

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

THIAGO ALEXANDRE STEFANI

VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BIOGÁS EM
PROPRIEDADES DE SUÍNOS EM TERMINAÇÃO

CASCVEL

2022

THIAGO ALEXANDRE STEFANI

VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO BIOGÁS EM
PROPRIEDADES DE SUÍNOS EM TERMINAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental – PPGETA, Setor Palotina, Área de Concentração em Tratamento, Aproveitamento e Valoração de Resíduos, da Universidade Federal do Paraná. Como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

CASCADEL

2022

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

S816 Stefani, Thiago Alexandre
Viabilidade de geração de energia elétrica usando biogás
em propriedades de suínos em terminação / Thiago Alexandre
Stefani. – Cascavel, PR, 2022.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Programa de Pós-Graduação Engenharia e Tecnologia
Ambiental – PPGET.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

1. Energia renovável. 2. Lcoe. 3. Potencial realizável
4. Valor presente líquido. I. Souza, Samuel Nelson Melegari
de. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 620.9

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **THIAGO ALEXANDRE STEFANI** intitulada: **Viabilidade de geração de energia elétrica utilizando biogás em propriedades de suínos em terminação**, sob orientação do Prof. Dr. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 18 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica
13/09/2022 12:24:53.0

SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
13/09/2022 16:22:39.0

MARCELO JOSE DA SILVA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
22/09/2022 21:25:54.0

RALPHO RINALDO DOS REIS
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
13/09/2022 16:36:42.0

JAIR ANTONIO CRUZ SIQUEIRA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO
PARANÁ)

RUA PIONEIRO, 2153 - Palotina - Paraná - Brasil
CEP 85950-000 - Tel: (44) 3211-8500 - E-mail: ppgeta@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.
Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 221972

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>
e insira o código 221972

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho, ajudando em meu aprendizado e crescimento pessoal. Em especial a minha família pelo suporte e apoio nas horas que não pude estar presente. Ao meu orientador Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza pelas diretrizes passadas para as pesquisas e execução do trabalho. Aos proprietários e administradores das plantas estudadas.

RESUMO

A demanda energética mundial tem avançado a cada dia, e para a maioria dos países a matriz energética tem grande importância no seu desenvolvimento, sendo que a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial, vem sendo objeto das mais elevadas preocupações ambientais. Enquanto as energias renováveis estão ganhando escala e atenção de vários países e empresas engajados em processos de produção mais limpos e ambientalmente mais corretos. O biogás está entre essas fontes limpas para suprir parte dessa demanda crescente. As atividades agrícolas possuem um grande potencial energético através do aproveitamento da biomassa gerada em diversas atividades. O objetivo geral do trabalho foi avaliar a viabilidade econômica de duas plantas de biogás para a produção de energia elétrica, instaladas na região Oeste do Paraná. Foram levantados os dados de implantação, manutenção, produção de energia e biogás com os proprietários e administradores do investimento, para então levantar o tempo de retorno do investimento. Foi calculado o Valor Presente Líquido (VPL) usando o Payback descontado, o Custo Nivelado de Energia (LCOE) e o Fator de Capacidade das duas propriedades em três cenários de taxas de juros diferentes, 4%, 8% e 12% ao ano. A propriedade 1 teve o custo nivelado de energia de R\$0,271/kwh, R\$0,325/kwh e R\$0,385/kwh respectivamente para taxas de juros de 4%, 8% e 12% ao ano. Todos abaixo dos R\$0,42/kwh recebidos pela venda da energia. Na propriedade 2 teve resultados parecidos com o custo nivelado de energia de R\$0,27/kwh, R\$0,323/kwh e R\$0,384/kwh respectivamente para taxas de juros de 4%, 8% e 12% ao ano. Todos também abaixo dos R\$0,42/kwh recebidos pela venda da energia. O cálculo da viabilidade econômica na propriedade 1 teve como resultado ao final do tempo estipulado de 20 anos os valores de R\$318.538,42, R\$133.598,97 e R\$18.448,56 para taxas de juros respectivas de 4%, 8% e 12% ao ano, mostrando viável para os três cenários de taxa de juros. E na propriedade 2 teve como resultados após 20 anos os valores acumulados de R\$322.168,67, R\$136.221,60 e R\$20.443,79 para taxas de juros respectivas de 4%, 8% e 12% ao ano, onde também se apresenta viável para os três cenários de juros. O Fator de Capacidade ficou em 35,08% para propriedade 1 e 35,21% para propriedade 2 para o cenário de 12% de juros ao ano.

Palavras-chave: Energia renovável. Valor presente líquido. Lcoe. Potencial realizável.

ABSTRACT

The world energy demand has been increasing every day, and, for most countries, the energy matrix has great importance in their development. Because of that, the participation of fossil fuels in the world energy matrix has been the subject of the deepest environmental concerns. Renewable energies are gaining scale and attention from several countries and companies engaged in cleaner and more environmentally friendly production processes, and biogas is among these clean sources to supply part of this growing demand. Agricultural activities have a great energy potential through the use of biomass generated in various activities. The general objective of the work was to evaluate the economic viability of two biogas plants installed in the western region of Paraná for producing electric energy. The data on implantation, maintenance, and production of energy and biogas were surveyed with the investment owners and managers to evaluate the investment's return time. The Net Present Value (NPV) was calculated using discounted payback and the Levelized Cost and Energy (LCOE), and the capacity factor of the two properties in three different interest rate scenarios, 4%, 8%, and 12% per year. Property 1 presented an LCOE of R\$0.271/kWh, R\$0.325/kWh, and R\$0.385/kWh, respectively, for interest rates of 4%, 8%, and 12% per year; all below the R\$0.42/kWh received for selling the energy. Property 2 showed similar results to the LCOE, being R\$0.27/kWh, R\$0.323/kWh, and R\$0.384/kWh, respectively, for interest rates of 4%, 8%, and 12% per year; all also below the R\$0.42/kWh received for the sale of energy. At the end of the stipulated 20-year period, the calculation of economic viability for Property 1 resulted in R\$318,538.42, R\$133,598.97, and R\$18,448.56 for interest rates of 4%, 8%, and 12% per year, showing viability for the three interest rate scenarios. Property 2 presented as results, after 20 years, the accumulated values of R\$322,168.67, R\$136,221.60, and R\$20,443.79 for respective interest rates of 4%, 8%, and 12% per year, also showing viability for the three interest rate scenarios. The Capacity Factor was 35.08% for property 1 and 35.21% for property 2 for the 12% interest rate per year scenario.

KEYWORDS: Renewable energy. Net present value. Lcoe. Realisable potential.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL DIVIDIDA NA SUA OFERTA INTERNA DE ENERGIA	19
FIGURA 2 – POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DE BIOGÁS EM CASCATA TENDO A DIGESTÃO ANAERÓBICA COMO ELEMENTO CHAVE.....	29
FIGURA 3 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO A BIOGÁS	30
FIGURA 4 – PRINCIPAIS OPÇÕES PARA UTILIZAÇÃO/CONVERSÃO DO BIOGÁS	35
FIGURA 5 – ROTAS METABÓLICAS E GRUPOS MICROBIANOS ENVOLVIDOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	41
FIGURA 6 – ARMAZENAMENTO INTERNO DE BIOGÁS	44
FIGURA 7 – ARMAZENAMENTO EXTERNO DE BIOGÁS	45
FIGURA 8 – TRATAMENTO DE BIOGÁS.....	48
FIGURA 9 – AVALIAÇÃO DO ESCOPO DO POTENCIAL TEÓRICO AO REALIZÁVEL	53
FIGURA 10 – IMAGEM COM A LOCALIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES 1 E 2.....	58
FIGURA 11 – IMAGEM AÉREA DA PROPRIEDADE 1	59
FIGURA 12 – BIODIGESTOR DA PROPRIEDADE 1	59
FIGURA 13 – LAGOA DE BIOFERTILIZANTE DA PROPRIEDADE 1.....	60
FIGURA 14 – DIVISÃO INTERNA DO BARRACÃO DA PROPRIEDADE 1	61
FIGURA 15 – GERADOR PROPRIEDADE 1	61
FIGURA 16 – CÂMERA DO MONITORAMENTO	62
FIGURA 17 – QUADRO DE COMANDO.....	62
FIGURA 18 – IMAGEM AÉREA DA PROPRIEDADE 2	63
FIGURA 19 – BIODIGESTOR DA PROPRIEDADE 2	63
FIGURA 20 – LAGOA DE BIOFERTILIZANTE DA PROPRIEDADE 2.....	64
FIGURA 21 – DIVISÃO INTERNA DO BARRACÃO DA PROPRIEDADE 2	64
FIGURA 22 – GERADOR PROPRIEDADE 2	65
FIGURA 23 – QUADRO DE COMANDO.....	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES TIPOS DE GASES	32
TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE O GÁS NATURAL E OUTROS TIPOS DE GASES	33
TABELA 3 – NÍVEIS DE TRATAMENTO REQUERIDO PARA DIFERENTES TIPOS DE USO DO BIOGÁS	50
TABELA 4 – DADOS CLIMATOLÓGICOS DE TOLEDO-PR.....	66
TABELA 5 – INVESTIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO 1	71
TABELA 6 – INVESTIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO 2.....	83
TABELA 7 – RESUMO DO LCOE	94
TABELA 8 – RESUMO DO RESULTADO ECONÔMICO NO VIGÉSIMO ANO	95

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	39
--	----

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL 2019.	19
GRÁFICO 2 – OUTRAS FONTES RENOVÁVEIS	20
GRÁFICO 3 – PRODUÇÃO DE ENERGIA DA PROPRIEDADE 1 EM KWH/MÊS .	67
GRÁFICO 4 – PRODUÇÃO DE BIOGÁS PROPRIEDADE 2 EM KWH/MÊS	68
GRÁFICO 5 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 4% AO ANO	73
GRÁFICO 6 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTOS AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 8% AO ANO	74
GRÁFICO 7 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 12% AO ANO	75
GRÁFICO 8 – COMPARATIVO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA X DIFERENTES TAXAS.....	75
GRÁFICO 9 – COMPARATIVO DO LCOE EM DÓLAR X DIFERENTES TAXAS ..	76
GRÁFICO 10 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 1 – PROPRIEDADE 1	77
GRÁFICO 11 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 2 – PROPRIEDADE 1	78
GRÁFICO 12 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 3 – PROPRIEDADE 1	79
GRÁFICO 13 – ENERGIA GERADA EM KWH/MÊS X LINHA DE VIABILIDADE – PROPRIEDADE 1	80
GRÁFICO 14 – COMPARATIVO DOS OS 3 CENÁRIOS – PROPRIEDADE 1	81
GRÁFICO 15 – PAYBACK COM COMPARATIVO DE PERFORMANCE.....	82
GRÁFICO 16 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 4% AO ANO	85
GRÁFICO 17 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 8% AO ANO	86
GRÁFICO 18 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 12% AO ANO	87
GRÁFICO 19 – COMPARATIVO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA X DIFERENTES TAXAS.....	87
GRÁFICO 20 – COMPARATIVO DO LCOE EM DÓLAR X DIFERENTES TAXAS ..	88
GRÁFICO 21 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 1 – PROPRIEDADE 2	89
GRÁFICO 22 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 2 – PROPRIEDADE 2	90
GRÁFICO 23 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 3 – PROPRIEDADE 2	91

GRÁFICO 24 – ENERGIA GERADA EM KWH/MÊS COM A MARCAÇÃO DA LINHA DE VIABILIDADE	92
GRÁFICO 25 – COMPARATIVO DOS 3 CENÁRIOS – PROPRIEDADE 2	93
GRÁFICO 26 – PAYBACK COM COMPARATIVO DE PERFORMANCE.....	94

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS	18
3.2	TIPOS DE BIOMASSA	21
3.3	BIOGÁS: PRODUÇÃO E APLICAÇÕES	27
3.4	ARMAZENAMENTO DA BIOMASSA, BIODIGESTORES E O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA	36
3.5	ARMAZENAMENTO E TRATAMENTO DO BIOGÁS	43
3.6	VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS	51
3.7	VIABILIDADE ECONÔMICA	52
3.7.1	Métodos de análise de viabilidade econômica	54
3.7.1.1	Fluxo de caixa	54
3.7.1.2	Valor Presente Líquido ou VPL	54
3.7.1.3	Taxa Interna de Retorno (TIR)	55
3.7.1.4	Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	55
3.7.1.5	Payback	56
3.7.1.6	Custo Nivelado de Energia - LCOE	56
4	MATERIAL E MÉTODOS	58
4.1	MATERIAL	58
4.2	MÉTODOS	66
4.2.1	A produção de biogás	66
4.2.2	Geração de eletricidade	67
4.2.3	Cálculo de viabilidade econômica	68
4.2.4	Levelized Cost of Energy (LCOE)	69
4.2.5	Fator de Capacidade	70
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	PROPRIEDADE 1	71
5.1.1	Investimento	71
5.1.2	Cálculo do LCOE e resultados	72

5.1.3	Análise da viabilidade econômica	76
5.1.3.1	Cenário 1	76
5.1.3.2	Cenário 2	77
5.1.3.3	Cenário 3	78
5.1.4	Cálculo do Fator de Capacidade	81
5.2	PROPRIEDADE 2.....	82
5.2.1	Investimento	82
5.2.2	Cálculo do LCOE e resultados.....	84
5.2.3	Análise da viabilidade econômica	88
5.2.3.1	Cenário 1	88
5.2.3.2	Cenário 2	89
5.2.3.3	Cenário 3	90
5.2.4	Cálculo do Fator de Capacidade	93
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
	REFERÊNCIAS	97
	ANEXO 1 – TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL X	
	AS TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO CONVENCIONAIS.	103

1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje precisamos de energia para a maioria das coisas cotidianas, como acender uma lâmpada, preparar nossas refeições ou nos transportar, e essa energia vem de um conjunto de fontes que formam o que chamamos de matriz energética. Ou seja, ela representa o conjunto de fontes disponíveis em um local, um país, ou no mundo, para suprir a demanda de energia (EPE, 2020).

Energia essa que é essencial para o desenvolvimento, e que é uma das aspirações fundamentais dos povos de todos os países. A questão energética global é uma das prioridades na política de desenvolvimento dos países e vem ganhando um papel de destaque no debate internacional, pois o consumo mundial de energia tende a crescer nos próximos anos segundo a Agência Internacional de Energia AIE (2013).

No mundo a participação dos combustíveis fósseis na matriz energética vem sendo objeto das mais elevadas preocupações ambientais. Segundo Coldebella, 2006, na grande maioria, os países desenvolvidos ainda possuem sua economia baseada em fontes de energia de origem fóssil e não renovável como o petróleo, carvão e gás natural, porém, a necessidade de atender a um alto consumo de energia tem mostrado que alguns dos recursos naturais são finitos e que podem chegar a desaparecer. Já no Brasil temos 46% da matriz energética de fontes renováveis, um exemplo a ser seguido.

Temos segundo a IEA, 2021 a matriz energética mundial em 2018 dividida na seguinte forma: 26,9% de Carvão Mineral, 31,5% de Petróleo e derivados, 22,8% de Gás Natural, 5% Nuclear, 2,5% Hidráulica, 9,3% Biomassa e 2% em outras formas de geração.

Analisando um balanço energético mundial, vemos que a maioria dos países tem uma média de 86% das suas fontes de recursos não renováveis e apenas 14% de recursos renováveis. Esta é uma situação que não pode perdurar não só pela exaustão gradativa das reservas de combustíveis fósseis como também pelos efeitos negativos ao meio ambiente que resultam do seu uso, entre os quais o aquecimento global (GOLDEMBERG, 2009).

Segundo Souza et al. (2004), o Brasil apresenta tradição no uso de fontes renováveis de energia, com destaque para energia elétrica que, atualmente, tem

mais de 83% de toda eletricidade consumida no país, é resultante de fontes renováveis.

Uma alternativa dentre as fontes de energia renováveis, o biogás, possui uma matéria prima barata, pois utiliza o aproveitamento da biomassa gerada por resíduos agrícolas, urbanos ou industriais, que teriam que ser descartados e gerando um passivo ambiental, também pode ser instalado em pequenas propriedades não necessitando de grandes obras.

Segundo o Panorama do Biogás no Brasil, os pequenos produtores estão ajudando a impulsionar o biogás no país. Eles representam 79% das plantas de biogás em funcionamento e são responsáveis por 8% da produção total. O biogás também começou a ser utilizado em propriedades produtoras de suínos. Gerando bons resultados dos aproveitamentos de resíduos e geração de energia elétrica.

Com a hipótese levantada para o trabalho que um sistema de biogás para produção de energia elétrica, na região Oeste do Paraná, apresenta-se viável ao longo do tempo, considerando as taxas médias de inflação dos últimos anos, levando em conta os custos de instalação e manutenções e mostrando ter importante fator ambiental por utilizar os resíduos da produção de suínos que teriam que ser descartados de outra maneira.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho foi avaliar a viabilidade econômica de duas plantas de biogás para a produção de energia elétrica, instaladas na região Oeste do Paraná.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivos específicos: levantar os custos envolvidos na instalação, operação e manutenção do sistema a biogás para geração de energia elétrica, já em funcionamento em propriedades no Oeste do Paraná, aqui estudadas. Assim como levantar o tempo de retorno do investimento para servir de apoio a tomadas de decisões futuras para implantações de um sistema de biogás.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEIS

A crescente dependência energética do homem moderno e a diminuição de recursos naturais, os quais muitos desses sendo levados a escassez, traz à discussão os temas relacionados a pautas de sustentabilidade energética.

