidades de aplicação seria na geração de energia e sua utilização no processo de produção do leite tipo “A”, reduzindo os custos com energia da refrigeração e da ordenha mecânica. Dias et al (2013), utilizou o biogás de uma granja suinícola de pequeno porte (aproximadamente 100 animais) para a cogeração de energia e a substituição do gás GLP (gás liquefeito de petróleo). Como resultado, os autores concluíram que o tempo de retorno (tempo de *payback*) dos gastos com construção, manutenção e depreciação, é de cerca de 2 anos.

Já o estudo realizado por Klavon, et al (2013), verificou que a produção de biogás e comercialização da energia não se mostrou um atrativo muito rentável para as condições do mercado nas pequenas fazendas dos Estados Unidos, sendo o uso na propriedade a opção mais adequada.

O estudo foi desenvolvido em uma propriedade leiteira do município de Divinolândia, São Paulo. A propriedade possui 220 vacas, sendo que 150 destas estão em fase de lactação, e produzem 3.600 litros de leite por dia.

2. OBJETIVOS

A presente pesquisa tem por objetivo geral o estudo do potencial de geração de energia em biodigestores alimentados com dejetos bovinos em uma propriedade de produção de leite tipo “A”. Nesse sentido, os objetivos específicos são:

- Realizar um diagnóstico dos resíduos sólidos gerados e das práticas de manejo adotadas na propriedade selecionada do setor pecuário leiteiro;
- Montar cenários do balanço energético da geração e do consumo no processo de produção do leite tipo “A”;
- Elaborar um estudo econômico-financeiro dos investimentos para aquisição e operação do biodigestor e o tempo de retorno.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

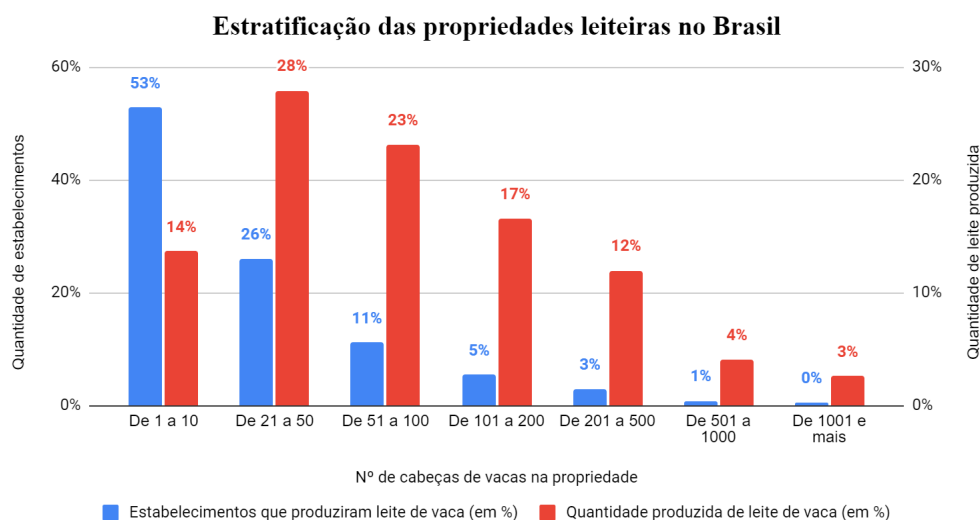
3.1. Contextualização do setor leiteiro no Brasil

Segundo o Anuário Leite 2021, o Brasil produziu 35,5 bilhões de litros de leite em 2020. A bovinocultura de leite representa uma parcela significativa do ramo do agronegócio no país, tanto que, desde os anos 2000, a produção brasileira de leite aumentou 76%. Este aumento no volume do leite, segundo Maia et al (2013), teve como principais fatores o aumento da capacidade produtiva e o crescimento da produtividade do rebanho, devido às novas tecnologias e pesquisas acerca da qualidade de vida dos animais.

O mercado brasileiro, apesar de possuir características singulares que proporcionam o aumento da oferta de leite, é bastante fragmentado. De acordo com Carvalho e Rocha (2019), as 4 maiores empresas do ramo leiteiro no Brasil, representam 28% do total produzido, enquanto em outros países, cuja produção também é expressiva, tem essa porcentagem entre 40% e 90%. Esta fragmentação, conforme os mesmos autores, gera problemas para a competitividade e evolução do setor, como: “alto custo de captação do leite, baixo poder de negociação na compra de insumos, reduzido poder de mercado na venda de produtos, concorrência predatória entre as empresas, limitada capacidade de investimentos e de inovação e baixa coordenação setorial”.

A fragmentação do setor pecuário leiteiro brasileiro é confirmada pela heterogeneidade das propriedades rurais. De acordo com o Censo Agropecuário de 2017 do IBGE, 53% das propriedades leiteiras possuem de 1 a 20 cabeças de gado e produzem 14% da produção brasileira (FIGURA 1).

FIGURA 1 Distribuição percentual do número de estabelecimentos e da produção de leite



Fonte: Adaptado de Censo Agropecuário de 2017 (2022)

Apesar disto, o país possui características que permitem o crescimento do mercado de leite brasileiro, como por exemplo, a população continental, a grande extensão territorial, disponibilidade de grãos para a alimentação do gado e espaço para novas pesquisas e tecnologias (CARVALHO & ROCHA, 2019).

3.2. Processo de produção do leite tipo “A”

Segundo o Anexo I da Instrução Normativa nº 51 de 18 de setembro de 2002 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o processo de produção do leite pasteurizado tipo ‘A’ segue exigências ambientais e de qualidade que não permitem o contato manual, sendo extraído de forma totalmente mecânica, minimizando os riscos de contaminação no estabelecimento denominado “granja leiteira”. Além disso, o leite tipo “A” também pode ser classificado quanto seu teor de gordura em integral, padronizado, semidesnatado ou desnatado.

De acordo com o manual “Boas práticas de manejo – Ordenha” de Rosa et al (2009), a ordenha mecânica possibilita a extração de leite de forma mais rápida, prática e com menor contaminação quando comparada à manual. O leite é extraído a partir de equipamentos que causam um efeito de vácuo nas tetas da vaca, simulando os estímulos de um bezerro.

3.3. Destinação dos resíduos animais

Segundo o IBGE, no Informativo de Produção Pecuária Municipal de 2020, existem cerca de 218 milhões de cabeças de gado no Brasil. Destes, 16,2 milhões correspondem às vacas leiteiras, as quais produzem diariamente 45 kg de dejetos por animal (KONZEN E ALVARENGA, 2009). Desta forma, considerando o número de vacas leiteiras de 2020, são geradas 730.000 toneladas de dejetos por dia.

A disposição inadequada dos resíduos animais é um grande problema para os proprietários, pois além de causar prejuízos à saúde humana e animal, pode determinar maiores custos administrativos e causar impactos no meio ambiente. Um dos impactos ambientais decorrentes da disposição inadequada dos dejetos animais é a contaminação de cursos de água, pois pode alterar as características físicas, químicas e biológicas locais, além da possibilidade de causar a eutrofização dos corpos hídricos devido à alta concentração de nutrientes. O solo também pode sofrer degradação e contaminação dos dejetos quando dispostos diretamente como adubo sem maturação. Além disso, estes resíduos podem proliferar vetores de doenças, moscas, roedores, ocasionando problemas sanitários de saúde pública (BARBOSA & LANGER, 2011).

3.4. Aproveitamento dos dejetos animais

Os dejetos animais, apesar do seu potencial poluente, podem ser tratados e reaproveitados, produzindo biofertilizante, por meio da compostagem, e também biogás, através da biodigestão anaeróbica, por exemplo.

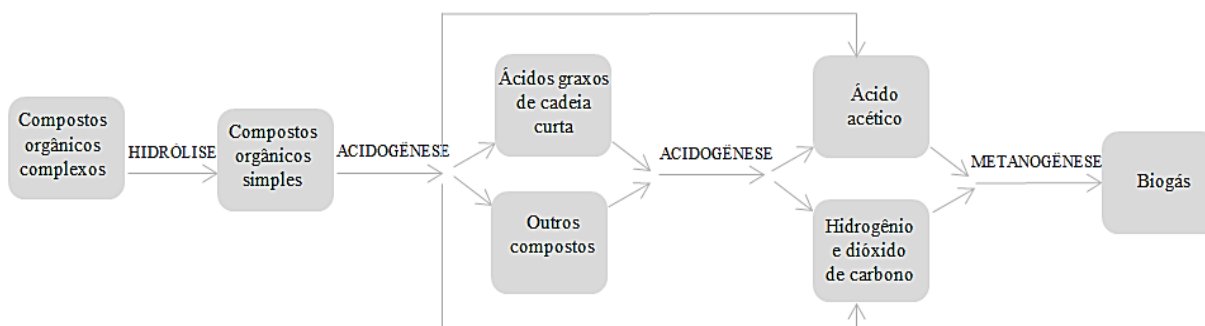
A compostagem é um método de tratamento de resíduos orgânicos que permite a reciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes ao solo, de forma fácil e prática. O processo consiste na humificação da matéria orgânica, ou seja, a transformação da massa heterogênea de resíduos em um composto homogêneo e nutritivo devido sua decomposição microbiana aeróbia (GONÇALVES et al, 2017). Após o composto estar totalmente estabilizado, ele age no solo de três maneiras: como condicionador das propriedades físicas do solo, como fertilizante de liberação gradual dos nutrientes e como ativador da ação biológica do solo (KIEHL, 1998).