Fontes renováveis de energia são provenientes de recursos não esgotáveis, como o sol, vento, hídricas, energia geotérmica, assim como a biomassa. As fontes de energia renováveis estão se destacando por não serem finitas e não causarem grandes impactos a natureza (TANABE, 2017).

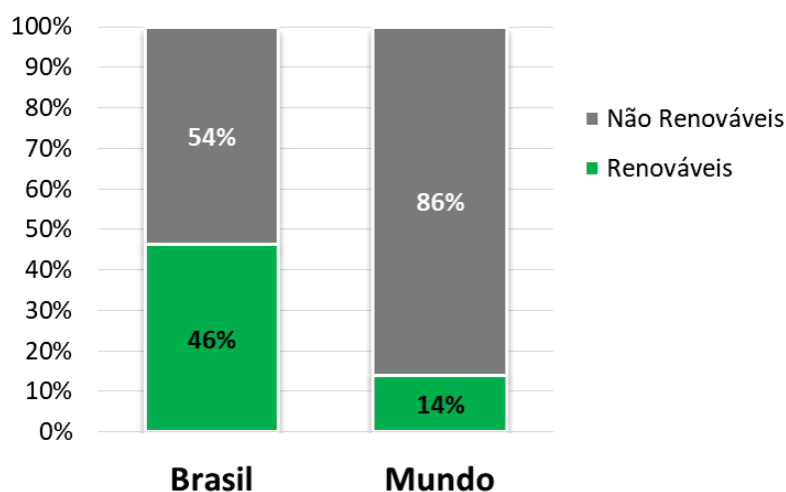
Segundo Goldemberg e Lucon (2007) as fontes energéticas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Renováveis: biomassa, hidráulica, solar, eólica, oceânica e biocombustíveis. Tendo como característica a capacidade de se manter disponíveis por longo período de tempo, ou renovar-se em espaço de tempo relativamente curto.

- Não renováveis: combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural, carvão mineral e o urânio como fonte nuclear. Encontradas na natureza com quantidades limitadas, pois demoram até milhões de anos para sua formação.

O Brasil ocupa posição de vanguarda referente a sustentabilidade de sua matriz energética onde tem 46% dela resultante de fontes renováveis de energia, como mostrado no Gráfico 1, onde o restante dos países tem em média apenas 14% de suas fontes de energia vindas de energias renováveis.

GRÁFICO 1 – MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL 2019.

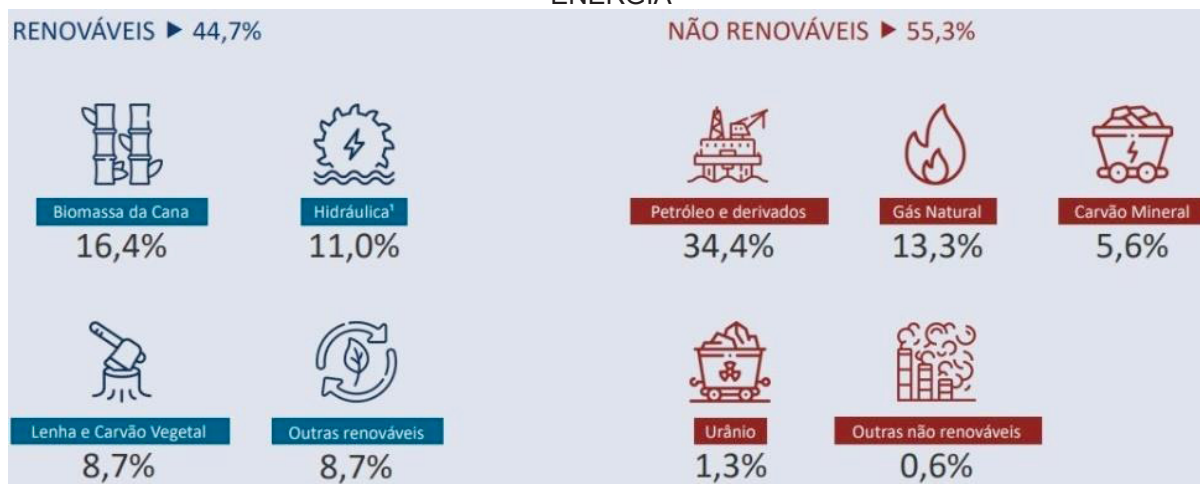


FONTE: Site EPE (2022).

Isso mostra que vários países que estão entre os maiores consumidores de energia mundial ainda tem muito a se moldar, para terem suas matrizes energéticas mais limpas e renováveis.

Já na Figura 1 temos a divisão da oferta interna de energia no Brasil, dividido em fontes renováveis e fontes não renováveis onde são divididas cada uma.

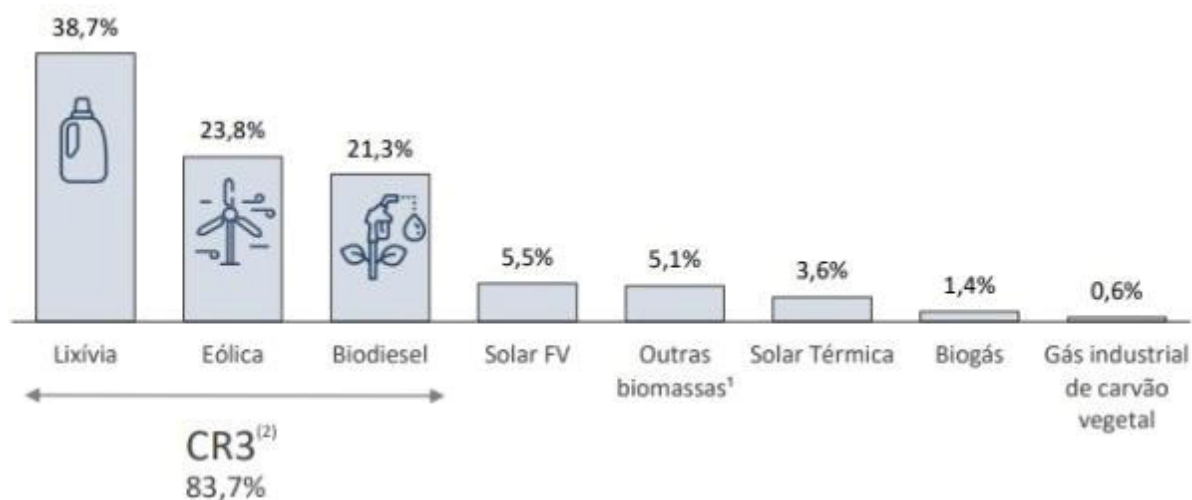
FIGURA 1 – MATRIZ ENERGÉTICA DO BRASIL DIVIDIDA NA SUA OFERTA INTERNA DE ENERGIA



FONTE: Balanço Energético Nacional (2022).

Essas outras renováveis que compõe a matriz energética do Brasil são lixívia, biodiesel, eólica, outras biomassas, solar, o biogás que é tema desse estudo, gás industrial de carvão vegetal e estão mostradas no Gráfico 2.

GRÁFICO 2 – OUTRAS FONTES RENOVÁVEIS



FONTE: Balanço Energético Nacional (2022).

Vemos no Gráfico 2 que o biogás ainda é uma parcela pequena da matriz energética do Brasil o que mostra que tem muito espaço para crescer, além da mais variadas formas que possui para ser obtido, ainda carece de incentivos governamentais e subsídios para se tornar ainda mais viável, pois além de já ser uma fonte que é resultante do aproveitamento de resíduos que tem uma destinação rentável é ecologicamente correto, por dar destino a esses resíduos.

O biogás, ao contrário do álcool da cana de açúcar e de óleos extraídos de outras culturas, não compete com a produção de alimentos por terras disponíveis, já que pode ser inteiramente obtido de resíduos agrícolas (BARREIRA, 2011).

De acordo com Drosz (2013) existe uma grande variedade de tipos e categorias de biomassa adequadas como matéria-prima para a produção de biogás. Cada matéria-prima é definida por características e parâmetros específicos. Cada um tem benefícios e limitações, influenciando a adequação, a disponibilidade local, bem como a logística geral de biomassa e a localização da usina de biogás. Atualmente, subprodutos agrícolas, como esterco animal, resíduos de culturas, resíduos orgânicos de indústrias de alimentos e rações e resíduos municipais e domésticos são matérias-primas valiosas para a produção de biogás.

A possibilidade de criação de fontes de suprimento descentralizadas e em pequena escala é fundamental para o desenvolvimento sustentável. Unidades que utilizam fontes renováveis e não demandam alta tecnologia para instalação ou mão de obra especializada para sua execução, são soluções principalmente para

produtores rurais que podem diminuir sua dependência de energia das concessionárias de energia elétrica (COLDEBELLA, 2006).

Segundo Silva e Soeiro (2013), foi possível observar que existe viabilidade técnica e econômica para o emprego de pequenas estações de geração de energia elétrica a partir do biogás. Entretanto, as restrições de produção e espaço físico para grandes empreendimentos é um impedimento para o aumento substancial de escala desse tipo de empreendimento.

3.2 TIPOS DE BIOMASSA

Conforme Coldebella (2006), todos os materiais que se decompõem por efeito biológico, ou seja, por meio da ação de diferentes bactérias, são considerados biomassa. Segundo Gomez (2013), existem três categorias de biomassa que podem ser utilizadas para a produção de biogás:

(1) substrato de origem agrícola, como estrume líquido, resíduos de ração, resíduos de colheita e culturas energéticas; (2) resíduos de residências privadas e municípios, como resíduos orgânicos coletados separadamente (em recipientes de resíduos orgânicos), resíduos de mercado, alimentos vencidos ou resíduos de alimentos; (3) subprodutos industriais, como glicerina, subprodutos do processamento de alimentos ou resíduos de separadores de gordura. A substância orgânica é convertida em biogás pelas bactérias em várias etapas em digestores herméticos. As bactérias são semelhantes às encontradas nos pré-estômagos de ruminantes (GOMEZ, 2013, p. 32, tradução nossa)¹.

Sobre os diferentes tipos de biomassa, pode-se citar a pesquisa de Seadi et al. (2013). Para os autores, biomassa é o termo geral usado para descrever toda a matéria produzida biologicamente e, portanto, inclui todos os tipos de materiais e substâncias derivados de organismos vivos. De acordo com a pesquisa, ainda há um potencial significativo de expansão de exploração da biomassa com propósitos energéticos, inclusive para produção de biogás, uma vez que é possível aproveitar grandes volumes de resíduos e desperdícios não utilizados em todo o mundo.

¹ “(1) substrate of farm origin such as liquid manure, feed waste, harvest waste and energy crops; (2) waste from private households and municipalities such as separately collected organic waste (in organic waste containers), market waste, expired food or food waste; (3) industrial by-products such as glycerine, by-products of food processing or waste from fat separators. The organic substance is converted to biogas by bacteria in several steps in airtight digesters. The bacteria are similar to those found in the prestomachs of ruminants” (GOMEZ, 2013, p. 32).

Conforme os autores, a biomassa proveniente da agricultura, dos resíduos industriais e municipais são os principais tipos de biomassa usados como matéria-prima para geração de energia. Assim, os recursos de biomassa adequados como matéria-prima para o biogás são representados por uma grande variedade de materiais orgânicos disponíveis em uma base renovável, que, geralmente, têm um alto teor de açúcar, amido, proteínas ou gorduras, e compartilham uma característica comum que é a capacidade de ser facilmente decomposto por meio de digestão anaeróbia (SEADI et al., 2013). Para os autores,

Os recursos de biomassa passíveis de produção de biogás podem ser agrupados em categorias de acordo com vários critérios. De acordo com a classificação taxonômica (latim regnum) de sua origem, podem ser vegetais (plantae) e animais (animalia). De acordo com o setor que os gera, podem ser agrícolas (esterco animal e chorume, subprodutos e resíduos vegetais, culturas energéticas), industriais (resíduos orgânicos, subprodutos e resíduos de agroindústrias, indústrias alimentícias, indústrias forrageiras e cervejarias, orgânicas - águas residuais e lamas carregadas de processos industriais, subprodutos orgânicos da produção de biocombustíveis e biorrefinarias, etc.), municipais (resíduos domésticos separados na fonte, lamas de esgoto, resíduos sólidos urbanos e resíduos alimentares). Em todos esses setores, resíduos, resíduos e subprodutos de diferentes cadeias de valor de biomassa são os materiais mais sustentáveis agora usados como matérias-primas de AD (SEADI et al., 2013, p. 20, tradução nossa)².

Nota-se que diferentes tipos de biomassa, sejam elas originadas de resíduos rurais ou urbanos, têm potencial para se tornarem matéria prima de produção de biogás. Ao considerar, por exemplo, a potencialidade de utilização de resíduos urbanos, pode-se citar a pesquisa de Kretzer et al. (2016). Os pesquisadores, vinculados ao Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis-SC, avaliaram em 2015 o uso de diferentes tipos de resíduos orgânicos do restaurante universitário (RU) da UFSC, para produção de biogás e biofertilizante³.

² “Os The biomass resources amenable to biogas production can be grouped into categories according to various criteria. According to the taxonomic rank (Latin regnum) of their origin, they can be vegetal (plantae) and animal (animalia). According to the sector generating them, they can be agricultural ⁸ ⁸ (animal manures and slurries, vegetable by-products and residues, energy crops), industrial (organic wastes, by-products and residues from agroindustries, food industries, fodder and brewery industries, organic-loaded wastewaters and sludges from industrial processes, organic by-products from biofuel production and biorefineries, etc.), municipal (source-separated household waste, sewage sludge, municipal solid waste and food residues). Across these sectors, wastes, residues and by-products of different biomass value chains are the most sustainable materials now used as AD feedstocks. (SEADI et al., 2013, p.20)

³ Segundo Coldebella (2006, p. 33), “biofertilizante é o nome dado à biomassa fermentada que fica no interior do digestor, em sua maioria sob a forma líquida, rica em nutrientes; principalmente, nitrogênio,

A pesquisa de Kretzer et al. (2016) demonstrou que somente o RU selecionado para a pesquisa produz, diariamente, 240 kg de resíduos sólidos orgânicos, que, caso não fossem gerenciados de forma adequada, poderiam ocasionar problemas ambientais. Por outro lado, os autores também refletiram que esse volume de resíduos representa apenas uma pequena parcela de todo o lixo de Florianópolis, que produz diariamente cerca de 500 toneladas, em que 95% desse total mistura resíduos orgânicos e inorgânicos.

Os resultados de pesquisas como as realizadas por Kretzer et al. (2016) demonstram o quanto o país ainda pode aproveitar seus resíduos orgânicos de modo a viabilizar a produção de biogás por meio de biodigestores a partir do processo de biodigestão anaeróbia. No entanto, entende-se que, antes disso, é necessário que sejam implantadas políticas públicas de coleta seletiva e, na sequência, sejam direcionados a usinas.

Já em relação ao aproveitamento de resíduos produzidos em ambientes rurais, Seadi et al. (2013) afirmam que os substratos de matéria-prima usados para o biogás são derivados principalmente do setor agrícola, responsável pelo maior potencial do biogás. Essas matérias-primas consistem principalmente em vários resíduos e subprodutos, dos quais os mais importantes são o estrume animal e lamas coletadas em fazendas (de gado, porcos, aves etc.). Assim, estrume e lama, resíduos de colheita, subprodutos como palha, gramíneas, folhas, frutos, e até mesmo plantas inteiras também podem ser usados para a produção de biogás.

Pode-se citar, por exemplo, a pesquisa de Coldebella (2006), que verificou a viabilidade do uso de biogás proveniente da bovinocultura de leite e da suinocultura para a geração de energia a ser utilizada na irrigação de duas propriedades rurais, no município de Toledo-PR, sendo que ambas utilizaram biodigestores para o tratamento dos efluentes, produzindo biogás e biofertilizante.

Na época, o estudo constatou que o retorno do investimento financeiro foi razoável, uma vez que o retorno estimado foi de 4,3 anos e 6,7 anos para bovinos e suínos, respectivamente, em relação à economia de energia elétrica. Porém, a pesquisa demonstrou que o aproveitamento dos resíduos nessas propriedades também trouxe outros benefícios, uma vez que as propriedades também obtiveram uma economia considerável em relação ao uso dos biofertilizantes (bovino: o

fósforo, potássio e material orgânico (húmus), com grande poder de fertilização. Quando aplicada ao solo melhora suas qualidades físicas, químicas e biológicas”.

suficiente para fertilizar 37ha/ano; suíno: o suficiente para fertilizar 480ha/ano), além da indiscutível contribuição ao meio ambiente (COLDEBELLA, 2006).

Há que se ressaltar que os biofertilizantes são extremamente importantes. Conforme Biosantech et al. (2013) e Crolla, Kinsley e Pattey (2013), o uso de biofertilizantes contribui para a preservação dos recursos por meio da reciclagem de matéria orgânica e nutrientes, como o fósforo, um recurso altamente limitado em nosso planeta. A qualidade do biofertilizante pode ser melhorada por meio do processamento do digerido. Embora o processamento signifique investimentos adicionais, custos de operação e manutenção, a possibilidade de melhorar a qualidade do biofertilizante, os autores ressaltam que o processamento garante a obtenção de benefícios a longo prazo que superam os riscos potenciais.

Além disso, de acordo com Lobato (2011, p. 56), no meio rural, o biogás pode ser utilizado, principalmente, “para cocção, iluminação, refrigeração de alimentos e aquecimento de água. Além desses usos, também tem utilidade em processos térmicos para secagem de insumos”.

Também deve-se mencionar que não só resíduos são utilizados para a produção de biogás. Na última década, segundo Seadi et al. (2013), novos tipos de matérias-primas foram testadas e agora são usadas em usinas de digestão anaeróbia, como é o caso das culturas energéticas (milho, gramíneas, beterrabas, girassóis, etc.), cultivadas especialmente para a produção de biogás. Para os autores,

O cultivo de safras especialmente dedicadas à produção de energia foi desenvolvido na década de 1990 em países como Alemanha e Áustria, embora Buswell tenha investigado o potencial de metano de várias culturas já na década de 1930. Muitas variedades de safras, tanto plantas inteiras quanto partes de plantas, foram testadas e comprovadamente adequadas como matéria-prima de biogás. Inclui milho, várias gramíneas, vários cereais, beterraba, batata e girassóis (SEADI et al., 2013, p. 24-25, tradução nossa)⁴.

Sobre o uso de culturas energéticas como matéria-prima para a produção de biogás, a pesquisa de Seadi et al. (2013) afirma que implica algumas etapas tecnológicas anteriores à digestão anaeróbia, como a colheita, o pré-processamento e o armazenamento. Além disso, as culturas energéticas herbáceas, como girassóis,

⁴ “The cultivation of crops specially dedicated to energy production was developed in the 1990s in countries such as Germany and Austria, although Buswell investigated the methane potential of various crops as far back as the 1930s. Many varieties of crops, both whole plants and parts of plants, have been tested and proven to be suitable as biogas feedstock. These include maize, various grasses, various cereals, beets, potatoes and sunflowers”.

milho, açúcar e beterraba, podem ser usadas frescas ou como ensilagem. Conforme Seadi et al. (2013), a cultura do milho é, atualmente, a mais utilizada para a produção de energia nas usinas de biogás.

Se, por um lado, a utilização de culturas energéticas é apontada como uma importante matéria-prima para a produção de biogás, por outro lado, pesquisas como a desenvolvida por Pereira e Van Lier (2013) destacam que o uso de culturas energéticas como principal substrato deve sempre ser abordado com cuidado, levando em consideração os impactos esperados nas esferas ambiental e social, por causa das implicações negativas da produção agrícola intensiva e a possível competição com usos alternativos de biomassa, como alimentos.

Em relação aos resíduos, assim como a pesquisa de Kretzer et al. (2016) demonstrou que apenas uma pequena parcela de resíduos orgânicos urbanos é aproveitada, o estudo de Coldebella (2006) também constatou que apenas uma pequena porcentagem dos resíduos produzidos em ambientes rurais tem destino correto. Conforme o autor, considerando apenas a suinocultura, o Brasil possui o terceiro maior rebanho suíno do mundo, sendo que só a região Sul do país gera mais de 100 milhões de m³ de efluentes, que são despejados na natureza, tornando-se fonte de poluição para os recursos hídricos, para a terra e para o ar. Verifica-se que esses resíduos poderiam ser utilizados para a produção de biogás e biofertilizante, o que resultaria não só em benefícios à natureza, mas também aos produtores rurais, que teriam economia financeira a longo prazo.

Outro aspecto importante em relação ao aproveitamento de resíduos para a produção de biogás é apontado por Seadi et al. (2013). Os autores ressaltam a importância de aproveitar resíduos industriais em digestão anaeróbia:

Quantidades consideráveis de subprodutos, resíduos e desperdícios são produzidos por atividades industriais que processam matérias-primas agrícolas. Essas indústrias incluem alimentos e bebidas, forragens, processamento de peixes, leite, amido, açúcar, produtos farmacêuticos, bioquímicos e cosméticos, papel e celulose, bem como matadouros. Os resíduos dessas indústrias são diversos e possuem diversos potenciais de metano, teores de matéria seca, estruturas e composições, de acordo com sua origem. O comum para a maioria deles é o fato de serem homogêneos, de fácil digestão e ricos em lipídios, proteínas ou açúcares. Muitos resíduos industriais são usados como 'impulsionadores do metano', devido ao seu potencial extremamente alto de metano. Resíduos orgânicos industriais podem ser tratados por AD como matérias-primas adicionais em instalações de biogás descentralizadas menores, grandes instalações de codigestão ou em locais de produção industrial (por exemplo, águas residuais industriais com carga orgânica). No caso de águas residuais com carga orgânica, o

objetivo é reduzir sua carga orgânica e torná-las adequadas para posterior descarte e utilização do biogás produzido como energia de processo (SEADI et al., 2013, p. 27, tradução nossa)⁵.

Contudo, a pesquisa de Drosig et al. (2013) ressalta que nem todos os resíduos e culturas energéticas são igualmente adequados para a produção de biogás. Assim, em alguns casos, a produção desse combustível pode não ser lucrativa. Nessa perspectiva, diante da infinidade de recursos que podem ser aproveitados na produção de biogás, Seadi et al. (2013) afirmam que os substratos usados para a produção do combustível são selecionados com base em sua adequação e disponibilidade.

A adequação, neste caso, considerando os estudos de Drosig et al. (2013) e de Seadi et al. (2013), é definida por um número de características e parâmetros, como o conteúdo da matéria orgânica digestível, potencial de metano desse tipo de biomassa, pH, conteúdo de macro e microelementos etc. Já a disponibilidade refere-se ao fato de a matéria-prima estar facilmente acessível para produção de biogás, considerando se os recursos podem ser fornecidos em quantidades suficientes numa base renovável.

Além disso, Drosig et al. (2013) ressalta que, em cada país, questões jurídicas também devem ser consideradas, como leis ambientais e de segurança regulamentar o uso de produtos residuais. Assim, se a avaliação preliminar indicar que a matéria-prima pode ser adequada, uma análise laboratorial detalhada deve ser a próxima etapa, incluindo:

Informações concisas sobre os diferentes métodos de análise (como sólidos totais (TS), sólidos voláteis (VS), conteúdo de nitrogênio, demanda química de oxigênio (COD)) e suas limitações. Além disso, a disponibilidade de macro e micronutrientes também deve ser avaliada, bem como a possibilidade de acúmulo de substâncias inibidoras (antibióticos, metais pesados, desinfetantes, amônia, sulfeto de hidrogênio etc.). Um teste importante para a degradabilidade anaeróbia e aceitabilidade de uma matéria-prima é um

⁵ “Considerable amounts of by-products, residues and wastes are produced by industrial activities that process agricultural raw materials. These industries include food and beverage, fodder, fish processing, milk, starch, sugar, pharmaceuticals, biochemicals and cosmetics, pulp and paper, as well as slaughterhouses. Wastes from these industries are diverse and have various methane potentials, dry matter contents, structures and compositions, according to their origin. Common for most of them is that they are homogeneous, easily digestible and rich in lipids, proteins or sugars. Many industrial wastes are used as ‘methane boosters’, due to their extreme high methane potential. Industrial organic wastes can be treated by AD as additional feedstocks in smaller decentralized biogas plants, large codigesting plants or at industrial production locations (e.g. organic-loaded industrial wastewaters). In the case of organic-loaded wastewaters, the aim is to reduce their organic loading and make them suitable for further disposal and to use the produced biogas for process energy” (SEADI et al., 2013, p. 27).

teste de lote para o potencial bioquímico do metano (BMP). As melhores informações sobre o comportamento de uma matéria-prima de biogás em uma planta de biogás podem ser obtidas a partir de ensaios de fermentação contínua. No entanto, uma grande desvantagem desses ensaios contínuos é sua complexidade e custo (DROSG et al., 2013, p. 53, tradução nossa)⁶.

Ao considerar todos os diferentes tipos de matéria-prima que podem ser aproveitados para a produção do biogás, sejam elas compostas pela produção de culturas energéticas, sejam a partir do aproveitamento de resíduos, constata-se que todas são renováveis. Segundo Pereira e Van Lier (2013), esse caráter renovável é uma importante vantagem do biogás caso comparado com os combustíveis fósseis, além do fato de que podem ser explorados usando tecnologias menos intensivas em capital. Além disso, a diminuição das emissões de gases de efeito estufa provenientes do uso de combustíveis fósseis pode ser um ganho para o desenvolvimento sustentável da sociedade à medida que são substituídos por biocombustíveis neutros em carbono. Entende-se que essa diminuição nas emissões de gases de efeito estufa pode se tornar um incentivo econômico atraente, particularmente para os países menos desenvolvidos economicamente, como o Brasil.

Os autores também destacam que o processamento de biomassa pode motivar o desenvolvimento de um ambiente em que as indústrias são levadas para as áreas rurais, que, por sua vez, pode criar empregos e promover incentivo financeiro aos sistemas rurais e dar a oportunidade para autossuficiência energética local, regional e nacional em todos os países. Além disso, o uso de biomassa pode contribuir para resolver problemas ambientais, relacionados, por exemplo, à gestão inadequada de resíduos, ou crescimento de biomassa indesejável causado pela eutrofização (PEREIRA; VAN LIER, 2013).

3.3 BIOGÁS: PRODUÇÃO E APLICAÇÕES

⁶ “Concise information about the different analysis methods (such as total solids (TS), volatile solids (VS), nitrogen content, chemical oxygen demand (COD)) and their limitations. Furthermore, the availability of macro- and micronutrients should also be evaluated, as well as the possibility of the accumulation of inhibitory substances (antibiotics, heavy metals, disinfectants, ammonia, hydrogen sulphide, etc.). An important test for the anaerobic degradability and acceptability of a feedstock is a batch test for the biochemical methane potential (BMP). The best information on the behaviour of a biogas feedstock in a biogas plant can be obtained from continuous fermentation trials. However, a major disadvantage of these continuous trials is their complexity and cost” (DROSG et al., 2013, p. 53).

Conforme Petten, Aadorf e Murphy (2013), Gomez (2013), Dumont et al. (2013) e Santos et al. (2016), o biogás pode ser formado naturalmente a partir de matéria biogênica, ou seja, por meio de todas as formas de biomassa em condições anaeróbias⁷. Assim, o biogás é uma mistura de gases “gerados durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica, cuja composição depende das condições físico-químicas no interior do digestor (pH, alcalinidade, temperatura) e da presença de outros ânions, como o sulfato e o nitrato” (BRASIL, 2015, p. 63).

Quando o biogás é desenvolvido de forma natural, no meio ambiente, chega à atmosfera, e o metano (CH₄), seu principal componente⁸, contribui significativamente para o aquecimento global (PETTEN; AADORF; MURPHY, 2013; DUMONT et al., 2013). Além disso, Gomez (2013) afirma que o metano tem um impacto 25 vezes maior no clima do que o dióxido de carbono, logo, mesmo quando o biogás é produzido em usinas, deve-se tomar muito cuidado com a liberação de metano no processo de produção e utilização do biogás.

Contudo, de acordo com Coldebella (2006) e Deublein e Steinhauser (2011), também devido ao metano⁹, quando aproveitado, o biogás se torna um importante recurso energético. Pode-se observar, por exemplo, o que consta no *Guia técnico de aproveitamento energético de biogás*, lançado em 2015 que cita: “O potencial energético do biogás está associado à energia química nele acumulada. Isso acontece, porque o biogás é majoritariamente composto por metano, uma substância inflamável, inodora, incolor, com densidade menor que a do ar e com poder calorífico inferior igual a 50 MJ/kg. Cabe destacar, no entanto, que o metano é um gás indutor do efeito estufa e que seu potencial de aquecimento global é 25 vezes maior que o atribuído ao dióxido de carbono (IPCC, 2013). Por isso, a recuperação do biogás tem sido promovida com o intuito de minimizar impactos ambientais e de oferecer soluções energéticas renováveis (BRASIL, 2015, p. 17)”.

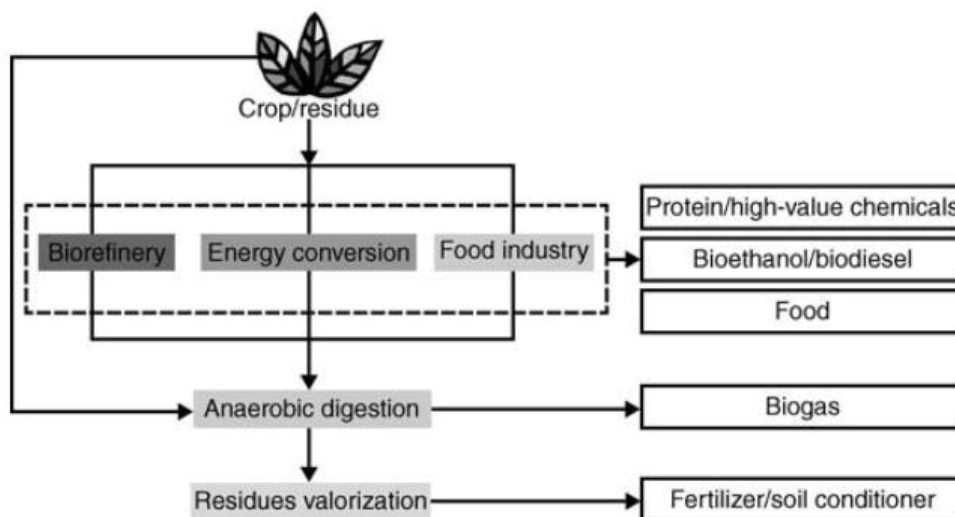
⁷ Conforme Brasil (2015, p. 18), “a digestão anaeróbia é o processo de degradação biológica da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio que, dentre outros subprodutos, gera o biogás. A digestão anaeróbia ocorre em etapas sequenciais, sendo cada uma delas caracterizadas pela atividade de grupos específicos de microrganismos”. Este processo é explicado de forma detalhada no decorrer desta seção.

⁸ De acordo com Gomez (2013), o conteúdo de metano do biogás flutua entre 50% e 75%. O segundo componente principal do biogás é dióxido de carbono (CO₂), com uma participação entre 25% e 50%. Outros componentes do biogás são água (H₂O), oxigênio (O₂) e vestígios de enxofre (S₂) e sulfeto de hidrogênio (H₂S).

⁹ Desde o século XX, segundo Petten, Aadorf e Murphy (2013), o metano se tornou um dos principais combustíveis para geração de energia, aquecimento e fins de transporte.

Nesse cenário, para Pereira e Van Lier (2013), o aproveitamento da cadeia de biomassa pode contribuir, principalmente, de duas maneiras possíveis: Em primeiro lugar, a digestão anaeróbia pode ser usada para converter diretamente a biomassa em biogás, uma vez que o biogás já foi reconhecido como competitivo em eficiência e custos em processos que geram outras formas de energia. Em segundo lugar, novos resíduos são gerados por outros bioprocessos na forma de fluxos de resíduos diluídos com carga orgânica importante, gerando biofertilizantes. Veja-se na Figura 2.

FIGURA 2 – POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES DE BIOGÁS EM CASCATO TENDO A DIGESTÃO ANAERÓBICA COMO ELEMENTO CHAVE



FONTE: Pereira e Van Lier (2013, p. 169).

Pensando, especificamente, no cenário nacional, pode-se considerar a pesquisa de Siqueira, Souza e Santos (2016, p. 9), que afirma que a biomassa é uma das fontes de energia renováveis mais presentes na matriz energética nacional “e possui ampla diversidade de aproveitamento, sendo utilizada tanto em sistema de gaseificação da madeira, como em sistema de biodigestão anaeróbica para a produção de biogás”. Além disso, para Santos et al. (2016, p.33), “a participação do biogás na matriz energética brasileira depende de possíveis incentivos, não apenas para sua produção como para os equipamentos que o utilizam. Sabe-se que o biogás possui elevado potencial para o setor energético, principalmente quando purificado, e pode ser destinado à geração de energia elétrica, por meio do emprego de gerador, à utilização em motores de combustão interna e em veículos com motores adaptados”.

Segundo o Relatório de Síntese 2022, a capacidade Instalada de geração a Biogás por Unidade Federativa está mais concentrada nas regiões com maior potencial de produção de matéria orgânica, resíduos agrícolas, urbanos, industriais, florestais.

FIGURA 3 – CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO A BIOGÁS



FONTE: Relatório de Síntese Ben (2022).

Entende-se que o potencial energético do biogás está associado à quantidade de metano em sua composição, o que determina diretamente o seu poder calorífico. “O poder calorífico inferior do metano é $35,9 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ e o do biogás com 60% de metano é $21,5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$, correspondendo a 67% do poder calorífico inferior do gás natural” (BRASIL, 2015, p. 64).

Há que se ressaltar que, segundo Petten, Aadorf e Murphy (2013), o biogás é utilizado em aplicações domésticas e em escala agrícola há muitos anos. A produção de biogás também é um processo padrão desde década de 1930 para a estabilização de lamas de esgoto. Assim, o que mudou ao longo do nos últimos 40 anos é que a produção de biogás foi alcançada em escala industrial, com maior eficiência e complexidade, especialmente na Europa e na América do Norte.