Já a biodigestão anaeróbica, que será tratada com mais detalhes a seguir, é um processo biológico de decomposição anaeróbica da matéria orgânica, que diminui o potencial poluidor e os riscos sanitários dos resíduos orgânicos de alto teor de DBO (demanda bioquímica de oxigênio) (MOTTA, 2012). Este processo consiste numa opção de destinação final ambientalmente adequada dos resíduos, segundo o inciso VII do artigo 3º da PNRS (BRASIL, 2010), pois visa à reciclagem e o aproveitamento energético do resíduo.

Considerando a extensão de terras e a expressividade econômica do setor pecuário no Brasil, é necessário utilizar métodos adequados de tratamento de resíduos, tendo em vista o grande volume de geração diária de dejetos e sua alta concentração de matéria orgânica. Conforme Garcilasso et al (2018), os principais impactos ambientais causados pela pecuária são: altas taxas de desmatamento, tendo em vista a criação de pastagens; a degradação do solo e perda de nutrientes devido ao pisoteio; a contaminação do lençol freático; a eutrofização de corpos hídricos e; a emissão de gases do efeito estufa (GEE).

3.5. Biodigestão anaeróbica

O processo de biodigestão anaeróbia compreende necessariamente quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (FIGURA 2).

FIGURA 2 Fluxograma simplificado do processo de digestão anaeróbia

Fonte: Adaptado de Amaral, Steinmetz & Kunz (2019)

Segundo Amaral, Steinmetz & Kunz (2019), as fases da biodigestão ocorrem, em simbiose, de acordo com as seguintes etapas:

- **Hidrólise:** Nesta etapa, as bactérias hidrolíticas fermentativas liberam enzimas extracelulares que degradam os compostos mais complexos, como carboidratos, proteínas e gorduras, em compostos orgânicos simples, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos.
- **Acidogênese:** Os produtos resultantes da hidrólise são metabolizados por bactérias acidogênicas em ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas de um a cinco carbonos, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono.
- **Acetogênese:** A terceira etapa da biodigestão é considerada crítica ao processo, na qual os ácidos produzidos na acidogênese são metabolizados em ácido etanoico, hidrogênio e gás carbônico.
- **Metanogênese:** A etapa final do processo ocorre em condições estritamente anaeróbias. As archeas metanogênicas que atuam no sistema podem ser classificadas como acetoclástica ou hidrogenotrófica, sendo que a primeira converte acetato a metano, e a segunda, converte hidrogênio e gás carbônico a metano.

Como todo processo biológico, a biodigestão anaeróbia necessita de condições ideais no ambiente (reator) para obter a maior eficiência do processo. Quando estas condições são alteradas, pode-se interferir na degradação do substrato, no crescimento dos microrganismos, na quantidade e qualidade da produção de biogás e fertilizante, entre outros (MATOS, 2016). Os principais fatores que influenciam no processo de biodigestão são: temperatura, pH, tempo de retenção hidráulica (TRH), nutrientes e presença de inóculo.

O processo de biodigestão utiliza como fonte de matéria orgânica os resíduos urbanos e agrossilvipastoris, como por exemplo, a vinhaça, o esgoto sanitário, os resíduos alimentícios e os dejetos animais (SALOMON & LORA, 2009). O resultado da fermentação deste substrato é a geração de dois produtos: o biogás e o biofertilizante.

O biogás é uma mistura gasosa e combustível, cuja composição majoritária é gás metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2), sendo sua porcentagem variável com o tipo de substrato e de biodigestor. Por ter um alto poder calorífico (devido ao metano), pode substituir o carvão, o óleo e o gás natural, auxiliando na redução da emissão de GEE. Além disso, o biogás pode ser utilizado em atividades, como, aquecimento, geração de eletricidade, combustível para veículos e injeção em gasodutos (NEVZOROVA & KUTCHEROV, 2019).

Segundo Salomon & Lora (2009), as principais vantagens de produzir biogás são: geração de energia descentralizada, no próprio local de consumo; potencial de geração de renda extra na venda de energia excedente; redução de gastos com eletricidade; possibilidade de usar processos de cogeração e; redução das emissões de metano na atmosfera.

Já o biofertilizante, que também pode ser denominado efluente, é um adubo orgânico de alta qualidade cuja composição é cerca de 1,5 a 2,0% de nitrogênio, 1,0 a 1,5% de fósforo e 0,5 a 1,0% de potássio. Ademais, por ser um produto “curado”, trata-se de um adubo isento de agentes patológicos e possuem propriedades que reestabelecem o húmus do solo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas (FILHO, 1981).

3.6. Biodigestores

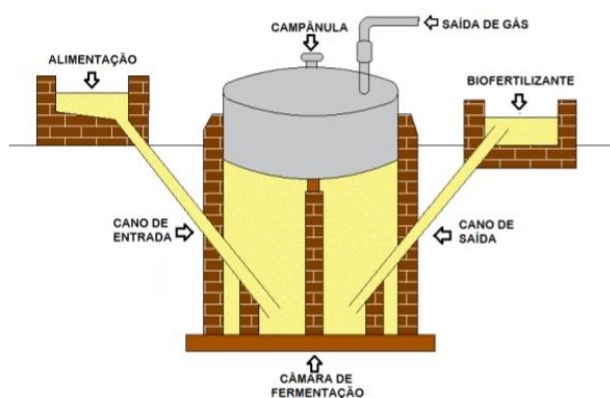
O processo de biodigestão anaeróbia ocorre dentro de biodigestores, que segundo Araújo (2017), são tanques hermeticamente fechados e impermeáveis, que criam um meio com condições propícias para que as bactérias metanogênicas atuem no substrato, fazendo com que moléculas mais complexas passem a ter estruturas mais simples.

Conforme Matos (2016), os biodigestores podem ser classificados de acordo com a forma de alimentação do reator (batelada ou contínuo). O reator cuja forma de operação é em batelada é destinada para propriedades que têm pequena produção de resíduos, pois é carregado em uma única vez, mantendo-se em digestão por um determinado tempo. Após o encerramento da produção de biogás, o biodigestor é aberto e descarregado, recomeçando o carregamento novamente. Já o reator de alimentação contínua necessita de ser alimentado regularmente para que a produção de biofertilizante e biogás seja constante.

Quando categorizados por modelo, existem três tipos principais: o biodigestor indiano, chinês e canadense.

O biodigestor indiano (FIGURA 3) é de alimentação contínua e apresenta uma campânula como gasômetro e uma parede central que divide o reator em duas câmaras, as quais permitem que o material fermentado possa circular em todo o biodigestor. O modelo indiano possui pressão constante, pois à medida que é produzido o gás, a campânula tende a movimentar-se para cima, aumentando o volume do tanque e, conseqüentemente, mantendo sua pressão interna constante (DEGANUTTI et al, 2002).

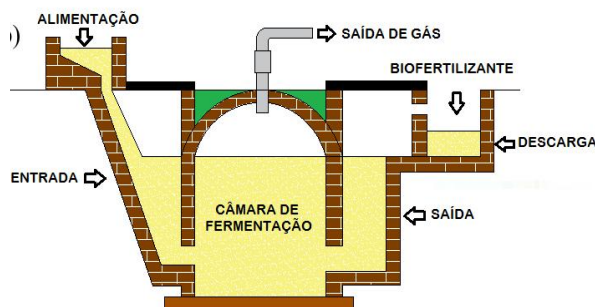
FIGURA 3 Representação do biodigestor modelo indiano



Fonte: Adaptado de Deganutti et al (2002)

Já o biodigestor chinês (FIGURA 4) consiste numa câmara cilíndrica de alvenaria com teto abobado e impermeável para o armazenamento do biogás. Este modelo trabalha com o princípio de prensa hidráulica, ou seja, quando há a produção de biogás, e o conseqüente aumento da pressão interna, o efluente fermentado é direcionado para a caixa de saída. Por serem construídos em alvenaria, os custos deste reator são reduzidos quando comparados ao modelo indiano, porém é necessário investir em vedação e impermeabilização da estrutura, para que não haja vazamento de biogás (DEGANUTTI et al, 2002).

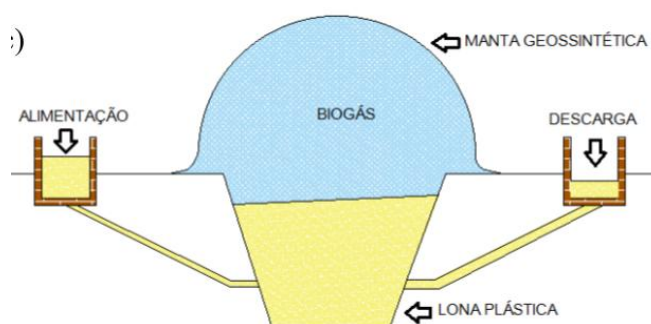
FIGURA 4 /Representação do biodigestor modelo chinês



Fonte: Adaptado de Deganutti et al (2002)

E por fim, o modelo canadense (FIGURA 5), também chamado de biodigestor de lagoa coberta, se trata de um tanque escavado no solo, impermeabilizado com uma lona plástica e coberto por uma manta geossintética (PVC, PEAD, etc.) de maneira a confinar os gases e acumular o biogás (AMARAL, STEINMETZ, KUNZ, 2019). O biodigestor canadense tem como vantagem a fácil construção e operação, seu baixo custo e a possibilidade de receber grande quantidade de resíduos, porém, em contrapartida, é mais sensível às alterações de temperatura e necessita de monitoramento e manutenção constante, para checar se existe algum vazamento de biogás ou efluente (ARAÚJO, 2017).

FIGURA 5 Representação do biodigestor modelo canadense



Fonte: Adaptado de Deganutti et al (2002)

3.7. Panorama da produção de biogás do Brasil

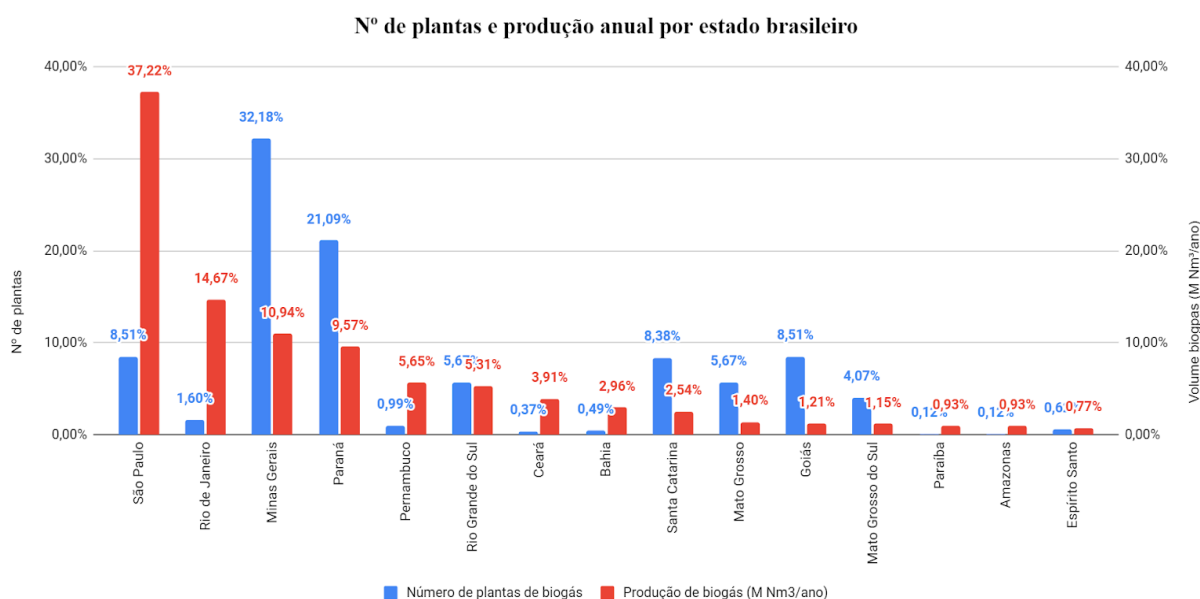
De acordo com o Centro Internacional de Energias Renováveis, CIBiogás, o Brasil apresentou um aumento de quase 300% no número de plantas de biogás entre 2017 e 2021 (CIBiogás, 2020). Atualmente, o país conta com 811 plantas de biogás, destas, 93% encontram-se ativas e gerando energia (755 plantas), 5% estão em fase de implantação (44 plantas) e 2% estão em reforma (12 plantas). Apesar desse expressivo crescimento no número de plantas, a geração de biogás no Brasil ainda é uma questão incipiente, posto que, ainda em 2016, a Europa já possuía 17.662 plantas de biogás, de acordo com a Gas Infrastructure Europe (GIE) e European Biogas Association (EBA) (2018).

Apesar do Brasil ter produzido cerca de 2,3 bilhões Nm^3 de biogás no ano de 2021, um aumento de 209% quando comparado com a produção de 2017, o país tem potencial para produzir 82 bilhões Nm^3/ano , segundo estimativas da Associação Brasileira do Biogás, ABiogás (2018). Essa considerável capacidade produtiva nacional advém, em sua maioria, do setor sucroenergético (41 bilhões Nm^3/ano), do setor agropecuário (37 bilhões Nm^3/ano) e do

setor de saneamento básico (3 bilhões Nm^3/ano). O montante é equivalente a 67 milhões de toneladas de petróleo ao ano ou 76 milhões de litros equivalentes de diesel.

O “*BiogasMap*” é um painel dinâmico criado pelo CIBiogás que tem o intuito de fornecer informações sobre as plantas de geração de biogás ativas no Brasil. A partir dos dados da ferramenta, foi possível visualizar as propriedades conforme sua localização geográfica (FIGURA 6).

FIGURA 6 Classificação das plantas de biogás de acordo com a localização



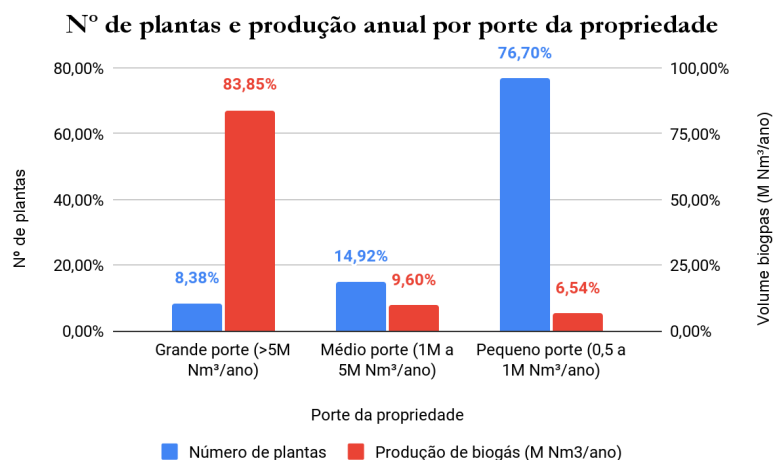
Fonte: Adaptado de CIBiogás (2022)

No que se refere à quantidade de plantas existentes, Minas Gerais lidera o ranking brasileiro, com 32,18% do total de propriedades geradoras de biogás, seguido do Paraná (21,09%), São Paulo (8,51%), Mato Grosso (8,51%) e Santa Catarina (8,38%). As unidades mineiras estão majoritariamente localizadas em propriedades rurais de pequeno porte que utilizam como substrato os resíduos da agropecuária. Além disso, estas unidades têm como foco a geração de energia elétrica *in loco*, ou seja, têm o intuito de garantir o consumo na propriedade e não fazer a aplicação do biogás na rede de distribuição (SOARES, 2022).

Todavia, quando se fala do volume anual de biogás gerado, quem lidera o ranking é o estado de São Paulo, representando 37,22% do total, seguido do Rio de Janeiro (14,67%), Minas Gerais (10,94%), Paraná (9,57%) e Pernambuco (5,65%). De acordo com o CIBiogás (2021), o Estado de São Paulo detém as plantas de grande porte – que produzem mais de 5 milhões de Nm^3 de biogás por ano – e estas, em sua maioria, utilizam resíduos do setor de saneamento.

Além da classificação das plantas de acordo com seu porte, também foi possível visualizar a relação entre o número de plantas e o volume de biogás produzido de acordo com o porte da propriedade, conforme mostra a Figura 7.

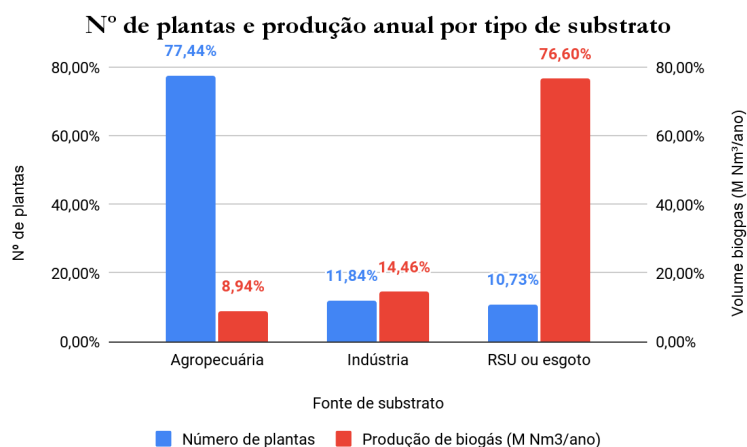
FIGURA 7 Classificação das plantas de biogás de acordo com a escala de produção



Observa-se que as propriedades de grande porte representam apenas 8,38% do número total de plantas no Brasil e são responsáveis por produzirem 83,85% de todo o volume produzido anualmente no país. Do outro lado, 76,70% das propriedades são de pequeno porte e produzem apenas 6,54% do volume nacional. De acordo com o CIBiogás (2021), a pulverização de pequenas propriedades agropecuárias contribui para que as plantas de pequeno porte sejam a maioria.

Por fim, também foi possível classificar as plantas de geração de biogás conforme a fonte de substrato utilizada no biodigestor (FIGURA 8).

FIGURA 8 Classificação das plantas de biogás de acordo com a fonte de substrato



77,44% das plantas de biogás utilizam resíduos da agropecuária como substrato e estas produzem somente 8,94% do volume anual. Nota-se que o setor ainda é incipiente e tem grande potencial de geração de biogás, visto que 27% do PIB brasileiro é voltado ao agronegócio (CEPEA, 2021). Por outro lado, apenas 10,73% das plantas de biogás produzem 76,60% do volume total anual e utilizam os resíduos sólidos urbanos e de saneamento como substrato. Isso se dá pois estes resíduos são utilizados em 80% das plantas de grande porte.

3.7.1. Panorama das iniciativas e programas de incentivo à produção de biogás

De acordo com Lima (2020), os principais fatores que influenciaram no aumento da visibilidade do setor de biogás no Brasil foram: a necessidade de diversificar a matriz energética, a grande disponibilidade de matéria-prima e a possibilidade de produzir energia renovável de forma descentralizada e sustentável. Diante disto, organismos governamentais e empresas privadas vêm promovendo iniciativas para a produção de biogás e biometano e seu aproveitamento energético, como será apresentado a seguir.

Um importante marco relacionado à produção e comercialização do biogás, foi a publicação da Resolução nº 482/2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Resolução, conforme dita seu artigo 1º, estabelece condições para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Em outras palavras, geradores de fontes renováveis que possuem uma potência instalada de até 75 kW, no caso da microgeração, ou entre 75 kW e 5 MW, no caso da minigeração, podem compensar a energia consumida na unidade, seja no consumo da rede elétrica da concessionária ou no envio da sua própria energia para a rede de distribuição (ABiogás, 2022).