Pereira e Van Lier (2013) ressaltam que a possível contribuição energética do biogás foi reconhecida ainda na década de 1980. Contudo, economicamente, a produção de eletricidade a partir de outras fontes ainda era muito mais barata, o que impediu que o conceito penetrasse o mercado. Nas últimas décadas, os autores afirmam que o potencial da digestão anaeróbia foi redescoberto como tendo um papel central na entrega de maiores saídas de recursos finitos de biomassa, como um recurso energético. Nessa perspectiva,

Nos últimos anos, como resultado de incentivos governamentais específicos, a construção de biorreatores para produção de biogás usada como (co)substrato para energia elétrica, tornou-se uma realidade em países como Alemanha, Áustria e Suécia. Na Alemanha, por exemplo, estima-se que em 1997 apenas 450 usinas estavam funcionando, enquanto mais de 6.000 produzem biogás em 2010 (IEA 2011). Existem mais de 25.000 usinas de biogás funcionando na China e estima-se que mais de 30 milhões de usinas de biogás estejam funcionando em todo o mundo (PEREIRA; VAN LIER, 2013, p. 168, tradução nossa)¹⁰.

Além disso, conforme Seadi et al. (2013), outro fator importante em relação à produção do biogás nas últimas décadas refere-se ao fato do surgimento do cultivo de safras energéticas, o que representa uma mudança de paradigma para o papel dos agricultores na sociedade, uma vez que deixam de ser apenas produtores de alimentos e rações para passarem a ser também produtores de energia.

A pesquisa de Seadi et al. (2013), a partir de dados estatísticas das Nações Unidas, estima que a população global pode chegar a 10,5 bilhões em 2050. Nesse cenário, os autores ressaltam que será necessária a ampliação de três vezes a atual área de produção global de alimentos agrícolas; e, ao mesmo tempo, espera-se o setor agrícola seja capaz de fornecer não só alimentos, mas também biomassa para energia, maior biodiversidade e preservação da natureza, proteção ambiental e desenvolvimento econômico, tudo sem desmatar as atuais áreas de reserva natural.

Assim, segundo Pereira e Van Lier (2013), deve-se considerar também a finitude e a escassez de reservas fósseis a curto prazo, que, agravada pela tensão geopolítica existente, induziu instabilidade energética e preços elevados dos

¹⁰ “Over recent years, and as the result of specific governmental incentives, the construction of bioreactors for biogas production having energy crops as (co) substrate has become a reality in countries like Germany, Austria and Sweden. In Germany, for example, it is estimated that in 1997 only 450 AD plants were functioning, while more than 6000 were producing biogas in 2010 (IEA 2011). There are more than 25 000 working biogas plants in China and it is estimated that more than 30 million biogas plants are working around the world” (PEREIRA; VAN LIER, 2013, p. 168).

combustíveis nos últimos anos. Dentro deste contexto, Siqueira, Souza e Santos (2016) apontam o potencial energético da biomassa, que pode ser utilizada devido à sua capacidade de produção de biocombustíveis e produtos químicos como alternativas aos combustíveis fósseis. Já Pereira e Van Lier (2013) afirmam que é possível produzir bioenergia a partir de safras e de resíduos agrícolas e urbanos, por meio da produção de biocombustíveis como o bioetanol, o biodiesel e o biogás, que podem ser incorporados ao mercado facilmente por meio da infraestrutura de energia já instalada.

Por meio das Tabelas 1 e 2, pode-se compreender o potencial energético do biogás quando comparado a outros tipos de gases.

Para Armando, Constanzi, Feiden e Souza (2013), o Poder Calorífico Inferior é utilizado para determinar o potencial teórico de energia contido nos combustíveis. Quanto maior a concentração de metano, mais energia por unidade de massa, ou seja, maior o PCI do biogás. A densidade ou peso específico do biogás depende também da concentração de metano.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS DE DIFERENTES TIPOS DE GASES

PARÂMETRO	UNIDADE	GÁS NATURAL	GÁS DE SÍNTESE	BIOGÁS (60% CH ₄)
Poder calorífico inferior*	MJ.m ⁻³	31,8	16,1	21,5
	kcal.m ⁻³	7.600	3.846	5.134
Densidade	kg.m ⁻³	0,82	0,51	1,21
Índice de Wobbe [inferior]	MJ.m ⁻³	39,9	22,5	19,5
Velocidade máxima de chama	m.s ⁻¹	0,39	0,7	0,25
Requisito teórico de ar	m ³ ar. m ⁻³ gás	9,53	3,83	5,71
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% [v]	11,9	13,1	17,8
Ponto de condensação	°C	59	60	60-160

FONTE: Brasil (2015, p. 65).

*Refere-se ao calor de combustão menos o calor de vaporização do vapor de água presente no gás.

Na Tabela 1, temos as principais características físicas e químicas de um biogás (com 60% de metano), comparadas ao gás natural e ao gás de síntese. O potencial energético do biogás está relacionado com a quantidade de metano em sua composição, fator determinante para o seu poder calorífico.

Para Brasil (2015) o poder calorífico de um gás é a quantidade de energia gerada por unidade de volume, o biogás possui poder calorífico como qualquer outro

gás, e quanto mais puro, melhor é a eficiência na combustão. O poder calorífico inferior do metano é 35,9 MJ.Nm⁻³ e o do biogás com 60% de metano é 21,5 MJ.Nm⁻³, correspondendo a 67% do poder calorífico inferior do gás natural (Tabela 2).

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE O GÁS NATURAL E OUTROS TIPOS DE GASES

COMBUSTÍVEL	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	EQUIVALÊNCIA COM O METANO
Metano	50,0	35,9	10,0	1,0
Gás natural	45,1	31,8	8,8	0,9
Biogás típico [60% CH ₄]	30,0	21,5	6,0	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Metanol*	19,9	15.900	4.415,4	442,9
Etanol*	26,9	21.400	5.942,8	596,1
Gasolina*	45,0	33.300	9.247,4	927,6
Diesel*	42,1	34.500	9.580,7	961,0

FONTE: Brasil (2015, p. 65).

* MJ.m⁻³ e kWh.m⁻³

Obs.: Nm³: volume e condições padrão de temperatura e pressão: 0°C e 1 atm.

Martins (2017) simulou a injeção de biogás em substituição ao gás natural em altos-fornos a coque estimou-se que a porcentagem de CH₄ necessária ao biogás, para que esse possa ser utilizado como combustível auxiliar é de 64% da composição. Considerando a média percentual de metano nos gases produzidos, tanto bovinos quanto suínos, que foi de 74%, concluiu que o biogás tem a composição necessária para ser utilizado de maneira eficiente como combustível auxiliar em alto-forno. Demonstrou-se que o uso do biogás em substituição ao gás natural em altos-fornos, além de ambientalmente vantajoso, é tecnicamente viável.

Nesse cenário, diversas pesquisas consultadas evidenciam que a utilização do biogás traz vantagens não só econômicas, mas também para a natureza, por meio de instalações em que o biogás pode ser totalmente contido, controlado e otimizado comercialmente, aproveitando o potencial da natureza para produzir biocombustível gasoso renovável e ambientalmente sustentável.

A pesquisa de Seadi et al. (2013) afirma que, a longo prazo, a biomassa aquática poderá provar ter potencial como uma valiosa matéria-prima energética para a produção de biogás. Já no curto prazo, por outro lado, os autores ressaltam que a atenção se concentra, principalmente, no aumento da reciclagem e aproveitamento

de subprodutos e resíduos agrícolas, resíduos orgânicos das populações urbanas e resíduos de indústrias ligadas aos setores alimentícios, que têm o maior potencial ainda não aproveitado.

Gomez (2013) constatou que as usinas de biogás de última geração não representam nenhum risco aos humanos ou ao meio ambiente¹¹. O autor afirma que o biogás tem um papel essencial a desempenhar para a mudança dos padrões de fornecimento de energia atuais, uma vez que, por meio desta fonte, pode-se produzir eletricidade e calor como e quando necessário.

Entre os principais benefícios à natureza, ressalta-se que a utilização do biogás pode não só reduzir emissões de gases de efeito estufa, como o metano, mas também fornecer uma fonte renovável de energia (para eletricidade, calor ou transporte), ao mesmo tempo em que reduz a poluição a partir da eliminação de resíduos (PETTEN; AADORF; MURPHY, 2013). De acordo com Brasil (2015),

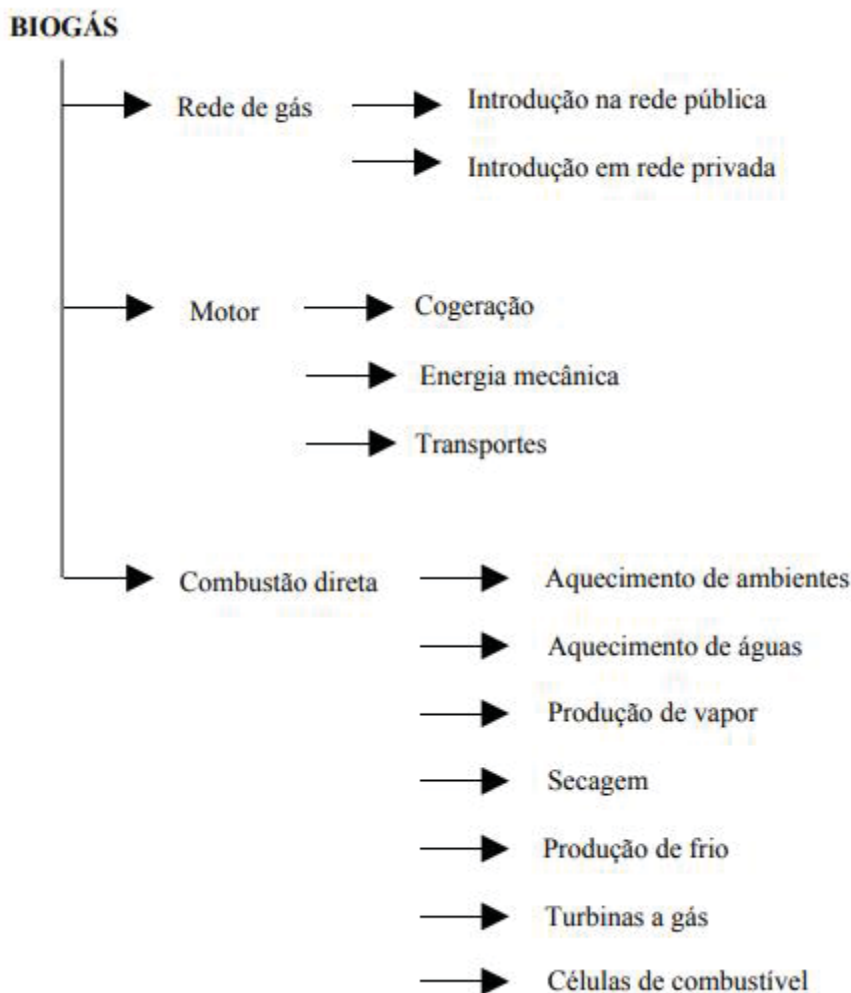
O biogás pode, por exemplo, ser utilizado para gerar energia elétrica e/ou para secar termicamente lodos e escumas. Além disso, o biogás pode ser empregado como combustível veicular, industrial ou residencial. No Brasil, entretanto, a maior parte das ETEs, quando recupera o biogás, simplesmente a queima antes de lançá-lo para a atmosfera, desperdiçando o seu potencial energético e seus eventuais benefícios econômicos, sociais e ambientais. Em vista do aproveitamento do biogás encontrar-se ainda nos primeiros estágios no país, observa-se, atualmente, as dificuldades de um mercado incipiente. Dentre elas, a falta de normas e guias técnicos adaptados à realidade brasileira que indiquem as soluções tecnológicas mais apropriadas para projetos de manejo e recuperação de biogás, incluindo as particularidades de sua produção, de seu tratamento e de sua utilização (BRASIL, 2015, p. 17).

De acordo com Bachmann (2013), o planejamento de instalação de uma usina de biogás deve considerar as condições sociais e legais do local. A aceitação pública de um projeto de biogás é importante, mas geralmente não é uma conquista fácil. A autora afirma que as pessoas costumam se preocupar com impactos como odor, ruídos e paisagem indesejada. Assim, durante os procedimentos de permissão, objeções da população podem retardar ou mesmo impedir um projeto. Para evitar tais dificuldades, a pesquisadora ressalta que a população deve ser informada na fase inicial do projeto, sendo conscientizada sobre os benefícios de seu desenvolvimento.

¹¹ Segundo Gomez (2013), as usinas de biogás são instalações técnicas que processam, por exemplo, produtos e subprodutos da agricultura e processamento de alimentos, diferentes tipos de resíduos orgânicos e culturas energéticas. A digestão produz biogás e um produto digerido que, em na maioria dos casos, fornece um valioso insumo como fertilizante. O biogás é inflamável, mas não explosivo; um ambiente explosivo pode se desenvolver, no entanto, se o metano for presente em concentrações muito baixas de 6–12%.

Segundo Coldebella (2006), o biogás é um combustível gasoso que apresenta conteúdo energético semelhante ao gás natural, que pode ser utilizado conforme as aplicações da Figura 4.

FIGURA 4 – PRINCIPAIS OPÇÕES PARA UTILIZAÇÃO/CONVERSÃO DO BIOGÁS



FONTE: Coldebella (2006, p. 30).

A partir do esquema acima, nota-se que independentemente da forma de utilização do biogás, terá sempre como resultado ao menos uma das seguintes formas de energia: elétrica, térmica ou mecânica. Para Lobato (2011), as principais aplicações do biogás são:

- (i) uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição a outros tipos de combustíveis;
- (ii) geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia;
- (iii) cogeração de eletricidade e calor;
- (iv) combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular (LOBATO, 2011, p. 56).

Além disso, o autor também afirma que o biogás pode substituir compostos de carbono em produtos plásticos (GOMEZ, 2013). Na atualidade, conforme Gomez (2013), o biogás é produzido em usinas de biogás por meio da degradação bacteriana da biomassa sob condições anaeróbias. De acordo com Biosantech et al. (2013), além da energia renovável, o biogás tem o potencial de fornecer soluções ambientalmente corretas e veterinárias para o tratamento de resíduos animais e outros tipos de resíduos orgânicos de forma adequada. Apesar deste enorme potencial, “atualmente, o uso da biomassa para geração de energia elétrica no Brasil é de 8,66 %, em relação às demais fontes energéticas como petróleo, gás natural, energia eólica, entre outras. A geração de biogás equivale a 0,05 % deste valor” (SANTOS et al., 2016, p. 34).

Até o momento, apresentou-se um panorama geral sobre o biogás, considerando sua produção, possíveis aplicações e questões circundantes ao combustível, como sua eficiência energética e impacto em relação à sustentabilidade no Brasil e no mundo. Nas subseções a seguir, são esmiuçados outros aspectos relacionados ao biogás, como os principais tipos de biomassa, o processo de armazenamento da biomassa, biodigestores e o processo de digestão anaeróbia, além de questões relativas ao tratamento e armazenamento do biogás.

3.4 ARMAZENAMENTO DA BIOMASSA, BIODIGESTORES E O PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

Conforme Bochmann e Montgomery (2013), geralmente, os substratos de biogás são úmidos, o que pode dificultar o armazenamento nos biodigestores porque bactérias e mofo podem crescer neles. Além disso, os substratos de biogás também costumam ser fibrosos, o que pode dificultar sua mistura e significa que parte de sua energia fica presa nas fibras. Nessa perspectiva, os autores afirmam que diferentes tecnologias de pré-tratamento para a biomassa estão sendo investigadas para acessar a energia nessas fibras, para aumentar a taxa de produção de biogás e para melhorar as qualidades de mistura dos substratos.

De acordo com Bochmann e Montgomery (2013), as tecnologias de pré-tratamento baseiam-se em três princípios: “físico (incluindo cisalhamento mecânico, calor, pressão e campos elétricos), químico (ácidos, bases e solventes) e biológico (microbiano e enzimático). Combinações desses princípios também são usadas,

incluindo explosão a vapor, extrusão e processos termoquímicos” (BOCHMANN; MONTGOMERY, 2013, p. 85, tradução nossa)¹². Os autores destacam que a maioria dessas técnicas, ainda em estágio de desenvolvimento e pesquisa, estão associadas à alta entrada de energia, altos custos de equipamento ou usam grandes volumes de produtos químicos.

A literatura consultada para o desenvolvimento desta pesquisa demonstrou que os biodigestores são aparelhos destinados ao armazenamento da biomassa. Ressalta-se que não são os biodigestores que produzem o biogás, uma vez que apenas proporcionam as condições para que bactérias metanogênicas produzam esse combustível.

De acordo com Coldebella (2006), existem diversos tipos de biodigestores e uma característica comum a todos eles é a que são constituídos por duas partes:

O tanque digestor no qual se aloja a biomassa e o gasômetro ou campânula em que fica armazenado o biogás. Há dois tipos de sistema: o contínuo e o intermitente. O primeiro é o mais difundido e se adapta à maioria das biomassas, recebe cargas diárias ou periódicas e descarrega o biofertilizante automaticamente. O sistema intermitente é específico para biomassas de decomposição lenta e de longo período de produção. Caracteriza-se por receber a carga total, retendo-a até terminar o processo de biodigestão, quando então é esvaziado e recarregado novamente (COLDEBELLA, 2006, p. 27).

Conforme o autor, o sistema mais difundido no Brasil é o contínuo, e ressalta que as tecnologias mais utilizadas são a chinesa, que é mais rústica e geralmente construída em alvenaria e baixo do nível do solo; e a indiana, que geralmente tem a forma de um poço com a função de tanque digestor, apresentando uma campânula flutuante para o armazenamento do biogás, permitindo o fornecimento do combustível a uma pressão estável.

Ainda, de acordo com Pereira e Van Ier (2013), essas tecnologias descentralizadas de pequena escala, como o digestor de cúpula chinês e o de cúpula flutuante indiana tem séculos. No mundo industrializado, a digestão anaeróbia tem sido empregada principalmente para tratar águas residuais e resíduos úmidos rurais e urbanos.

¹² “*physical* (including mechanical shear, heat, pressure and electric fields), *chemical* (acids, bases and solvents) and *biological* (microbial and enzymatic). Combinations of these principles are also used, including steam explosion, extrusion and thermo-chemical processes” (BOCHMANN; MONTGOMERY, 2013, p. 85).

Segundo Bochmann e Montgomery (2013), a digestão anaeróbia é um processo versátil devido à ampla gama de entrada de materiais que podem ser usados, bem como as várias opções de utilização para o gás produzido e o digerido acumulado. Contudo, há duas principais dificuldades que surgem desta diversidade - armazenamento e processamento.

Sobre o armazenamento, os autores destacam que pode ser um problema porque muitas das matérias-primas se acumulam sazonalmente, mas precisam ser armazenados a baixo custo durante todo o ano. Considerando que todos os substratos contêm matéria orgânica e a maioria é úmida, há um alto risco de decadência microbiana. Isso não só causa perda de substrato, mas pode levar a fortes emissões de odores, e as toxinas e esporos formados podem representar um risco para trabalhadores (BOCHMANN; MONTGOMERY, 2013).

Já em relação ao processamento, os pesquisadores afirmam que pode ser uma dificuldade, uma vez que a biomassa pode ter várias formas, desde líquidos e pastas a lamas e sólidos, com partículas fibrosas ou granulares. Segundo os autores, os materiais viscosos ou fibrosos são difíceis de mover e misturar. Além disso, os complexos lignocelulósicos presentes nas fibras de muitas biomassas são resistentes à degradação (BOCHMANN; MONTGOMERY, 2013). Conforme Murphy e Thamsiroj (2013),

Por sua própria definição, a digestão anaeróbia ocorre na ausência de oxigênio molecular e o ambiente muda de um estado oxidante para um estado redutor. Isso pode ser explicado em termos químicos, observando que receptores de elétrons alternativos devem ser encontrados para substituir o oxigênio molecular. Normalmente, os átomos de carbono associados a compostos orgânicos se tornarão receptores de elétrons e serão reduzidos, enquanto outros compostos orgânicos serão oxidados a dióxido de carbono e ácidos voláteis. O produto final dessa reação ainda contém grande quantidade de energia (potencial para aceitar elétrons) na forma de metano” (MURPHY; THAMSIROJ, 2013, p. 109, tradução nossa)¹³.

De acordo com Pereira e Van Lier (2013), a digestão anaeróbia é uma alternativa muito eficiente para agregar valor à biomassa, uma vez que pode ser

¹³ “By its very definition, anaerobic digestion takes place in the absence of molecular oxygen and the environment changes from an oxidising state to a reducing one. This may be explained in chemical terms by noting that alternate electron acceptors must be found to replace molecular oxygen. Usually, carbon atoms associated with organic compounds will become electron acceptors and will be reduced while other organic compounds will be oxidised to carbon dioxide and volatile acids. The end product of this reaction still contains large amounts of energy (potential to accept electrons) in the form of methane” (MURPHY; THAMSIROJ, 2013, p. 109).

considerada uma tecnologia simples, que converte energia quimicamente ligada em matéria orgânica em um produto gasoso (biogás) rico em metano (CH₄) e um subproduto estabilizado rico em nutrientes (biofertilizante). Além disso, a digestão anaeróbia é considerada uma tecnologia muito flexível, aceitando uma ampla gama de diferentes tipos de substratos, produzindo um portador de energia com um uso final muito flexível.

Os biodigestores fornecem as condições para que ocorra a digestão anaeróbia, ou seja, para o desenvolvimento do ecossistema em que muitos grupos de bactérias e de archaeas realizam a conversão da matéria orgânica complexa em metano, dióxido de carbono, água, gás sulfídrico e amônia (BRASIL, 2015).

Esse processo torna-se ainda mais viável por poder funcionar 24 horas por dia e 7 dias por semana, não dependendo do sol. O que torna-se uma vantagem em relação a energia solar que só tem geração durante uma parte do dia. Essa geração é possível desde que o sistema seja alimentado de dejetos continuamente ou carga suficiente para determinado período.

O processo de digestão anaeróbia é subdividido em 5 etapas: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese, Metanogênese e Sulfetogênese. A Hidrólise e Acidogênese são realizadas pelas mesmas bactérias e consideradas como uma fase. A Sulfetogênese ocorre somente na presença dos sulfatos, e, nessa situação, compete com a Metanogênese, diminuindo a produção do metano (BRASIL, 2015, p. 22).

Para a compreensão das etapas da digestão anaeróbia, optou-se pelo desenvolvimento e apresentação do Quadro 1, que sintetiza o que consta em Brasil (2015):

QUADRO 1 – ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA

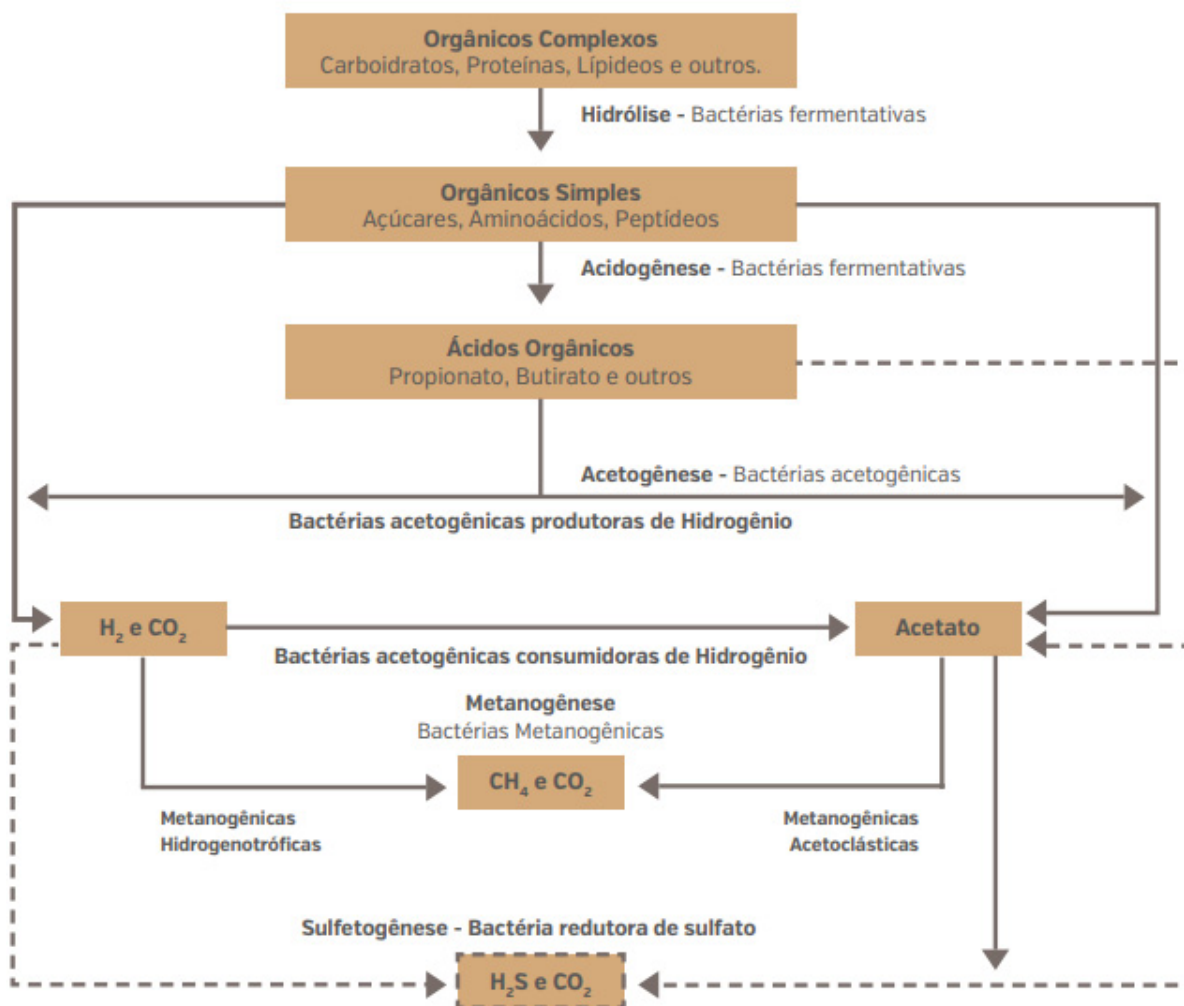
Etapas 1 e 2: <i>Hidrólise</i> e <i>Acidogênese</i>	Na primeira fase, ocorre a solubilização da biomassa, ou seja, a quebra de <i>biopolímeros</i> , que são os compostos orgânicos complexos presentes nos substratos. Para a <i>hidrólise</i> , as bactérias liberam enzimas que convertem os carboidratos complexos em monômeros e açúcares; e as proteínas em aminoácidos e os lipídeos (gorduras), depois de sua emulsificação, em ácidos graxos. Ao mesmo tempo, essas bactérias atuam na fermentação, ou seja, na <i>acidogênese</i> dos produtos obtidos, formando moléculas menores. Como todos os processos biológicos, o processo de acidificação é acelerado em temperaturas elevadas.
Etapa 3: <i>Acetogênese</i>	Essa fase depende da atividade de dois grupos de bactérias acetogênicas: os produtores de hidrogênio, que convertem os compostos orgânicos anteriormente gerados em acetato, liberando hidrogênio (H ₂) e dióxido de carbono (CO ₂); e os consumidores de hidrogênio que produzem o acetato a partir de H ₂ e CO ₂ .
Etapa 4: <i>Metanogênese</i>	Nesta etapa, ocorre o consumo do hidrogênio e do acetato, porém, o excesso de acidez pode inibir o processo. Assim como a produção de metano normalmente

	indica o bom funcionamento da acetogênese, a diminuição na produção (causada, por exemplo, pela competição com as bactérias sulforedutoras) tem como resultado, necessariamente, o acúmulo elevado de hidrogênio (talvez também de acetato) e a inibição da acetogênese. No final da cadeia de degradação anaeróbia nos reatores, desenvolvem-se duas funções primordiais: a produção do biogás, possibilitando, assim, a remoção do carbono orgânico da fase líquida; e, ao mesmo tempo, a manutenção das condições necessárias para a produção dos próprios substratos, promovendo baixa pressão parcial do hidrogênio e acetato no meio líquido, e resultando em metano (CH ₄) e dióxido de carbono (CO ₂). Esses microrganismos são altamente sensíveis a inibições.
Etapa 5: <i>Sulfetogênese</i>	Esse processo tem importância quando a biomassa contém certas quantidades de sulfato (SO ₄ ²⁻), sulfito (SO ₃ ²⁻) ou outros compostos sulfurados. As sulforedutoras (grupo versátil de bactérias e archaeas) utilizam compostos sulfurados, principalmente sulfato, para oxidar, bioquimicamente, compostos orgânicos (ácidos orgânicos, açúcares, glicerol, etanol, aminoácidos e acetato), produzindo os gases sulfeto de hidrogênio (H ₂ S) e CO ₂ , ou, no caso da degradação incompleta, H ₂ S e compostos orgânicos de menor complexidade. Na presença de compostos sulfurados, entretanto, as bactérias sulforedutoras competem com todos os compostos orgânicos formados na cadeia e reduzem o rendimento da formação de biogás. Adicionalmente, o H ₂ S inibe as arqueias metanogênicas.

FONTE: Elaborado a partir de dados de Brasil (2015, p. 23-27).

Verifica-se o processo de conversão da biomassa em biogás ocorre a partir de três grupos principais de microrganismos: “(i) bactérias fermentativas, acidogênicas; (ii) bactérias sintróficas, acetogênicas; e (iii) arqueias metanogênicas. Há, ainda, um grupo opcional de bactérias e arqueias sulforedutoras” (BRASIL, 2015, p. 23). O processo de digestão anaeróbia é ilustrado por meio da Figura 5:

FIGURA 5 – ROTAS METABÓLICAS E GRUPOS MICROBIANOS ENVOLVIDOS NA DIGESTÃO ANAERÓBIA



FONTE: Brasil (2015, p. 22).

A literatura consultada demonstrou que alguns fatores físicos podem afetar a velocidade das reações bioquímicas, sendo o principal a temperatura. Assim, há três faixas de crescimento para as bactérias fermentativas: faixa *psicrófila*, quando a temperatura no biodigestor é menor que 20°C; faixa *mesófila*, quando a temperatura está entre 20 e 40°C; e faixa *termófila*: maior que 40°C (BRASIL, 2015). Constatou-se que as bactérias fermentativas

chegam à sua taxa máxima de crescimento (100%), nas condições termofílicas, entre 50 e 55°C, enquanto, nas condições mesofílicas, encontram o ótimo (65% de taxa máxima) entre 30 e 40°C. A faixa mais estreita nas condições termofílicas significa maior sensibilidade, ou seja, neste caso, uma pequena alteração da temperatura influencia de forma significativa a eficiência (BRASIL, 2015, p. 28).

Se, por um lado, o processo termofílico é o mais eficiente, ou seja, quando a temperatura está entre 50 e 55°C, por outro lado, também tem a desvantagem de possuir a maior sensibilidade, necessitando de maior controle. “Em comparação ao processo mesofílico, o substrato pode ser convertido de 20 a 30% a mais de volume do biogás. Por outro lado, porém, o biogás tem maior concentração de CO₂ e menos metano” (BRASIL, 2015, p. 28). Para Banks e Heaven (2013),

A temperatura tem um forte efeito em uma gama de parâmetros cinéticos, incluindo a taxa máxima de crescimento específico dos microrganismos, a constante de meia saturação, o rendimento do crescimento e a taxa de decomposição. As taxas máximas nas quais os microrganismos podem utilizar substratos são, portanto, fortemente dependentes da temperatura, com os metanogênios mais sensíveis do que as bactérias hidrolíticas ou acidogênicas. Organismos metanogênicos podem crescer em uma faixa de temperatura muito ampla, mas ótimos bem estabelecidos existem em torno de 35–40°C (mesofílico) e em torno de 55°C (termofílico) e essas faixas de temperatura são, portanto, as mais comuns para operação em escala real. Alguns metanógenos são conhecidos por terem temperaturas ótimas de crescimento mais altas, mas esses termófilos extremos não foram explorados até agora em escala comercial. Dependendo do substrato, a taxa de geração de metano em sistemas termofílicos pode ser 25–50% maior do que em sistemas mesofílicos, permitindo tempos de retenção mais curtos. Ao mesmo tempo, os sistemas termofílicos são mais suscetíveis a variações nas condições operacionais e ambientais e são mais propensos a acumular ácidos graxos voláteis (AGV) (BANKS; HEAVEN, 2013, p. 140, tradução nossa)¹⁴.

De acordo com Gomez (2013), os métodos de produção de biogás podem ser caracterizados pelo número de etapas do processo, a temperatura do processo, o teor de matéria seca e a forma em que a biomassa é alimentada. Para o autor, em plantas de biogás que se alimentam de subprodutos agrícolas, como estrume líquido, resíduos de colheita e culturas energéticas, muitas vezes, emprega-se um processo de etapa única na faixa de temperatura mesofílica, com fermentação úmida e alimentação quase contínua. O método pode variar dependendo dos requisitos que o processo, e

¹⁴ “Temperature has a strong effect on a range of kinetic parameters, including the maximum specific growth rate of microorganisms, the half-saturation constant, the growth yield and the decay rate. The maximum rates at which microorganisms can utilise substrates are thus strongly temperature dependent, with methanogens more sensitive than hydrolytic or acidogenic bacteria. Methanogenic organisms can grow over a very wide temperature range but well-established optima exist at around 35–40°C (mesophilic) and around 55°C (thermophilic) and these temperature ranges are therefore the most common ones for full-scale operation. Some methanogens are known that have higher optimal growth temperatures but these extreme thermophiles have not so far been exploited on a commercial scale. Depending on the substrate, the rate of methane generation in thermophilic systems may be 25–50% higher than in mesophilic systems, allowing shorter retention times. At the same time, thermophilic systems are more susceptible to variations in operating and environmental conditions, and are more likely to accumulate volatile fatty acids (VFA)” (BANKS; HEAVEN, 2013, p. 140).

deve atender em termos de velocidade, grau de digestão e a ação higienizadora. Por exemplo, a hidrólise como a primeira etapa geralmente acelera o processo e também pode resultar em maior grau de degradação. Aumentando a temperatura do processo do nível mesofílico para o termofílico, conseqüentemente, acelera-se a degradação e melhora o estado de saúde do substrato.

Para Pereira e Van Lier (2013), o papel do processo de digestão anaeróbia pode ser abordado a partir de três perspectivas: a multifuncional, a protagonista ou a contributiva. Na perspectiva multifuncional, o papel desse processo é o de fazer parte de um sistema de biomassa que compreende muitas cadeias e visa a maximização de seus resultados ambientais, sociais e econômicos, transformando e reutilizando a maioria dos subprodutos seguindo uma abordagem sustentável. No caso do protagonista, as restrições não são impostas pelos processos transformativos de produção existentes, mas, neste caso, a digestão anaeróbia é o principal processo da cadeia, como no caso do cultivo de culturas energéticas especificamente para a produção de energia. Já na perspectiva contributiva, o processo é incorporado às cascatas existentes, sendo seu valor agregado definido em função das complementaridades que pode estabelecer com os processos existentes. Esses processos influenciarão a quantidade e a qualidade dos subprodutos e as possibilidades de reutilização da energia. Nesse sentido, o contexto impõe restrições que limitam o resultado de sustentabilidade de todo o sistema e a contribuição específica da digestão anaeróbia.