No que se refere à regulamentação do setor, em 2015, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) publicou a Resolução nº 8, a qual regulamenta o uso de biometano no Brasil. De acordo com a Resolução, o biometano – biocombustível derivado da purificação do biogás – pode ter aplicações semelhantes ao gás natural (GN), ou seja, ter o mesmo uso e a mesma valoração econômica, desde que esteja dentro das exigências estabelecidas pela Resolução.

O uso de combustíveis de fontes renováveis no Brasil ganhou impulso com o implemento do RenovaBio, programa elaborado em 2017 pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Instituído pela Lei nº 13.576, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) tem como objetivo expandir o uso de biocombustíveis através da estruturação de uma política

tributária que fornece instrumentos para precificar a relação da eficiência energética e a emissões de gases.

Um dos instrumentos utilizados no Programa RenovaBio é o Crédito de Descarbonização (CBIO), um ativo financeiro negociável livremente em bolsa de valores, que permite que os produtores de biocombustíveis sejam remunerados por sua contribuição com a mitigação de emissão de GEE. Desta maneira, o CBIO se torna uma ferramenta para atingir a meta de aumentar a participação de bioenergia na matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, compromisso assumido na COP 21 (21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima) (STILPEN, STILPEN & MARIANI, 2018).

Em consonância à Resolução nº 8/2015 da ANP, o Governo Federal aprovou em 2021 a nova Lei do Gás (Lei nº 14.134). Esta Lei estabelece que, para todos os fins, o biometano e outros gases intercambiáveis com o gás natural terão tratamento semelhante ao GN, desde que estejam conforme às especificações da ANP. Assim, além de permitir que o biometano seja fungível com o GN na malha de gasoduto de transporte, a iniciativa também ampliou o entendimento de equivalência para as questões regulatórias, de modo a aumentar a segurança dos projetos de biometano (ABiogás, 2022). Conforme a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2021), a Nova Lei do Gás tem como objetivo promover a criação de um mercado de gás natural aberto, dinâmico e competitivo, de forma a atrair investimentos, ampliar a infraestrutura e gerar competitividade para reduzir os custos de produção e o preço final para o consumidor.

Em março de 2022, o Governo Federal publicou o Decreto nº 11.003 que institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano, cujo objetivos são incentivar programas e ações para a redução da emissão de metano e fomentar o uso de biogás e biometano como fonte renovável de energia. Ademais, dentre as diretrizes apresentadas no decreto estão: incentivar o mercado de carbono quanto ao crédito de metano, promover a implantação de biodigestores e promover o desenvolvimento de pesquisas científico-tecnológicas e de inovações.(BRASIL, 2022).

No âmbito do Decreto nº 11.003/2022, o Governo Federal também publicou a Portaria nº 71/2022 do Ministério do Meio Ambiente (MMA), o qual institui o Programa Nacional de Redução de Metano de Resíduos Orgânicos, também denominado como Metano Zero. De acordo com o artigo 3º desta Portaria, os objetivos do Programa Metano Zero são: reduzir as

emissões de metano, utilizar o biogás e biometano como fontes renováveis de energia e combustível e fomentar acordos setoriais visando o uso sustentável dos gases e a redução das emissões de metano.

Além disso, o país ainda apresenta alguns programas de financiamento para projetos em biogás, dos quais pode-se citar o Plano Safra, o Fundo Clima e o Programa ABC.

Criado em 2003, o Plano Safra é um programa do Governo Federal que tem como objetivo destinar recursos públicos para financiar projetos e atividades do ramo agropecuário. Lançado anualmente, o Plano Safra oferece duas linhas de crédito para o pequeno, médio e grande produtor: crédito de custeio e crédito de investimento. A linha de crédito de custeio é a modalidade direcionada principalmente para despesas normais do ciclo produtivo das lavouras, como sementes, defensivos agrícolas, fertilizantes e ração. Já a linha de crédito de investimento é aplicada em caso de aquisição de bens com longo prazo de retorno como por exemplo, máquinas, equipamentos, veículos, animais, ampliação de benfeitorias, implantação de sistema de irrigação, entre outros (MAFRA, 2022).

De acordo com a ABiogás (2021), o Plano Safra 21/22 destinou cerca de 250 bilhões de reais para suas linhas de fomento, destes, 20 milhões de reais foram destinados para projetos de biogás e biometano.

O Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, ou Fundo Clima, é um dos instrumentos da Política Nacional da Mudança do Clima (PNMC) no qual o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) se dispõe para fornecer recursos para projetos ou estudos e financiamento de empreendimentos para a mitigação das mudanças climáticas. De 2011 a 2021, o Fundo financiou cerca de 900 milhões de reais, distribuídos entre seus nove programas, dentre eles o programa de “Energias Renováveis” e “Resíduos Sólidos” (ABiogás, 2022).

O Programa ABC é a linha de crédito do Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC). Criado na safra 2010/2011 pelo MAPA, o Programa tem como objetivo investir em práticas e tecnologias sustentáveis que reduzam a emissão de GEE. Para o programa que trata especificamente sobre Tratamento de Dejetos, o Programa ABC destinou cerca de 67 milhões de reais em projetos de implantação, melhoria e manutenção de sistemas de tratamento de resíduos animais para a geração de energia e compostagem (PALAURO, 2021).

3.8. Aplicação de biodigestores no tratamento de dejetos e na geração de energia

Vários trabalhos têm sido realizados acerca da produção de biogás a partir de dejetos animais em biodigestores com o objetivo de geração de energia. Alguns dos resultados destas pesquisas estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 Comparação de pesquisas com aplicação de biodigestores para geração de energia utilizando dejetos

Número de animais	Quantidade de dejetos (m ³ /dia)	Volume de biogás (m ³ /dia)	Potencial de geração de energia (kWh/dia)	Fonte
1.000 (suíno)	85	933	879,5	Coldebella (2006)
2.000 (suíno)	17,4	301	575,3	Prati (2010)
3.000 (suíno)	40	600	360	Prati (2010)
4.760 (suíno)	36	430,8	324,5	Silva et al (2018)
4.868 (suíno)	Não informa	586	800	Souza et al (2013)
4.875 (bovino e suíno)	63,36	498,5	850,26	Motta (2012)
4.885 (suíno)	49,95	183,585	262,53	Damaceno et al (2017)
8.000 (suíno)	62,73	1.086,83	1.380,4	Antonio et al (2018)
22 (bovino)	0,38	14,04	30,92	Adam et al (2014)
25 (bovino)	0,675	13,35	51,4	Hamid & Blanchard (2018)
40 (bovino)	Não informa	17,6	37,1	Nunes (2014)
68 (bovino)	1,02	40,8	76,16	Santos & Moraes (2009)
80 (bovino)	2,12	52,67	81	Junqueira (2014)
130 (bovino)	6,5	127,4	96,9	Coldebella (2006)
240 (bovino)	10,29*	427,2	348,15	Hirano & Silva (2018)
350 (bovino)	7	161,87	165,9	Grimello & Velázquez (2013)
5.000 (bovino)	71,44*	4.292,26	7.726	Montoro et al (2014)
5.000 (bovino)	74,73*	3.741,9	7.520	Montoro et al (2017)

* O volume de dejetos (m³) foi estimado a partir do peso específico, considerando que o peso específico do esterco bovino é 933 kg/m³, conforme encontrado no trabalho de Santos & Nogueira (2012).

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Percebe-se na Tabela 1, que existe um desalinhamento entre o número de animais e a quantidade de dejetos gerados. Algumas justificativas para tal diferença são: o biodigestor não processa todo o dejetos gerado na propriedade; há acréscimo de água na mistura; presença de outros materiais no substrato, como palha, cama animal, que alteram a produção de biogás.

Com o objetivo de analisar a viabilidade econômica da implantação de biodigestores contínuos com fluxo tubular para o tratamento de dejetos bovinos, Montoro, Junior & Santos

(2014) realizaram um estudo teórico em uma propriedade localizada em Santo Anastácio (SP), que possui 5.000 bovinos de corte. Através de cálculos encontrados na literatura, foi estimada a produção de 4.292,26 m³ de biogás por dia, gerando 7.726 kWh de energia elétrica, além da produção de 3.312,5 kg diários de biofertilizante. Tendo em vista as receitas da geração de energia e da venda do biofertilizante e os gastos com o investimento inicial, a operação e a manutenção do biodigestor, os resultados se mostraram viáveis quanto à esfera econômica, posto que o tempo de retorno do capital investido foi de 3,5 anos e o índice de lucratividade foi de 106%.

Damaceno et al (2017) estudaram uma granja suinícola do Paraná, que portava 4.855 suínos. Os dejetos gerados eram direcionados para um biodigestor de 1.084,0 m³, que tinha capacidade de produzir, teoricamente, em um ano, 66.060 m³ de biogás, e, portanto, 94.509,5 kWh de energia elétrica, e cerca de 43.900 kg de biofertilizante, obtido, com a venda dos dois produtos, R\$121.200/ano. Considerando que o investimento inicial foi de R\$160.321 e os gastos anuais com manutenção, mão-de-obra e operação eram de R\$77.401, seria possível amortizar os gastos em 4 anos. O estudo demonstrou viabilidade financeira favorável.

O trabalho de Souza et al (2013) foi realizado em uma fazenda suinícola de São Miguel do Iguaçu, no estado do Paraná, que possuía 4.673 animais e dois biodigestores com uma geração média de 586 m³/dia de biogás, equivalente a 800 kWh/m³ em 10 horas de trabalho do grupo gerador-motor de 10 kVA. Em 5 anos seria possível amortizar os valores do investimento inicial, pois o custo de produção de eletricidade é de US\$59.11 MWh⁻¹ e o valor de venda da eletricidade sobressalente é de US\$68.96.

Já no trabalho de Cervi et al (2010), os autores tinham como área de estudo uma agroindústria de São Manuel (SP), a qual possuía 2.300 suínos, cujos dejetos eram encaminhados para um biodigestor de 496 m³. Para as condições da propriedade estudada, houve uma geração excedente de biogás que não era aproveitada e desta forma, os gastos de construção e manutenção anuais foram superiores ao valor de energia elétrica produzida, ou seja, os benefícios da geração de energia foram insuficientes para a cobertura dos custos anuais, em um amortecimento de 10 anos. Porém, conforme concluem os autores, se houvesse o estudo prévio da demanda de energia elétrica local, seria possível obter lucro na produção de biogás.

3.9. Roteiros de cálculo para estimativa de produção de biogás em biodigestores operados com dejetos de animais

3.9.1. Roteiro utilizado por Santos & Nogueira (2012)

Em seu trabalho, Santos & Nogueira (2012) estimam a produção de biogás utilizando as Equações 1 e 2, encontradas na Tabela 2. Para o cálculo de produção diária de esterco, os autores utilizam como referência que, diariamente, cada animal produz uma quantidade de esterco correspondente a 7% de seu peso vivo e que o dejetos bovino fresco tem capacidade de produzir 0,04 m³ de biogás por quilograma de esterco.

TABELA 2: Equações utilizadas por Santos & Nogueira (2012) para obter a produção de biogás

Numeração	Equação	Componentes
Eq. 1	$P_{Esterco} = PV_{Animal} \cdot 0,07 \cdot n$	$P_{Esterco}$: produção diária de esterco (urina + fezes) (kg.dia ⁻¹); PV_{Animal} : peso vivo do animal (kg); N: número de animais (adimensional).
Eq 2	$P_{Biogás} = P_{esterco} \cdot 0,04$	$P_{Biogás}$: produção diária de biogás (m ³ .dia ⁻¹); $P_{Esterco}$: produção diária de esterco (urina + fezes) (kg.dia ⁻¹).

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

3.9.2. Roteiro utilizado por Kunz & Oliveira (2006, apud MITO et al, 2019)

Kunz & Oliveira (2006) utilizaram a Equação 6 (TABELA 3), para estimar a produção diária de metano por meio de um cálculo que envolve a capacidade máxima teórica de produção de metano pelo dejetos, a concentração dos sólidos voláteis e o volume de dejetos diários.

TABELA 3: Equação utilizadas Kunz & Oliveira (2006) para obter a produção de metano

Numeração	Equação	Componentes
Eq. 3	$P_{metano} = B_0 \cdot SV \cdot n \cdot P_{esterco}$	P_{metano} : produção diária de metano (m ³ _{metano} .dia ⁻¹) B_0 : capacidade máxima teórica de produção de metano pelo dejetos (m ³ _{metano} .kg _{SV} ⁻¹); SV: concentração de sólidos voláteis (g _{SV} .L ⁻¹); N: número de animais; $P_{esterco}$: produção diária de dejetos animais (m ³ .dia ⁻¹).

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

3.9.3. Roteiro utilizado por Chen & Hashimoto (1978, apud POULSEN, 2003)

A Equação 4 (TABELA 4), que expressa a cinética da fermentação anaeróbia, representa a taxa de produção de metano. Para tal, utiliza como variáveis a capacidade máxima teórica de produção de metano (B_0), concentração de sólidos voláteis de efluente (SV), tempo de retenção hidráulica (θ), fator de inibição microbiológico (k) (Equação 5), a taxa de crescimento específico dos microrganismos (μ_m) (Equação 6) e o volume do biodigestor (V_{bio}).

TABELA 4: Equações utilizadas Chen & Hashimoto (1978, apud POULSEN, 2003) para obter a produção de metano

Numeração	Equação	Componentes
Eq. 4	$P_{metano} = \frac{B_0 \cdot SV}{\theta} \cdot \left(1 - \frac{k}{\theta \cdot \mu_m - 1 + k} \right) \cdot V_{bic}$	γ_v : taxa de produção de metano ($m^3_{metano} \cdot dia^{-1}$); B_0 : taxa máxima de produção de metano ($m^3_{metano} \cdot kg$ de SV^{-1}); S_0 : concentração de SV de efluente (g de SV. L^{-1}); θ : tempo de retenção hidráulica (dia); k : coeficiente cinético ou fator de inibição microbiológico (adimensional); μ_m : taxa de crescimento específico dos microrganismos (dia^{-1}); V_{bio} : volume do biodigestor (m^3).
Eq. 5	$k = 0,8 + 0,0016 \cdot e^{0,06 \cdot SV}$	k : coeficiente cinético ou fator de inibição microbiológico (adimensional); S_0 : concentração de SV de efluente ($kg \cdot m^{-3}$).
Eq. 6	$\mu_m = 0,013 \cdot T - 0,129$	μ_m : taxa de crescimento específico dos microrganismos (dia^{-1}). T : temperatura local ($^{\circ}C$).

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Revisão bibliográfica

Para a revisão bibliográfica, as publicações utilizadas no trabalho foram extraídas de bancos de dados como ASCE, EBSCO, Google Acadêmico, Science Direct, SciELO e Scopus. Para tal, foi utilizada a combinação das seguintes palavras-chaves (em português e em inglês): produção leiteira; vaca leiteira; biogás; biodigestão; biodigestor; esterco; dejetos animal; dejetos bovino; dejeções bovinas; geração de energia; ordenha mecânica e viabilidade econômica.

4.2. Caracterização da propriedade

O presente estudo foi desenvolvido em uma propriedade leiteira no município de Divinolândia, São Paulo. Para a caracterização da atividade leiteira no diagnóstico das práticas de manejo dos animais e dos dejetos foi realizada uma entrevista in loco para o levantamento de dados empíricos. A fazenda leiteira estudada possui um rebanho de 220 animais, destes, 150 estão em fase de lactação. Diariamente, o produtor realiza 3 ordenhas, produzindo, em média, 1.200 litros/ordenha, cuja produtividade varia de acordo com o período do ano: nos períodos mais quentes (verão) são produzidos 28 litros/vaca e nos mais frios (inverno), 32 litros/vaca.

Em função das medidas de isolamento social decorrentes da pandemia da COVID-19 as visitas a campo para coleta de dados da geração e das práticas de gestão dos dejetos foram canceladas pelo proprietário. Nesse período foi enviado um questionário ao responsável pela propriedade para o levantamento de algumas informações disponíveis, tais como a quantidade de dejetos, consumo de energia, produção de leite, número de animais, tamanho da propriedade, tipo de abastecimento.

Com a flexibilização do isolamento social a partir de setembro, retomou-se o contato com o proprietário, que autorizou uma visita que foi realizada nos dias 11 e 12 de novembro. Na ocasião, foi realizada a coleta e pesagem dos dejetos, aferida as informações passadas pelo questionário, quantificada a produção de leite e observadas as ações e os procedimentos relativos ao manejo dos dejetos.

4.3. Pesquisa de mercado

A fim de encontrar o maior número de empresas que comercializam biodigestores com tecnologia a nível nacional e internacional, foi feita uma busca no Google com a combinação

das seguintes palavras-chave: empresa; biodigestor; biodigestor rural; orçamento e; preço. Após esta pesquisa, foram identificadas e listadas 12 empresas (TABELA 5), as quais foram contatadas por meio de um e-mail padrão contendo as informações relativas à capacidade de produção de dejetos da propriedade, visando obter o orçamento para a construção de um biodigestor alinhado às características do rebanho.

TABELA 5 Informações sobre as empresas contatadas e o tipo de tecnologia

Descrição	Tipo de tecnologia	Estado
Empresa A	Biodigestor tubular	São Paulo
Empresa B	Biodigestor em PEAD	São Paulo
Empresa C	Biodigestor em PEAD	São Paulo
Empresa D	Biodigestor lagoa coberta	São Paulo
Empresa E	Biodigestor em cúpula	Minas Gerais
Empresa F	Biodigestor estilo chinês	Minas Gerais
Empresa G	Biodigestor estilo chinês	Minas Gerais
Empresa H	Biodigestor em PEAD	Santa Catarina
Empresa I	Biodigestor em PEAD	Rio de Janeiro
Empresa J	Biodigestor tubular	Paraná
Empresa K	Biodigestor tubular	Distrito Federal

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

No primeiro levantamento de dados para o dimensionamento do biodigestor, realizado em entrevista com o proprietário por vídeo-chamada, foi considerada a geração de dejetos de 150 vacas em fase de lactação, pois, como estas permanecem confinadas no galpão e na sala de ordenha, seria possível destinar todo resíduo para o biodigestor. Já o restante do rebanho, por permanecer no pasto, a coleta dos dejetos seria inviável.

Entretanto, com a liberação parcial do isolamento social imposto pela pandemia, foi possível realizar um campo na propriedade no mês de novembro para a pesagem efetiva dos dejetos recolhidos, que totalizaram 2,5 toneladas por dia. Esta quantidade é inferior à apresentada na literatura para um rebanho de 150 vacas. No campo foi possível observar que apenas os dejetos gerados na rampa de alimentação eram recolhidos, os dejetos gerados no galpão e na sala de ordenha não eram coletados. Esta menor quantidade de dejetos coletados obtida na pesagem de campo exigiu diversos ajustes, desde o dimensionamento do biodigestor, que demandou um novo orçamento com a Empresa A, como também nos cálculos da viabilidade financeira.