3.5 ARMAZENAMENTO E TRATAMENTO DO BIOGÁS

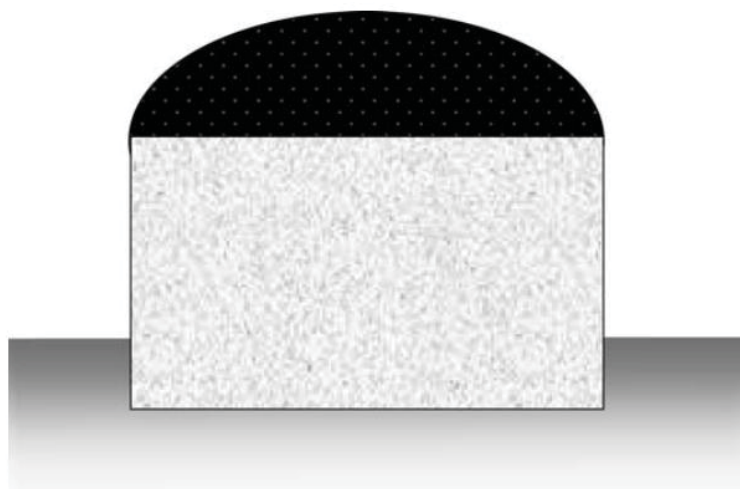
Bachmann (2013) afirma que as instalações de armazenamento de biogás devem ser herméticas e resistentes à pressão, irradiação UV, variações de temperatura e clima adverso com condições como o granizo. Em relação ao armazenamento do biogás, indispensável no caso do seu aproveitamento energético, ressalta-se que o tipo e o porte do gasômetro dependerão da forma de aplicação do biogás:

Quando a planta tem somente queimador de biogás, a instalação de um gasômetro pode ser desnecessária. Contudo, quando é demandada a queima eficiente do biogás e/ou é cogitada a possibilidade de seu futuro uso energético, deve ser prevista a instalação de um gasômetro. Como existem diversas opções de utilização do biogás, não é possível estabelecer uma

forma de mensuração do volume de armazenamento amplamente válida (BRASIL, 2015, p. 78).

Conforme Bachmann (2013), uma possibilidade é armazenar o biogás diretamente dentro do digestor. Nesse caso, uma membrana flexível é usada como teto do digestor e volume de armazenamento. Assim, quando a taxa de produção de gás é maior do que o consumo, a membrana se estende. Para evitar o contato entre a membrana desinflada e o material de digestão, uma estrutura é instalada horizontalmente no topo do digestor, apoiada por um pilar central. No caso de membranas simples, a borracha é normalmente usada devido à sua boa resistência aos raios ultravioleta e elasticidade. Para membranas duplas, o PVC macio é usado. Um soprador de ar entre as duas camadas infla constantemente a membrana externa, protegendo a membrana interna, que infla e esvazia com o volume do gás. Veja-se a Figura 6.

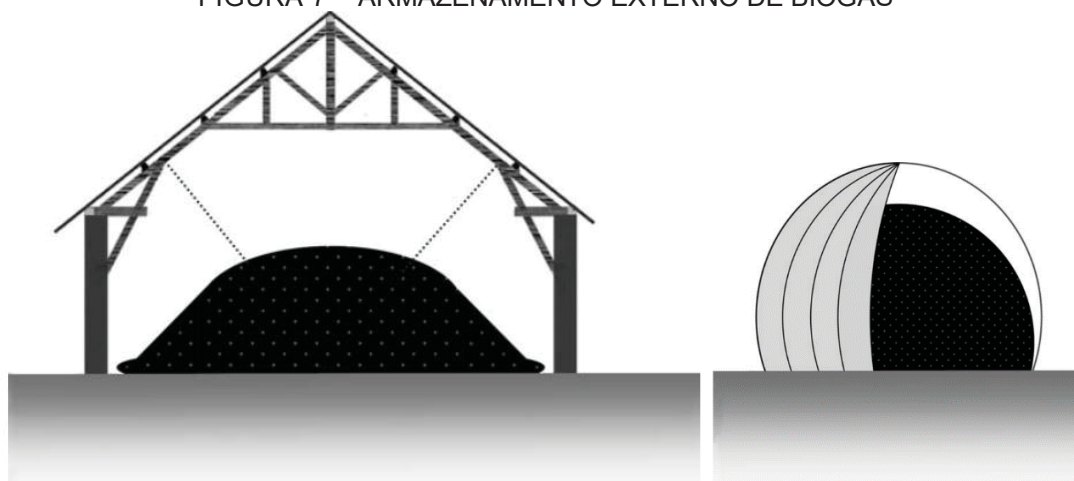
FIGURA 6 – ARMAZENAMENTO INTERNO DE BIOGÁS



FONTE: Bachmann (2013, p. 203).

Outra possibilidade é o armazenamento externo de gás, o que significa que o local de armazenamento é separado do digestor. Segundo Bachmann (2013), na atualidade, as estruturas flexíveis são preferidas para armazenamento externo de gás. Eles podem ser colocados no telhado do digestor ou em outro lugar, mas devem ser protegidos por uma membrana dupla ou por um abrigo, conforme demonstrado na Figura 7:

FIGURA 7 – ARMAZENAMENTO EXTERNO DE BIOGÁS



FONTE: Bachmann (2013, p. 204).

Segundo Petersson (2013), o biogás contém não apenas metano, dióxido de carbono e água, mas também pode conter outros compostos em pequenas quantidades. Assim, a autora destaca que impurezas podem afetar o equipamento para utilização do biogás, causando não só corrosão e desgaste mecânico, mas também emissões indesejáveis. Dependendo de como o biogás será utilizado, precisará passar por alguma forma de limpeza para reduzir a quantidade de substâncias indesejadas. Para Kaparaju e Rintala (2013), geralmente, o pré-tratamento de biogás envolve a remoção de espuma, material particulado e vapor de água junto com H_2S (<100 ppmv) e siloxanos.

De acordo com Gomez (2013), após o processo de dessulfuração¹⁵ e secagem, o biogás pode ser convertido em eletricidade e/ou calor. Após o tratamento, o biometano pode ser usado em todas as aplicações comumente conhecidas para o gás natural. Assim, o biogás e o biometano produzidos a partir do biogás são combustíveis renováveis flexíveis que podem tornar-se matéria-prima para a produção de eletricidade e calor, o que os torna muito importantes para o abastecimento de energia sustentável. Há que se ressaltar que há uma diferença clara entre a utilização do biogás e do biometano:

¹⁵ No caso da dessulfuração do biogás, uma análise do estado-da-arte em nível mundial desenvolvida por Colturato (2015) indicou a utilização de diferentes processos unitários para tal finalidade, que se distribuem em três categorias principais: processos físicos, químicos ou biológicos. Conforme o autor, os processos químicos de dessulfuração do biogás são as alternativas mais empregadas atualmente. “Diversos compostos químicos têm sido estudados e empregados mundialmente, com destaque para os óxidos de ferro (Fe_2O_3); hidróxidos de ferro ($Fe(OH)_3$); carvão ativado e zeólitas impregnadas (KI, K_2CO_3 , $KMnO_4$); soluções alcanolaminas (MEA, DEA, DIPA, MDEA); hidróxido de sódio (NaOH); e quelato férrico” (COLTURATO, 2015, p. 14).

O biogás, depois da remoção das principais impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H₂S, pode ser utilizado para a produção de energia elétrica (CHP) e energia térmica (aquecer, secar, resfriar). Já o biometano é o resultado de uma purificação muito mais exigente e pode ser utilizado como substituto do gás natural veicular (GNV), sendo necessária, ainda, uma compressão e posterior armazenamento. Atualmente, não é permitida a injeção de biometano oriundo de ETEs na rede de gás natural no Brasil, apenas como uso experimental ou específico (vide Resolução ANP N°8, de 30.01.2015). Porém, esta pode vir a ser uma opção futura (BRASIL, 2015, p. 88).

Segundo Gomez (2013), devido à imensa variedade de matérias-primas que podem ser aproveitadas para a produção do biogás, uma quantidade muito significativa de energia pode ser produzida com o biogás. O autor estimou que, considerando a possibilidade de produção de 28 estados europeus (considerando estados da União Europeia e da ex-União Soviética), seria possível produzir 250 bilhões de metros cúbicos de biometano da digestão em usinas de biogás. De acordo com dados da pesquisa de Gomez (2013), esse número poderia dobrar se o biometano fosse acrescentado à produção termoquímica de gás natural sintético. No total, haveria 500 bilhões de metros cúbicos padrão de biometano, o que seria suficiente para atender o atual consumo de gás natural dos 28 estados membros da União Europeia.

O autor ressalta que, apesar de esse cenário hipotético não ocorrer na Europa nos próximos anos, não se deve desconsiderar o potencial do biometano previsto pelo estudo, pois é muito claro que o potencial de biometano disponível a nível europeu pode dar um contributo significativo para o abastecimento de energia do futuro. Conforme Santos et al. (2016),

faz-se necessária uma etapa de purificação desse gás, uma vez que compostos indesejáveis, como ácido sulfídrico, água e dióxido de carbono, comprometem a qualidade do combustível, além de causar corrosão em motores. O biogás purificado, também denominado biometano, possui algumas destinações: combustível, energia elétrica e térmica etc. Existem algumas limitações para o seu uso, tais como o armazenamento. O biometano possui características semelhantes ao metano do gás natural (GN). Procedimentos adotados atualmente baseiam-se no armazenamento utilizado para o GN; como os sistemas de liquefação e compressão, não muito eficientes e de difícil aplicação para o biometano (SANTOS et al., 2016, p. 34).

Outras pesquisas que avaliaram a importância do biometano são as realizadas por Beil e Beyrich (2013) e por Urban (2013). Segundo os autores, dependendo dos níveis de preços (especialmente para o gás natural), o biometano

pode, no futuro, tornar-se um dos mais promissores combustíveis de energia renovável. A flexibilidade do biometano no que diz respeito à capacidade de armazenamento, local e desacoplamento temporal de produção e utilização, bem como aplicabilidade em vários caminhos de utilização formam, em combinação, a característica única de biometano.

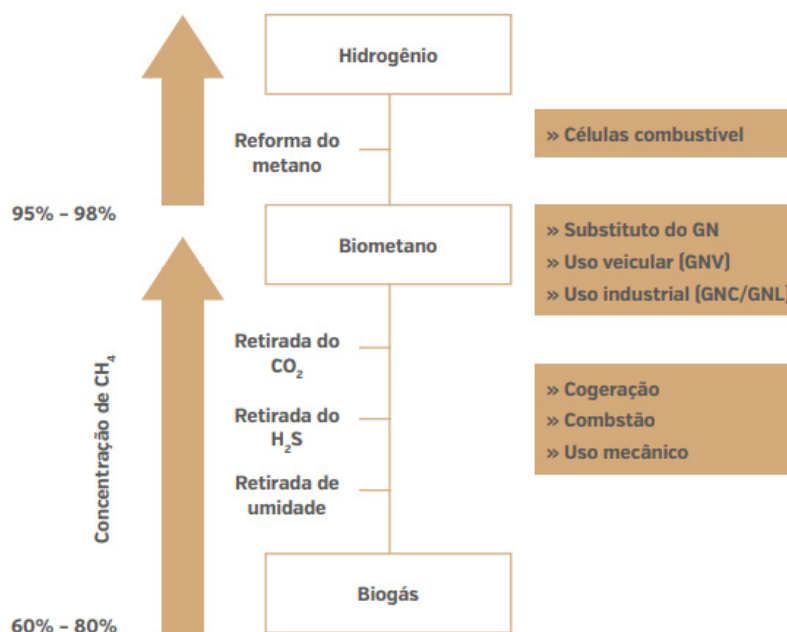
Para Lobato (2011), antes do tratamento do biogás, avalia-se a equivalência energética deste em relação ao combustível a ser substituído. Já para a escolha da tecnologia de conversão, deve-se considerar não só o poder calorífico, mas também outras propriedades, como “pressão, presença de umidade, contaminantes, gases inertes e gases ácidos, estes últimos responsáveis por corrosão precoce dos equipamentos e emissões indesejadas de poluentes” (LOBATO, 2011, p. 67). Para a autora,

Qualquer que seja o uso pretendido para o biogás, haverá sempre a necessidade de algum tipo de tratamento. Esse requisito poderá ser mínimo, a exemplo da simples remoção de condensado, no caso de usos menos nobres como a combustão direta; como bastante completo, quando se almeja a injeção na linha de gás natural ou a utilização como combustível veicular (LOBATO, 2011, p. 67).

Na Figura 8, exemplifica-se a necessidade de tratamento do biogás conforme o uso final. Ressalta-se que, para a seleção da tecnologia de conversão, deve-se observar não só o poder calorífico da produção e composição do biogás, mas também outras propriedades, “como a presença de umidade, pressão, contaminantes, gases inertes e gases ácidos, esses últimos responsáveis pela corrosão precoce dos equipamentos e emissão de poluentes” (BRASIL, 2015, p. 77).

Portanto, se a qualidade do gás bruto não atender aos requisitos para o aproveitamento energético do biogás, será necessário algum tipo de tratamento. Esse tratamento poderá ser menos sofisticado, no caso de usos mais simples, como a combustão direta, com a simples remoção de condensado; como em casos bastante complexos, quando se deseja uma aplicação como biometano (BRASIL, 2015, p. 77).

FIGURA 8 – TRATAMENTO DE BIOGÁS



FONTE: Brasil (2015, p. 89).

A combustão direta sem recuperação de energia, segundo Lobato (2011, p. 57), ocorre por meio de queimadores, ou seja, em “dispositivos que possibilitam a ignição e a queima de gases”. De acordo com a autora, apesar de esses queimadores inviabilizarem o aproveitamento energético do biogás, são necessários em todas as usinas de biogás, para evitar explosões e por razões ambientais.

Além disso, a pesquisa demonstra que existem dois tipos de queimadores: os abertos, que são acoplados a defletores de vento para proteger as chamas; e os fechados, que possibilitam a combustão do biogás no interior de uma câmara. Basicamente, as principais características de ambos os tipos de queimadores são as seguintes:

Queimadores abertos: O controle de gás é rudimentar e não existe isolamento térmico; Combustão incompleta do biogás e perda de calor na queima; Não conseguem atender aos padrões internacionais de desempenho e de emissões; Custo 25-70% menor quando comparado com os queimadores fechados; Podem ser removidos de um local e assentados em outro.

Queimadores fechados: Pode ser projetado para atender especificidades locais; A combustão ocorre sob condições controladas; Os níveis de fumaça, chama e ruído são praticamente imperceptíveis; Capazes de atender aos padrões internacionais de desempenho e de emissões; Capazes de operar em uma grande faixa de condições de combustão; São instalações permanentes, não podendo ser transportadas para outro local (LOBATO, 2011, p. 58).

Já o método de combustão direta com recuperação de energia é, conforme Lobato (2011), a forma mais eficiente de recuperar energia do biogás, pois cerca de 80% do valor calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil. “Este tipo de uso de biogás respondeu, em 2008, por cerca de 1/3 de todos os projetos de recuperação de energia nos EUA” (LOBATO, 2011, p. 59). No entanto, apesar de ser o método mais eficiente, a principal desvantagem é que o consumidor precisa estar próximo à fonte de geração.

As principais vantagens da produção de energia elétrica pelo uso do biogás são:

- (i) geração descentralizada, com a geração de energia próxima da fonte consumidora; (ii) possibilidade de lucro adicional devido à produção de energia e comercialização com companhias energéticas; (iii) redução no consumo de energia pela planta produtora; (iv) potencial de uso de processos para a cogeração de energia; (v) redução das emissões de metano para a atmosfera, gerando créditos de carbono (LOBATO, 2011, p. 62).

A literatura consultada demonstrou que, por mais eficiente que seja o processo de transformação da energia do biogás em energia elétrica, uma parte considerável da energia contida no combustível é transformada em calor, que é perdido no meio ambiente. No entanto, de acordo com Lobato (2011), por meio da cogeração, pode-se aproveitar o calor que seria perdido, o que amplia a eficiência energética do processo.

Sobre a cogeração, Gomez (2013) afirma que ocorre quando o biogás é convertido em eletricidade e calor no local onde o gás é produzido: o calor pode ser usado localmente e a eletricidade alimenta a rede pública. O autor afirma que essa é a forma preferida de utilização da energia do biogás na Europa atualmente.

O aproveitamento se dá, por exemplo, sob a forma de vapor, água quente e/ou fria para aplicação secundária. As principais tecnologias disponíveis para a cogeração de energia e calor são, segundo Lobato (2011, p. 62), “motores de combustão interna, turbinas a gás e microturbinas”. A partir da Tabela 3, sintetizam-se os níveis de tratamento requeridos para diferentes tipos de usos do biogás.