4.4. Análise de viabilidade financeira

A análise de viabilidade econômica pode ser dividida em três etapas:

- 1ª etapa: Estimativa na produção de metano e conversão em energia elétrica

Para estimar a produção de metano no biodigestor da propriedade, foram utilizados 3 roteiros de cálculo, ajustados às características da fazenda em estudo, descritos no item 3.6 da Revisão Bibliográfica. Entretanto, alguns modelos de geração de biogás utilizam o número de animais como variável para estimar a quantidade de dejetos na alimentação do biodigestor.

Como descrito anteriormente, apenas parte dos dejetos gerados pelo rebanho de 150 animais é coletado, portanto, a utilização de 150 animais nos cálculos levou a uma condição irreal e superdimensionada. Assim, para ajustar o número de animais lançados nos modelos, foi adotado que cada animal gera 45 kg de dejetos/dia (KONZEN & ALVARENGA, 2009). Portanto, a partir da quantidade de dejetos medida em campo (2,5 t/dia), estimou-se o número de animais correspondente utilizando-se os valores de Konzen & Alvarenga (2009), resultando em 56 animais.

A partir da quantificação dos dejetos estimou-se a geração de biogás pelo roteiro matemático 1, utilizado por Santos & Nogueira (2012) e também pelo valor fornecido pela cotação da Empresa A. Para o cálculo do potencial de geração de energia, foi necessário definir a porcentagem de metano presente no biogás. Assim, de acordo com a literatura, definiu-se para o estudo que 60%, em volume, da composição do biogás é referente ao volume de metano, conforme mostra a Tabela 6.

TABELA 6 Tabela de comparação da porcentagem de metano na composição do biogás

Porcentagem de metano na composição do biogás	Tipo de dejetos	Fonte
60%	Bovino	Lins, Mito e Fernandes (2015)
60%	Bovino	Grimello & Velázquez (2013)
Entre 60 % a 70%	Bovino	Matos (2016)

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

A partir do volume de metano presente no biogás, foi possível estimar a geração de energia disponível por ano (kWh) por um grupo motor-gerador, que utiliza como combustível o metano, através da Equação 8 (TABELA 7), utilizada no trabalho de Barros, Filho & Silva (2014).

TABELA 7 Tabela da equação utilizada por Barros, Filho & Silva (2014) para obter o potencial de energia a partir do metano

Numeração	Equação	Componentes
Eq. 8	$P_{energia} = \frac{Q \cdot PC_{metano} \cdot \eta}{31.536.000}$	$P_{energia}$: potencial de energia disponível por ano (kWh); Q: vazão de metano por ano (m³/ano); PC_{metano}: poder calorífico do metano (kJ/m³); η: eficiência do grupo motor gerador (%); h: horas de funcionamento do grupo motor gerador por ano (h); 31.536.000: segundos em um ano (s/ano).

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

- 2ª etapa: Estimativa das receitas e custos da implantação do biodigestor

Para o estudo da viabilidade foram considerados os custos de investimento, manutenção e operação do biodigestor e a receita advinda da economia de energia. É importante ressaltar que, neste estudo, a venda do biofertilizante não será considerada como fonte de receita, sendo aplicado em área da própria propriedade. Outro ponto considerado no descarte da venda do biofertilizante foi a necessidade de atender às especificações da Seção II da Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020, do MAPA, necessitando de novos investimentos, como por exemplo, barracão, leira de secagem e análises químicas.

Já os custos de operação e manutenção do biodigestor dimensionado foram fornecidos pela empresa contatada na pesquisa de mercado.

- 3ª etapa: Estudo financeiro

Dados os custos e receitas decorrentes da implantação do biodigestor, foi elaborado um fluxo de caixa com auxílio de planilha do Excel para verificar o tempo de recuperação do capital investido (payback). Além disto, para verificar a rentabilidade do projeto, a partir do fluxo de caixa, foram analisados o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Diagnóstico das práticas adotadas na propriedade

Para a realização da atividade leiteira, a propriedade de 40 hectares abriga um galpão de confinamento no modelo “*compost barn*”, cujo método consiste em cobrir parte da área com a cama dos animais (serragem e palha de arroz); um estábulo para o tratamento das vacas no pré-parto; uma sala de ordenha; e um galpão para armazenagem de equipamentos, ração, silagem e maquinários. A propriedade também conta com uma área para o plantio de milho, utilizado junto com a ração dos animais.

A propriedade possui cerca de 200 vacas leiteiras: 150 estão em fase de lactação e as demais em processo de pré-parto ou recria. As matrizes em lactação são divididas em quatro lotes e permanecem no confinamento e sala de ordenha, já o restante do rebanho fica em um estábulo comum com baias de alimentação ou soltas na pastagem. O tamanho do rebanho pode variar no ano devido a alguns fatores, como por exemplo, doenças, baixa produtividade, taxa de natalidade das fêmeas e número de partos.

O processo de ordenha ocorre três vezes por dia (das 02:00 às 06:00, das 10:00 às 14:00 e das 18:00 às 22:00). Em cada turno, o lote de animais em lactação é direcionado à sala de ordenha, onde são ordenhados 8 animais por vez (FIGURA 9). Em seguida, as vacas passam por uma caixa de concreto (pedilúvio), a qual contém uma solução desinfetante, à base de formol, cuja finalidade é impedir o avanço de brucas e proliferação de fungos nos cascos. Após este processo, os animais retornam para o galpão onde se localiza a cama e a rampa de alimentação.

FIGURA 9 Animais durante a ordenha mecânica



Fonte: Juliana Y. Watanabe

A rotina diária dos animais percorre dois ambientes: o galpão e a sala de ordenha. Como as vacas ficam a maior parte do tempo no primeiro ambiente, o local concentra maior volume de dejetos. As alas laterais do galpão, denominadas rampa de alimentação ou cochos de alimentação (FIGURA 10), consistem no local em que o dejetos é acumulado e são limpas com um raspador tracionado por um trator a cada 24 horas. Já na sala de ordenha, onde também há uma pequena produção de dejetos, a limpeza é realizada com água, que escoar até um pequeno córrego localizado na área externa logo após cada ordenha. A pesagem dos dejetos coletados diariamente da tampa de alimentação totalizou 2,5 ton/dia, que correspondem a cerca de 35% dos dejetos totais gerados na propriedade. Esta diferença se deve à impossibilidade de coleta dos resíduos animais misturados à palha do modelo “*compost barn*”.

FIGURA 10 Dejetos gerados na rampa de alimentação encaminhados para pesagem



Fonte: Juliana Y. Watanabe

Os dejetos produzidos na propriedade são aplicados *in natura* (sem tratamento prévio) na lavoura de milho duas vezes por semana, com o auxílio de uma carreta, conforme a FIGURA 11.

FIGURA 11 Despejo do dejetos direto no solo



Fonte: Juliana Y. Watanabe

Em relação ao consumo de energia, conforme o histórico da conta de energia da propriedade, a média é de 2.434 kWh/mês, ou 29.208 kWh/ano, com tarifa de R\$0,46303979/kWh.

5.2. Análise da viabilidade financeira

5.2.1. Custos de investimento, operação e manutenção

Apesar do contato com as 12 empresas, apenas uma empresa respondeu ao questionário. O primeiro orçamento enviado pela empresa foi realizado considerando 150 vacas em fase de lactação. Entretanto, após a pesagem dos dejetos, verificou-se que o biodigestor estava superdimensionado à necessidade energética da fazenda. Assim, foi solicitado um novo orçamento à Empresa A, desta vez, para um biodigestor dimensionado ao volume de dejetos realmente recolhidos, ou seja, 2,5 ton./dia. Desta forma, foi este segundo orçamento que foi considerado para o estudo de viabilidade do projeto, o qual corresponde a um biodigestor tubular de fluxo contínuo, com capacidade de produzir diariamente 75 m³ de biogás. A Tabela 8 apresenta os valores do custo de investimento.

TABELA 8 Orçamento para construção do biodigestor na propriedade

Descrição	Quantidade	Unidade	Preço Unitário (R\$)	Total (R\$)
Biodigestor Tubular (Manta PVC)	1	PC	13.751,40	13.751,40
Manta Geotêxtil	176,4	m ²	8,00	1.411,20
Lagoa Aeróbica (PVC 0,8 mm)	196	m ²	42,00	8.232,00
Dispositivo Gerador de Descarga	1	PC	8.500,00	8.500,00
Válvula de Alívio	1	unidade	250,00	250,00
Flange 6 polegadas	4	unidade	44,00	176,00
Flare	1	unidade	500,00	500,00
Outros (hospedagem, alimentação, transporte...).	1	-	2.550,00	2.55,00
			TOTAL	R\$ 35.370,60

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Os valores de custo de operação e manutenção do biodigestor, de acordo com a Empresa A, seria de R\$3.282,00 anuais. Este valor corresponde à depreciação do equipamento utilizado e às possíveis necessidades de manutenção.

5.2.2. Receitas da economia de energia

A Tabela 9 apresenta os valores adotados nos modelos matemáticos e nas estimativas de estimativas de potencial de geração de energia e de receita

TABELA 9 Valores adotados em cada etapa de cálculo para a estimativa de metano, biogás, energia e de receita

Autor do roteiro	Variável	Valor	Unidade	Fonte
Santos & Nogueira	Número de animais (n)	56	animais	Proprietário da fazenda
	Peso vivo animal (PV_{animal})	550	kg	Mito et al (2018)
Kunz & Oliveira	Capacidade máxima de produção de metano (B_0)	0,2	$m^3.kg_{sv}^{-1}$	Chen (1983)
	Concentração de sólidos voláteis (SV)	64,7	$g_{sv}.L^{-1}$	Chen (1983)
	Número de animais (n)	56	animais	Proprietário da fazenda
	Produção de dejetos (PD)	0,05768	$m^3.(anim.dia)^{-1}$	Mito et al (2018)
Chen & Hashimoto	Temperatura ($^{\circ}C$)	24	$^{\circ}C$	Temperatura média
	Concentração de sólidos voláteis (SV)	64,70	$g_{sv}.L^{-1}$	Chen (1983)
	Capacidade máxima de produção de metano (B_0)	0,2	$m^3.kg_{sv}^{-1}$	Chen (1983)
	Tempo de retenção hidráulica (θ)	30	doas	Empresa A
	Volume do biodigestor	156	m^3	Empresa A
Potencial de geração de energia	Poder calorífico do metano (PC)	35.530	kJ/m^3	Barros, Filho & Silva (2014)
	Eficiência (η)	28	%	Barros, Filho & Silva (2014)
	Horas de funcionamento do grupo motor-gerador (h)	5475	horas/ano	Proprietário da fazenda
Receita	Tarifa de energia de uso e distribuição	0,46303 979	reais	Proprietário da fazenda

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Desta forma, foi possível determinar o potencial de geração de biogás, de metano, de energia elétrica e a receita que corresponde à economia de energia pelo uso do biodigestor na propriedade leiteira, cujos resultados se encontram na Tabela 10.

TABELA 10 Resultados do potencial de geração de biogás, metano, energia e receita para a propriedade leiteira estudada

Informações	Santos & Nogueira	Kunz & Oliveira	Chen & Hashimoto	Empresa A
Geração de biogás (m ³ /ano)	31.477,60	25.426,65	31958,28	28.105,00
Geração de metano (m ³ /ano)	18.886,56	15.255,99	19.174,97	16.863,00
Geração de energia (kWh/ano)	29.786,41	24.060,56	30.214,27	26.595,01
Receita (R\$/ano)	13.792,00	11.141,00	14.002,91	12.314,55

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Comparando os dados da Tabela 10 com os apresentados na Revisão Bibliográfica, no item 3.5.1, nota-se que os valores de biogás obtidos estão acima dos encontrados na literatura. Esta diferença pode ser justificada pela especificidade de cada roteiro matemático utilizado; pela eficácia no recolhimento dos dejetos para alimentação do biodigestor e pelas diferentes espécies animais e às características/composição de seus dejetos. Porém, estas estimativas obtidas estão condizentes com os valores fornecidos pela Empresa A

Analisando a Tabela 10, os cenários de produção de metano, biogás e energia apresentam algumas diferenças nos resultados, provavelmente, devido às especificidades envolvidas em cada roteiro matemático. Para os cenários de Santos & Nogueira e de Chen & Hashimoto, o proprietário da fazenda teria autossuficiência energética, pois a estimativa de produção de energia foi superior ao consumo anual da propriedade, que é de 29.208 kWh. Já para os cenários de Kunz & Oliveira e da Empresa A, a estimativa de produção de energia foi inferior ao consumo da fazenda. Neste caso, uma solução para aumentar o potencial de geração de energia, seria coletar uma quantidade maior de dejetos para aumentar o potencial de geração de energia.

5.2.3. Comparação da economia de energia em relação ao retorno

O fluxo de caixa do projeto, considerando o horizonte de 15 anos de vida útil do biodigestor, conforme indicado pela Empresa A, e a taxa mínima de atratividade de 6% ao ano (Damaceno, 2015; Ricardo, 2012), pode ser encontrado na Tabela 11.

TABELA 11 Análise do fluxo de caixa

Informações	Santos & Nogueira	Kunz & Oliveira	Chen & Hashimoto	Empresa A
Taxa mínima de atratividade (a.a)		6%		
Período (anos)		15		
Investimento inicial (R\$)		35.370,69		
Custos anuais (R\$)		3.282,00		
Receita anual (biogás) (R\$)	13.524,47	7.859,00	10.242,47	9.032,55
Lucro anual (R\$)	10.242,47	7.859,00	10.242,47	9.032,55
Valor presente (R\$)	99.477,38	76.328,54	99.477,38	87.726,36
Valor presente líquido (R\$)	134.847,98	111.699,14	134.847,98	123.096,96
Tempo de retorno (anos)	4	6	4	5
Taxa interna de retorno (%)	28,27	20,94	28,27	24,59

Fonte: Elaborado pela autora (2020)

Analisando a Tabela 11, percebe-se que houveram algumas discrepâncias nos resultados alcançados devido às especificidades de cada roteiro. Contudo, para todos os 4 cenários, a implantação do biodigestor é lucrativa, com lucro anual médio de R\$12.812,69 (advindo da economia de energia) e TIR superior à Taxa Mínima de Atratividade. Além disso, o tempo de retorno foi de 4,75 anos, o que pode ser considerada baixa, tendo em vista a vida útil do biodigestor (15 anos). Os valores de tempo de retorno obtidos no presente estudo estão condizentes aos resultados encontrados nos trabalhos de Montoro, Júnior & Silva (2014), Damaceno (2017) e Souza et al (2013), por exemplo, que obtiveram tempo de amortização de 3,5, 4 e 5 anos, respectivamente, o que mostra que a implantação de biodigestores em propriedades rurais é lucrativa e com rápido tempo de retorno dos investimentos aplicados.

6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados, pode-se concluir que:

- A implantação do biodigestor na propriedade para tratar os dejetos gerados pela pecuária leiteira reduz os impactos ambientais da sua disposição “in natura” no solo;
- O potencial médio de geração de energia do biodigestor foi de 27.670,81 kWh. No cálculo foi considerado apenas uma parcela dos dejetos gerados, tendo em vista as práticas de manejo do rebanho e a infraestrutura da propriedade.
- A estimativa de geração de energia com base em dados da literatura pode levar a resultados superestimados, devido às particularidades das propriedades e a grande variação nos dados apresentados na literatura, o que dificulta o correto dimensionamento dos equipamentos, sem uma quantificação específica dos dejetos gerados;
- O tempo de retorno do capital investido no projeto a partir da economia de energia com a utilização do biodigestor foi de 4 anos; para o cálculo não foi considerada a possível receita advinda da comercialização do composto;
- A implantação do conjunto biodigestor e moto-gerador permite a autossuficiência energética da propriedade.

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa ANEEL Nº 482, de 17 de abril de 2012.** Disponível em: <<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=342518>>. Acesso em: 1 de setembro de 2022

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 8, de 2 de fevereiro de 2015.** Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-8-2015-estabelece-as-regras-para-aprovacao-do-controle-da-qualidade-e-a-especificacao-do-biometano-oriundo-de-aterros-sanitarios-e-de-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-destinado-ao-uso-veicular-e-as-instalacoes-residenciais-industriais-e-comerciais-a-ser-comercializado-em-todo-o-territorio-nacional>>. Acesso em: 15 de setembro de 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **PNBB - Programa Nacional do Biogás e Biometano.** São Paulo, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **PNBB - Programa Nacional do Biogás e Biometano.** São Paulo, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS. **Resumo: Plano Safra 21/22 vai financiar projetos de biogás e biometano.** ABiogás, 2021. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/resumo-plano-safra-21-22-vai-financiar-projetos-de-biogas-e-biometano/>>. Acesso em: 19 de setembro de 2022

ADAM, F. G.; et al. **Viabilidade econômica para implantação de biodigestores em pequenas propriedades rurais da bacia leiteira no município de Taquara – RS.** Porto Alegre, 2014. 4ª RenoMat - Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Souza-8/publication/267041963_VIABILIDADE_ECONOMICA_PARA_IMPLANTACAO_DE_BIODIGESTORES_EM_PEQUENAS_PROPRIEDADES_RURAI DA_BACIA_LEITEIRA_NO_MUNICIPIO_DE_TAQUARA_RS/links/5444565f0cf2e6f0c0fb9f5e/VIABILIDADE-ECONOMICA-PARA-IMPLANTACAO-DE-BIODIGESTORES-EM-PEQUENAS-PROPRIEDADES-RURAI DA-BACIA-LEITEIRA-NO-MUNICIPIO-DE-TAQUARA-RS.pdf> Acesso em: 04 de abril de 2019

AMARAL, A. C. D.; STEINMETZ, R. L. R., KUNZ, A. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia, 2019. Sbera, Embrapa.

ANTÔNIO, A. D. S.; et al. **Electricity generation from biogas on swine farm considering the regulation of distributed energy generation in Brazil: a case study for Minas Gerais.** Viçosa, 2018. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.38, n.4, p.518-525, jul./ago. 2018.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico.** Uberlândia 2017. 32f. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia.

BARBOSA, G; LANGER, M. **Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental.** Unoesc & Ciência. 2011.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. **The electric energy potential of landfill biogas in Brazil.** Energy Policy, v.65, p.150–164, 2014.

BRASIL. **Decreto nº 11.003, de 21 de março de 2022 que institui a Estratégia Federal de Incentivo ao Uso Sustentável de Biogás e Biometano.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11003.htm>. Acesso em: 10 de agosto de 2022

BRASIL. **Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 05 de abril de 2019.

CARVALHO, G. R.; ROCHA, D. T. D. **Desafios para a competitividade internacional.** 2019. Anuário Leite 2019. Embrapa. Págs. 34-35

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - BIOGÁS. **Biogasmap.** 2022. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojODc2NTlhOGItOTc2Ny00ZDc1LWl5MTMtYjYwZTRIYjFiOWQ3IiwidCI6ImMzOTg3ZmI3LTQ5ODMtNDA2Ny1iMTQ2LTc3MGU5MWE4NGViNSJ9&pageName=ReportSection6ed365e9760a3c113b0d>>. Acesso em: 04 de julho de 2022.

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - BIOGÁS. **Panorama do biogás no Brasil 2020.** 2021. Relatório técnico nº 001/2021, Foz do Iguaçu

CENTRO INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS - BIOGÁS. **Panorama do biogás no Brasil 2021.** 2022. Relatório técnico nº 001/2022, Foz do Iguaçu

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020.** 2021. 2018.