TABELA 3 – NÍVEIS DE TRATAMENTO REQUERIDO PARA DIFERENTES TIPOS DE USO DO BIOGÁS

Tipo de uso do biogás	Nível de tratamento			Outros requisitos
	Remoção de água	Remoção de H ₂ S	Remoção de CO ₂	
Combustão direta (queimadores abertos e fechados)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento parcial (H ₂ S < 5 ppmv no caso de queimadores fechados**)	Nenhum tratamento	De-foaming (controle de espuma) Compressão* Temperatura ≥ 900°C** Tempo de residência ≥ 0.3s** Hidrocarbonetos ≤150 mg/m ³ ***
Uso direto para geração de calor (ex. combustível para caldeiras e aquecedores)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento completo	Nenhum tratamento	-
Cogeração de eletricidade e calor a partir de motores de combustão interna	Tratamento parcial a completo	Tratamento parcial a completo***	Nenhum a tratamento completo	-
Cogeração de eletricidade e calor a partir de turbinas e microturbinas	-	Turbina (H ₂ S < 10000 ppmv)*** Microturbina (H ₂ S < 50ppmv)***	-	Pressão do combustível nas microturbinas: 345-552kPa
Injeção na rede de gás natural	Tratamento completo (umidade < 70-80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 5 mg/m ³)	Tratamento completo (CH ₄ ≥ 95%)	Compressão: 60-70 bar ****
Motores a gás (ex.: combustível veicular)	Tratamento completo (umidade < 70-80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 1000-2000 mg/m ³)	Tratamento completo	Compressão: 200 bar Teor energético: 13-21 MJ/m ³

FONTE: Lobato (2011, p. 68).

* Pode ser necessário se a pressão do biogás for muito baixa

** Requisitos da Norma Holandesa de Emissões (NER 3.5/90.1). Nos queimadores abertos não há como determinar temperatura e tempo de residência.

*** Variável de acordo com a demanda dos fabricantes das tecnologias de conversão energética.

**** Variável dependendo da rede de gás natural

De acordo com Bachmann (2013), desde o crescimento do setor de biogás no final da década de 1990, principalmente na Alemanha, o conhecimento sobre a engenharia de usinas de biogás tem constantemente melhorado. A tecnologia desenvolveu-se fortemente, assim, novas e otimizadas soluções foram propostas. Hoje, as opções tecnológicas são vastas e o principal desafio é escolher a melhor opção para uma situação específica. Logo, a autora ressalta que a maioria dos problemas em usinas de biogás ocorre devido a falhas humanas ou negligência, tanto durante o projeto e engenharia ou durante a operação. Problemas como entupimento de tubos, abrasão de material, camadas flutuantes e sedimentação no digestor podem ocorrer, por exemplo, quando a tecnologia não é adaptada para a matéria-prima ou quando a matéria-prima não está adaptada à tecnologia.

3.6 VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS

A demanda mundial por energia deve continuar crescente nos próximos anos, com aumento da busca por outras fontes. Conforme estudo de viabilidade econômica do Cibiogás (2022), o biogás além de ser uma fonte alternativa de energia elétrica, térmica e de biocombustível, tem potencial para viabilizar a redução de custos e a diversificação de renda, promovendo sustentabilidade econômica e aumentando o poder de competitividade do empreendimento.

Para Mariani (2018), mesmo que o biogás tenha um importante potencial energético, um dos grandes benefícios associados à sua produção refere-se justamente ao tratamento de efluentes e resíduos para redução do potencial poluidor. “A possibilidade de gerar energia por meio da implementação do tratamento do efluente passa a ser atrativa e motivar o cumprimento da obrigação ambiental das empresas e propriedades rurais. Outro benefício é a produção do digestato, efluente do processo, que possui propriedades fertilizantes para o solo” (MARIANI, 2018, p. 20).

O biogás é uma fonte de energia limpa e renovável. É uma alternativa ao GLP e ao gás de cozinha, pois não deixa resíduos, como fuligem, nas panelas.

Segundo Onnio (2022), entre as vantagens do Biogás também estão:

- Descarte alternativo de esterco, esterco líquido e bioresíduos, ao mesmo tempo em que os aproveita como um fonte de energia, um substituto para os combustíveis convencionais;
- Alto potencial de redução de gases de efeito estufa;
- Altamente eficiente para energia e calor combinados no local geração;
- O substrato restante do digestor pode ser usado como fertilizante agrícola de alta qualidade, caracterizado neutralizando o efeito ácido com um valor de ph mais alto, mantendo os nutrientes retidos e sendo quase inodoro (ONNIO, 2022, tradução nossa)¹⁶.

A utilização da biomassa residual como fonte alternativa de energia garante geração de energia elétrica a partir da produção do biogás além de possibilitar a

¹⁶ “• Alternative disposal of dung, liquid manure and biowaste while simultaneously harnessing them as an energy source, a substitute for conventional fuels;
• High potential for reduction of greenhouse gases;
• Highly efficient for combined on-site power and heat generation;
• The remaining substrate from the digester can be used as high-quality, agricultural fertilizer, characterized by neutralizing the acid effect with a higher ph-value, keeping nutrients retained and being nearly odorless” (ONNIO, 2022).

redução do seu passivo ambiental e agregar maior rentabilidade ao empreendimento, conforme Fernandez (2012, p. 138).

Segundo Soares, Miyamaru e Martins (2017), no reaproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de modo geral, o biogás tem as seguintes vantagens: redução dos gases de efeito estufa; receita adicional para aterros existentes (energia + créditos de carbono); utilização para geração de energia ou como combustível; e redução da possibilidade de ocorrência de autoignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano.

3.7 VIABILIDADE ECONÔMICA

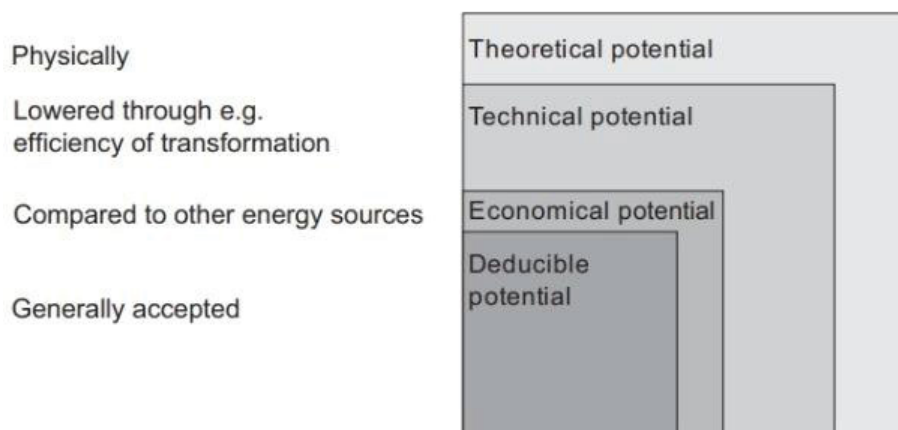
A viabilidade econômica de um projeto engloba estudos sobre o mercado e a economia como um todo para avaliar se algum tipo de investimento é viável ou não. O ideal que essa análise seja feita antes do projeto começar a ser implantado, para que se saiba com antecedência se o investimento terá um retorno aceitável.

Para Micuanski (2014), a análise de viabilidade de um projeto consiste em levantar os gastos envolvidos com investimento inicial, operação, manutenção assim como as receitas geradas durante determinado período para termos o fluxo de caixa relativo a esses investimentos, custos e receitas levantando o fluxo de caixa relativo a esses investimentos, para determinar os indicadores econômicos conseguidos com esse projeto.

Tanto Resch (2008) quanto Deublein e Steinhäuser (2011) citam que existe na concepção de um projeto de energias renováveis uma lacuna entre o potencial técnico e lucrativo e o potencial realizável do projeto.

A Figura 9 de Deublein e Steinhäuser (2011) representa os potenciais teóricos, técnico, econômico e realizável. Onde vemos que na ordem eles vão diminuindo, isso ocorre devido a diversos fatores.

FIGURA 9 – AVALIAÇÃO DO ESCOPO DO POTENCIAL TEÓRICO AO REALIZÁVEL



FONTE: Deublein e Steinhauser (2011, p. 14).

Segue a descrição dos potenciais apresentados na Figura 9.

De acordo com Deublein e Steinhauser (2011, p. 13, tradução nossa), “O Potencial Teórico compreende toda a energia que teoricamente deveria ser gerado fisicamente dentro de um período de tempo definido e um espaço definido”¹⁷.

Já Resch (2008, p. 4049, tradução nossa) salienta ainda que o potencial teórico “representa o limite superior do que pode ser produzido a partir de um determinado recurso energético de um ponto de vista teórico, de curso, com base no conhecimento científico atual”¹⁸.

Para Deublein e Steinhauser (2011, p. 13, tradução nossa), “o potencial técnico é parte da energia do potencial teórico. É parte específica que pode ser fornecida dentro dos dados estruturais e ecológicos limites e respeitando quaisquer restrições legais”¹⁹. E Resch (2008, p. 4049, tradução nossa) cita que, “para a maioria dos recursos, o potencial técnico deve ser visto em um contexto dinâmico - por exemplo com o aumento das tecnologias de conversão pode ser melhorado e, portanto, o potencial técnico aumentaria”²⁰.

Para Deublein e Steinhauser (2011), o potencial econômico pode não ser realizável sem qualquer apoio administrativo de algumas instituições. E salienta que

¹⁷ “The theoretical potential comprises all the energy that should theoretically be physically generated within a defined time period and a defined space” (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011, p. 13).

¹⁸ “It represents the upper limit of what can be produced from a certain energy resource from a theoretical point-of-view—of course, based on current scientific knowledge” (RESCH, 2008, p. 4049).

¹⁹ “The technical potential is part of the energy of the theoretical potential. It is that specific part which can be provided within the given structural and ecological boundaries and by respecting any legal restrictions” (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2011, p. 13).

²⁰ “For most resources the technical potential must be seen in a dynamic context—e.g. with increased R&D conversion technologies might be improved and, hence, the technical potential would increase” (RESCH, 2008, p. 4049).

o valor do petróleo está subindo mundialmente que faz com que qualquer viabilidade técnica será lucrativa mais cedo ou mais tarde.

Já para Resch (2008),

o potencial realizável representa o potencial máximo alcançável assumindo que todos os obstáculos podem ser superados e todas as forças motrizes estão ativas. Assim, parâmetros gerais como, taxas de crescimento do mercado, planejamento e restrições são levadas em consideração. É importante mencionar que este termo potencial deve ser visto em um contexto dinâmico, ou seja, o potencial realizável tem que se referir a um determinado ano (RESCH, 2008, p. 4049, tradução nossa)²¹.

3.7.1 Métodos de análise de viabilidade econômica

3.7.1.1 Fluxo de caixa

Fluxo de caixa é, segundo Marion (1998 citado por MICUANSKI, 2014), a indicação da origem de todo o dinheiro que entrou no caixa, bem como a aplicação de todo o dinheiro que saiu do caixa em determinado período, e, ainda o resultado do fluxo financeiro. O fluxo de caixa resume as entradas e saídas efetivas de dinheiro ao longo de um determinado período ao qual o projeto foi planejado, permitindo conhecer a sua rentabilidade e viabilidade econômica. Neste sentido, os fluxos de caixa representam a renda econômica gerada pelo projeto ao longo de sua vida útil.

3.7.1.2 Valor Presente Líquido ou VPL

Valor Presente Líquido é a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente. Se VPL for positivo, então o valor investido será recuperado e haverá um ganho. Se VPL for zero, significa que aplicar não fará diferença. Agora se VPL for negativo significa que o investido resgatará um valor menor que o valor investido, então não se deve aplicar neste investimento (CASAROTTO FILHO et al., 1994 citado por MORAES, 2020).

Para Castro et al. (2011):

²¹ “The realisable potential represents the maximal achievable potential assuming that all existing barriers can be overcome and all driving forces are active. Thus, general parameters as, e.g. market growth rates, planning constraints are taken into account. It is important to mention that this potential term must be seen in a dynamic context—i.e. the realisable potential has to refer to a certain year” (RESCH, 2008, p. 4049).

o valor presente líquido é a soma algébrica dos valores descontados do fluxo de caixa a ele associado, ou seja, é a diferença do valor presente das receitas menos o valor presente dos custos. sendo a característica essencial do método do VPL é o desconto, para o presente, de todos os fluxos de caixa esperados como resultado de uma decisão de investimento (CASTRO et al., 2011, p. 354).

Segundo Fleischer (1988, p. 125 citado por ZAGO et al., 2009) a característica essencial do método do Valor Presente Líquido “é o desconto para o valor presente de todos os fluxos de caixa esperados como resultado de uma decisão de investimento”.

3.7.1.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

É a taxa que equipara o valor investido com o valor resgatado no final do investimento. Ou seja, a taxa necessária para trazeremos o valor final do investimento para o valor presente e este seja igual ao valor investido. Para Leite (2012), a taxa interna de retorno TIR é a taxa de retorno que iguala o valor presente líquido VPL do fluxo de caixa a zero. Ela representa a real rentabilidade do investimento e por isso é considerada a taxa interna do empreendimento.

Um parâmetro para saber a viabilidade do projeto é quando a $TIR > TMA$ (taxa mínima de atratividade) o projeto é economicamente viável, agora se a $TIR < TMA$ o projeto é inviável, mas se a $TIR = TMA$ é indiferente investir os recursos no projeto ou deixar rendendo juros à taxa mínima de atratividade (MOTTA; CALÔBA, 2002 citado por CHRISTMANN, 2009).

A TIR é a taxa que relaciona o valor investido com valor resgatado ao fim do investimento. Ou seja, a taxa necessária para que o VLP seja igual a zero Casarotto Filho et al. (1994).

$$TIR = i \rightarrow VPL = 0 \quad (1)$$

Então, se $TIR > i$, o investimento deve ser aceito, se $TIR < i$ o investimento deve ser repensado.

3.7.1.4 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

É a taxa de juros escolhida para o projeto de acordo com o investidor, que espera um retorno igual ou maior a taxa de referência.

Para Cruz (2021, p. 15) a TMA consiste na taxa mínima de retorno que um investidor ou empresa está disposto a aceitar antes de dar início a um determinado projeto, dados seus riscos e o custo de abrir mão de outros projetos.

Uma taxa usada no Brasil como referência é a rentabilidade da poupança que é atrelada a outra taxa também muito usada, um pouco mais rentável, que é a Taxa Selic.

3.7.1.5 Payback

O Payback é o período de tempo, determinado em meses ou anos, necessário para que o de capital investido seja recuperado pelo investidor. Para Micuanski (2014), é um importante indicador do nível de risco de um investimento e salienta, que este método não considera os fluxos de caixa gerados durante a vida útil do investimento após o período e, portanto, não permite comparar o retorno entre dois investimentos

Segundo Gitman (1987 citado por CHRISTMANN, 2009), outra razão para investidores adotarem o método como fator relevante, é que reflete a liquidez do projeto e deste modo o risco de recuperar o investimento. Quanto maior for o período de *Pay-Back*, maior é o risco para a empresa, menor a liquidez do investimento, e vice-versa.

Para Zanini (2016), o Payback calcula o tempo de retorno do capital investido e aponta o momento em que o lucro líquido acumulado se iguala ao valor inicial do investimento. Sua fórmula de cálculo é simples, conforme pode ser visualizada na Equação 1 :

$$\text{PayBack} = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Ganho no Período}} \quad (2)$$

Quanto menor for o tempo de retorno do investimento mais atrativo será o projeto.

3.7.1.6 Custo Nivelado de Energia - LCOE

O custo nivelado de energia (LCOE) permite que tecnologias alternativas sejam comparadas em diferentes escalas de operação, existem diferentes períodos de investimento e de operação, ou ambos. Por exemplo, o LCOE poderia ser usado para comparar o custo da energia gerada por um recurso renovável com o de uma unidade geradora de combustível fóssil padrão (SHORT; PACKEY; HOLT, 1995).

O LCOE é frequentemente citado como uma medida conveniente da competitividade de diferentes tecnologias de geração. Ele representa o custo por megawatt-hora, em unidades monetárias descontadas, da construção e operação de uma planta geradora durante todo seu ciclo de vida útil.