Disponível em: <https://cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/sut.pib_dez_2020.9mar2021.pdf>. Acesso em: 22 de junho de 2022

CERVI, R. G.; et al. **Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suínica para geração de energia elétrica.** Eng. Agríc., Jaboticabal, v.30, n.5, p.831-844, set./out. 2010

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.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do Biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais.** Cascavel, 2006. 74f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Nova Lei do Gás Natural: entenda quais os seus benefícios.** Indústria de A - Z. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/nova-lei-do-gas/>>. Acesso em: 10 de setembro de 2022

DAMACENO, F. M.; et al. **Aproveitamento agrônomo e energético de dejeções suínicas: estudo de caso com análise econômico-financeira.** Revista Agro@mbiente On-line, v. 11, n. 2, p. 174-180, abril-junho, 2017 Boa Vista, RR

DEGANUTTI, R., et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada.** Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

DIAS, M. I. A.; et al. **Viabilidade econômica do uso do biogás proveniente da suinocultura, em substituição a fontes externas de energia.** Revista Energia na Agricultura, Botucatu, vol. 28, n.3, p.155-164, julho-setembro, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Anuário leite 2018.** Disponível em: <embrapa.br/gado-de-leite>. Acesso em: 05 de abril de 2019

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Anuário leite 2021.** Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224371/1/Anuario-Leite-2021.pdf>>. Acesso em: 19 de agosto de 2022

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistema de Informações Geográficas dos Estudos do Planejamento Energético Brasileiro.** Disponível em: <<https://gisepe.epe.gov.br/WebMapEPE/>> Acesso em: julho de 2018.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Dairy Market Review: Overview of global dairy Market developments in 2018**. 2019.

FILHO, J. A. C. **Biogás, independência energética do Pantanal Matogrossense**. Circular técnica nº. 9. Corumbá, EMBRAPA, 1981.

GARCILASSO, V. P.; et al. **Tecnologias de produção de biogás e biometano**. IEE – USP. São Paulo, 2018.

GAS INFRASTRUCTURE EUROPE & EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. **European Biomethane Map**. Disponível em: <https://www.gie.eu/download/maps/2018/GIE_BIO_2018_A0_1189x841.pdf>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020

GONÇALVES, M. S.; et al. **Compostagem de esterco bovino de pequenas propriedades rurais para uso como fertilizante orgânico**. Curitiba, 2017. 8º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos.

GRIMELLO, R. D. D. N.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Aproveitamento do biogás proveniente de dejetos da bovinocultura para geração de energia – um estudo de caso**. São Paulo, 2013. Revista Mackenzie de Engenharia e Computação, v. 13, n. 1, p. 61-74.

HAMID, R. G.; BLANCHARD, R. E. **Assesment of Biogas as a Domestic Energy Source in Rural Kenya: Developing a Sustainable Business Model**. Renewable Energy (2018).

HIRANO, M. Y.; SILVA, C. L. D. **Dairy cattle biogas usage in microturbines for energy generation and thermal exploitation**. Bauru, 2018. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.38, n.4, p.526-535, jul./ago. 2018

HOTT, M. C.; ANDRADE, R. G.; MAGALHÃES, W. C. P. **Distribuição da produção de leite por estados e mesorregiões**. São Paulo, 2021. Anuário leite 2021: saúde única e total. p. 10

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agro 2017**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>>. Acesso em: 29 de agosto de 2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Pecuária Municipal 2018**. Rio de Janeiro, 2018. Vol. 46, p. 1-8. Disponível em: < <https://bibliote>

ca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/84/ppm_2018_v46_br_informativo.pdf>. Acesso em: 11 de abril de 2020

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Pecuária Municipal 2020**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=destaque>>. Acesso em: 22 de junho de 2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/94>>. Acesso em: 13 de abril de 2019

JUNQUEIRA, S. L. C. D. **Geração de energia através de biogás proveniente de esterco bovino: estudo de caso na fazenda Aterrado**. 2014. 55f. Dissertação (Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2014.

KIEHL, E. J. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. Piracicaba, 1998. 171p.

KLAVON, K. H.; et al. **Economic analysis of small-scale agricultural digesters in the United States**. Biomass and bioenergy. vol 54, pag, 36-45. 2013.

KONZEN, E. A.; ALVARENGA, R. C. **Fertilidade de solos**. In: MELHORANÇA, A. L. et al. Cultivo do milho. Sistemas de Produção, n. 2, set. 2009. Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_5ed/feroorganica.htm>. Acesso em: 06 de abril de 2019

LIMA, I. C. M. de A. **Perspectivas e propostas para a expansão do biogás no Brasil: uma análise de políticas públicas**. 2020. 141f. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.

LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. **Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa**. IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. Rio de Janeiro, RJ. 2015

MAFRA, E. **Entenda o que é um Plano Safra**. Forbes Agro, 2022. Disponível em: <<https://forbes.com.br/forbesagro/2022/06/entenda-o-que-e-um-plano-safra>>. Acesso em: 19 de agosto de 2022.

MAIA, G. P. D. S.; et al. **Produção leiteira no Brasil**. 2013. Agropecuária. BNDES Setorial 37, p. 371-398

MATOS, C. F. **Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção**. 2016. 52f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2016.

MILANEZ, A. Y; et al. **Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas**. BNDES Setorial 47, págs. 221-276. 2018. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15384/1/BS47__Biogas__FECHADO.pdf>. Acesso em: 20 de agosto de 2022

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Normativa nº 51, de 18 de setembro de 2002**. Disponível em: <<https://www.defesa.agricultura.sp.gov.br/legislacoes/instrucao-normativa-51-de-18092002654.html>> Acesso em: 05 de abril de 2019.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>> Acesso em: 10 de outubro de 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Portaria nº 71, de 21 de março de 2022**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mma-n-71-de-21-de-marco-de-2022-387378473>> . Acesso em: 03 de agosto de 2022.

MITO, J. Y. D. L.; et al. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Embrapa Suínos e Aves. Concórdia, 2018.

MONTORO, S. B.; JUNIOR, J. D. L.; SANTOS, D. F. L. **Economic and financial viability of digester use in cattle confinement for beef**. Jaboticabal, 2017. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.37, n.2, p.353-365, mar./abr. 2017

MONTORO, S. B.; et al. **Sustentabilidade energética e ambiental: viabilidade econômica da implantação de biodigestores anaeróbios para tratamento de dejetos bovinos**. Jaboticabal, 2014. XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014

MOTTA, K. U. **Avaliação da geração de biogás de um biodigestor de dejetos bovinos.** Curitiba, 2012. 126f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente Urbano e Industrial). Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI-PR e a Universidade de Stuttgart.

NEVZOROVA, T.; KUTCHEROV, V. **Barriers to the wider implementation of biogas as a source of energy: A state-of-the-art review.** Moscow, 2019. Energy Strategy Reviews 26. 100-414

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética.** 1986. São Paulo: Nobel.

NUNES, M. **Análise da viabilidade econômica para geração de energia elétrica através do uso de biodigestores em pecuária de leite de pequeno porte.** Curitiba, 2014. 22f. Trabalho de Conclusão de Curso (Educação Continuada em Ciências Agrárias) – Universidade Federal do Paraná.

PALAURO, G. **Programa ABC – Agricultura de Baixo Carbono.** Agroicone. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.agroicone.com.br/wp-content/uploads/2021/09/Guia-sobre-o-Plano-e-Programa-ABC_2021_Agroicone.pdf>. Acesso em: 1 de setembro de 2022.

POULSEN, T. G. **Solid Waste Management – Chapter 5 Anaerobic Digestion.** 2003. Aalborg University. Disponível em: <http://agrienvarchive.ca/bioenergy/download/intwastech5_poulsen_2003.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

PRATI, L. **Geração de energia elétrica a partir do biogás gerado por biodigestores.** Curitiba, 2010. 83 f. Dissertação de Conclusão de Curso (Graduação de Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Paraná.

RICARDO, C.M. **Avaliação econômica de biodigestores de fluxo tubular, com sistema de recirculação, no tratamento de dejetos suínos.** 2012. 72f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG, 2012.

ROSA, M. S. D., et al. **Boas práticas de manejo: ordenha.** Jaboticabal, 2009. Funep

SALOMON, K. R.; LORA, E. S. **Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil.** Itajubá, 2009. Biomass and bioenergy 33. 1101–1107

SANTOS, I. A.; MORAIS, M. A. **Aproveitamento de Biogás para Geração de Energia Elétrica a partir de Dejetos de Bovinos Leiteiros: Um Estudo de Caso na EAFMUZ.** In: I

Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Geração de Energia a partir de Resíduos Animais. Florianópolis, 2009

SANTOS, I. A.; NOGUEIRA, L. A. H. **Estudo energético do esterco bovino: seu valor de substituição e impacto da biodigestão anaeróbia**. 2012. Revista Agroambiental

SILVA, F. P. et al. **Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure**. Cascavel, 2018. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82. 3900–3906

SILVA, H. W. D. **Produção de biogás utilizando dejetos de vacas leiteiras – uma alternativa viável para redução de impactos ambientais**. 2018. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, ISSN 2358-5420, 13ª edição.

STILPEN, M. R.; STILPEN, D. V. D. S.; MARIANI, L. F. **ANÁLISE DO PROGRAMA RENOVABIO NO ÂMBITO DO SETOR DE BIOGÁS E BIOMETANO DO BRASIL**. Revista Brasileira de Energia, Itajubá, vol. 24, nº 4, págs. 7-17, 2018.

SOUZA, S. N. M .D.; et al. **Electric energy micro-production in a rural property using biogás as primary source**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 28. 2013. 385–391