No cálculo do custo nivelado de energia no Brasil tem-se a metodologia proposta por Nakabayashi (2015 citado por MORAES, 2020), o valor, dado em R\$/MWh, é comparado ao preço da tarifa de energia elétrica vigente a fim de julgar a sua viabilidade considerando o horizonte da vida útil dos sistemas. Segundo Nakabayashi (2014 citado por WEIRICH, 2021), o LCOE pode ser entendido de acordo com a Equação 4:

$$LCOE = \frac{\text{Custos ao longo da vida útil do empreendimento}}{\text{Energia gerada ao longo da vida útil do empreendimento}} \quad (3)$$

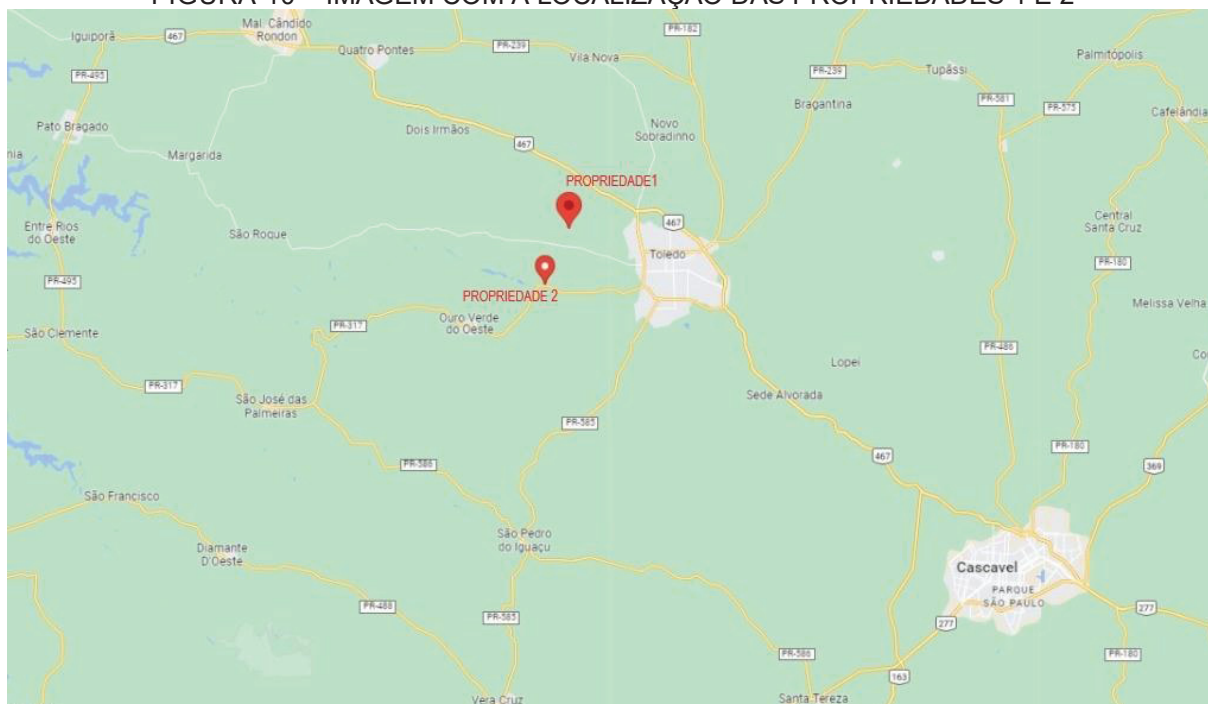
O LCOE é um balizador onde se obtém o preço mínimo médio pelo qual é necessário vender a eletricidade gerada pelo ativo, a fim de compensar os custos totais de produção ao longo de sua vida útil. Para Moraes (2020) o cálculo do LCOE está relacionado ao conceito de avaliação do valor presente líquido de um projeto. De maneira semelhante ao uso do VPL, o LCOE pode ser usado para determinar se um projeto será um empreendimento que vale a pena. Para Branker (2011), uma compreensão clara da relação custo-benefício e viabilidade de diferentes tecnologias de energia é fundamental para determinar as políticas de gestão de energia para qualquer nação e ainda complementa dizendo que a metodologia LCOE é uma abstração da realidade e é utilizada como ferramenta de benchmarking ou ranking para avaliar a relação custo-benefício de diferentes tecnologias de geração de energia.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 MATERIAL

Para executar esse trabalho foi analisado duas propriedades com sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás, já em funcionamento, que utilizam dejetos suíno no processo, localizadas na cidade de Toledo, Paraná. Foram realizadas visitas aos locais com entrevistas aos proprietários e coleta de dados de custos e gastos do sistema. Na Figura 10, temos a localização da propriedade 1, $24^{\circ}42'13.1''\text{S } 53^{\circ}49'18.1''\text{W}$ e da propriedade 2, $24^{\circ}44'38.0''\text{S } 53^{\circ}50'27.4''\text{W}$.

FIGURA 10 – IMAGEM COM A LOCALIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES 1 E 2



FONTE: Google Earth – Localização das propriedades 1 e 2.

Já na Figura 11, temos a imagem aérea da propriedade 1 que conta com 4 barracões, com cerca de 3000 cabeças de suínos alojadas de ciclo terminação, em torno de 750 cabeças por barracão. Sendo que os leitões entram pesando em média 20 a 23kg e saem após 114 a 120 dias pesando em média 130 a 150kg. A figura 12 mostra também o biodigestor, do modelo canadense, com volume aproximado de 1.800m^3 onde é gerado o biogás e a lagoa de biofertilizante, mostrada na figura 13, de 1.800m^3 volume aproximadamente, resultante após processo. Fertilizante gerado que é utilizado na própria propriedade para fertilizar culturas de aveia e outras.

FIGURA 11 – IMAGEM AÉREA DA PROPRIEDADE 1



FONTE: Google Earth (s.d.)

FIGURA 12 – BIODIGESTOR DA PROPRIEDADE 1



FONTE: Imagem do autor.

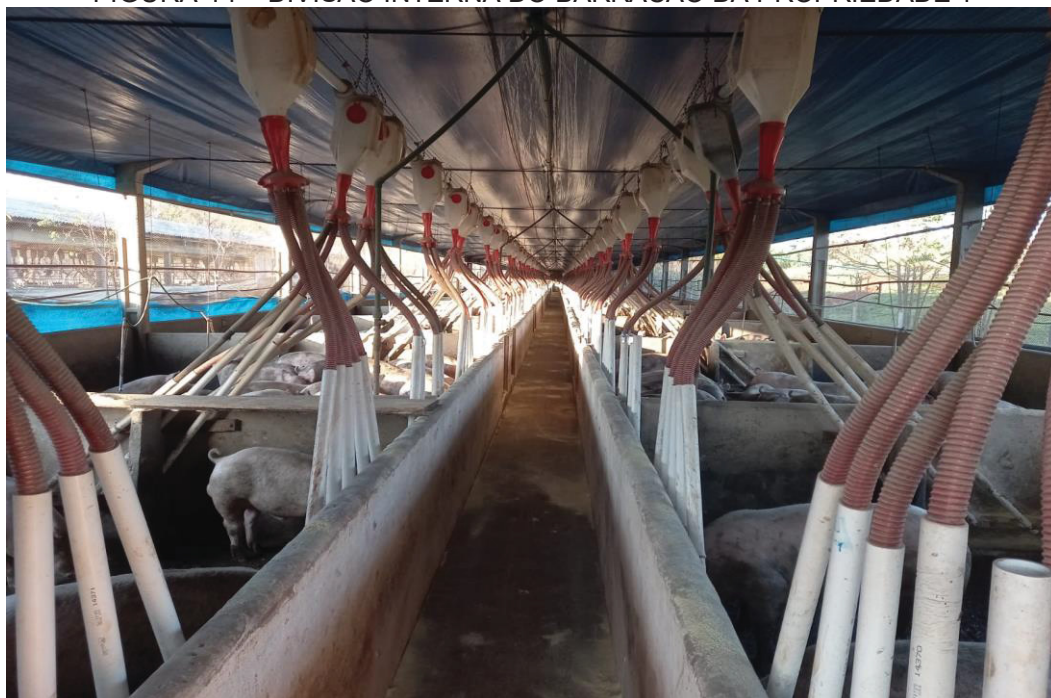
FIGURA 13 – LAGOA DE BIOFERTILIZANTE DA PROPRIEDADE 1



FONTE: Imagem do Autor.

Na Figura 14, temos a imagem interna do barracão, que mede 10 metros de largura por 95 metros de comprimento, e conta com sistema automatizado de alimentação tanto da ração quanto da água. Possibilitando a diminuição da mão de obra para criação. Sistema esse que pode ser programado para funcionamento em determinado horário. Com a continuidade de alimentação os animais ganham mais peso e o produtor tem resultados melhores no tempo de abate.

FIGURA 14 – DIVISÃO INTERNA DO BARRACÃO DA PROPRIEDADE 1



FONTE: Imagem do Autor.

O sistema é operado de forma remota onde temos na Figura 15 o gerador, com motor de Ciclo Otto, que funciona em média 14 horas por dia, e possui acionamento e desligamento via internet, Figura 16, a partir do quadro de comando adaptado, mostrado na Figura 17, o que ajuda na diminuição do custo de operação já que a mesma pessoa opera remotamente mais que uma planta.

FIGURA 15 – GERADOR PROPRIEDADE 1



FONTE: Imagem do Autor.

FIGURA 16 – CÂMERA DO MONITORAMENTO



FONTE: Imagem do Autor

FIGURA 17 – QUADRO DE COMANDO



FONTE: Imagem do Autor.

Já na Figura 18, temos a imagem aérea da propriedade 2 que conta com 3 barracões com cerca de 4200 cabeças de suínos alojadas, em torno de 1400 cabeças por barracão que entram na propriedade no ciclo de terminação pesando em torno de 20 a 21kg e após 108 dias saem pesando em média 129kg. A figura 19 mostra também o biodigestor, do modelo canadense, com volume aproximado de 1.800m³, onde é gerado o biogás e a lagoa de biofertilizante, mostrada na figura 20, com volume aproximado de 1.600m³, resultante após o processo.

FIGURA 18 – IMAGEM AÉREA DA PROPRIEDADE 2



FONTE: Google Earth (s.d.)

FIGURA 19 – BIODIGESTOR DA PROPRIEDADE 2



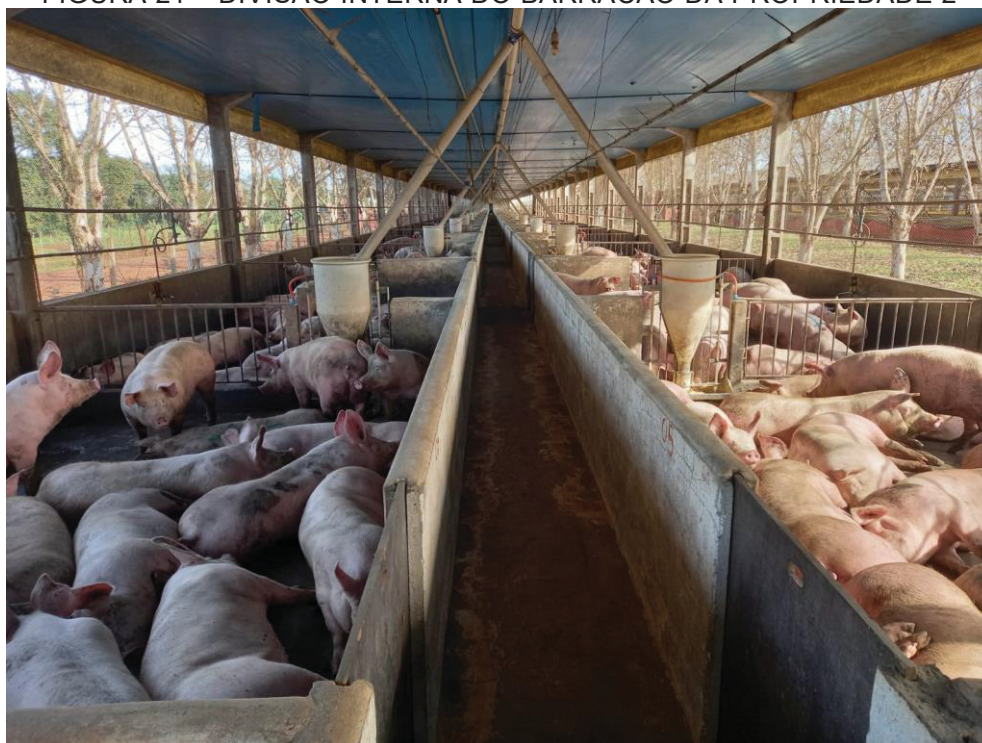
FONTE: Imagem do Autor.

FIGURA 20 – LAGOA DE BIOFERTILIZANTE DA PROPRIEDADE 2



FONTE: Imagem do Autor.

FIGURA 21 – DIVISÃO INTERNA DO BARRACÃO DA PROPRIEDADE 2



FONTE: Imagem do Autor.

O sistema é operado de forma remota onde temos na Figura 22 o gerador, com motor de Ciclo Otto, que funciona em média 15 horas por dia, e possui acionamento e desligamento via internet a partir do quadro de comando adaptado,

mostrado na Figura 23. O que ajuda na diminuição do custo de operação já que a mesma pessoa opera remotamente mais que uma planta.

FIGURA 22 – GERADOR PROPRIEDADE 2



FONTE: Imagem do Autor.

FIGURA 23 – QUADRO DE COMANDO



FONTE: Imagem do Autor.

Os barracões tem o chão lavado, e essa água é somada a produção de dejetos que gira em média 3 a 5kg de dejetos por animal por dia, na propriedade 1 é adotada a lavagem das baias 1 uma vez por semana no verão e em épocas de clima mais quente e no inverno essa frequência diminui sendo lavadas em média a cada 30 dias, para evitar dos animais ficarem doentes, já na propriedade 2 é adotado em média 3 lavagens das baias por ciclo de produção, o que resulta em um intervalo médio entre as lavagens de 30 dias. Ambas utilizam em média até 50 litros de água por baia em cada lavagem.

Como a temperatura e o clima interferem no processo de produção do biogás, temos, na Tabela 4, os dados climatológicos da região de Toledo –PR. Local onde o

clima é considerado quente e temperado. Onde tem-se dados que podem ser úteis na concepção de um projeto de biogás, pelo processo de produção ser influenciado pela temperatura. Existe uma pluviosidade significativa e distribuída ao longo do ano. Mesmo o mês mais seco ainda assim tem muita pluviosidade. Segundo a Köppen e Geiger o clima é classificado como Cfa. 21.0 °C é a temperatura média em Toledo. A média anual de pluviosidade é de 1835 mm. (Climate-Data, 2022)

TABELA 4 – DADOS CLIMATOLÓGICOS DE TOLEDO-PR

	Janeir o	Fevereir o	Març o	Abri l	Mai o	Junh o	Julh o	Agost o	Setembr o	Outubr o	Novembr o	Dezembr o
Temperatur a média (°C)	24.2	24	23.4	21.7	17.8	16.8	16.4	18.4	20.3	22.4	22.8	23.9
Temperatur a mínima (°C)	20.7	20.6	19.8	18	14.5	13.5	12.8	14.1	15.9	18.3	18.8	20.1
Temperatur a máxima (°C)	28.5	28.5	28	26.3	22.1	21.2	21.2	23.9	25.9	27.5	27.5	28.4
Chuva (mm)	176	172	134	132	164	139	114	97	156	200	161	190
Umidade (%)	78%	78%	75%	74%	76%	78%	75%	66%	65%	70%	71%	75%
Dias chuvosos (d)	15	13	11	7	7	7	6	5	8	10	10	12
Horas de sol (h)	8.8	8.5	8.4	8.3	7.1	7.3	8.0	8.8	8.9	8.8	9.2	9.3

FONTE: Climate-Data (2022).

Segundo Climate-Data (2022) este relatório mostra as condições meteorológicas características de Toledo com base em uma análise estatística de relatórios horários históricos e reconstruções de modelo. Data: 1991 – 2021 Temperatura mínima (°C), Temperatura máxima (°C), Chuva (mm), Umidade, Dias chuvosos. Data: 1999 – 2019: Horas de sol.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 A produção de biogás

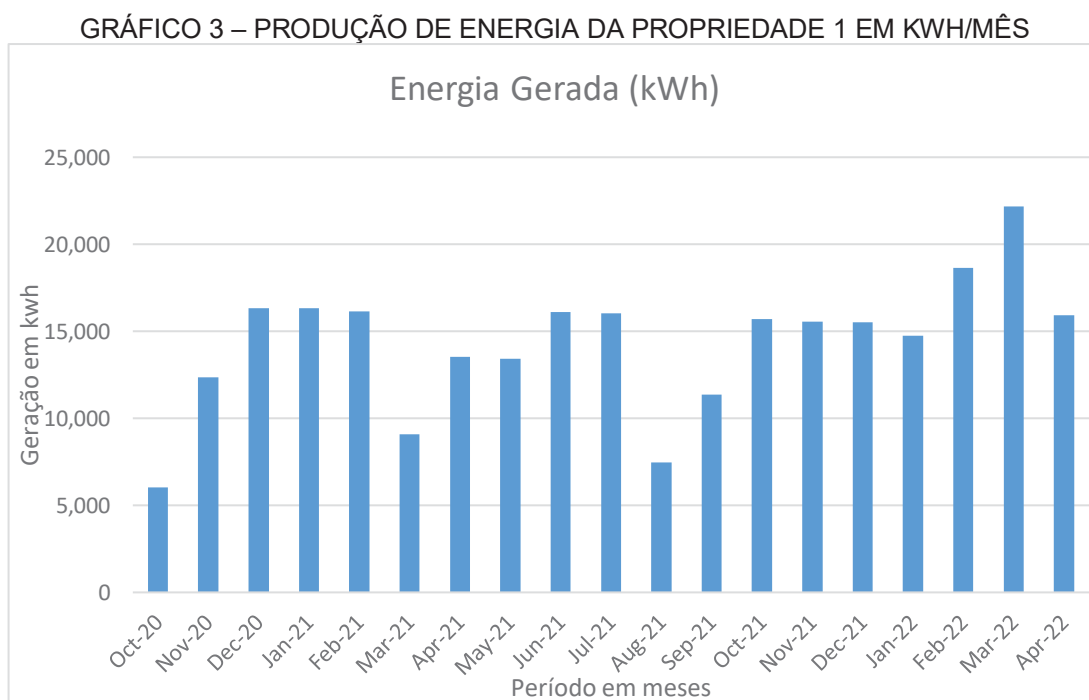
Os dados da produção de biogás foram retirados de tabela fornecida pelo fabricante do gerador, Biogás Motores, que para cada m³ de biogás gera em torno de 1,82kwh/m³ de biogás. Produtores informaram que em média o suíno produz 3 litros de excremento por dia que se junta com a água da lavagem das baias indo tudo para

o biodigestor. O processo é interrompido no final da engorda de cada lote de animais, que dura de 114 a 120 dias para atender o vazio sanitário de mais ou menos 10 dias para a vinda do próximo lote.

4.2.2 Geração de eletricidade

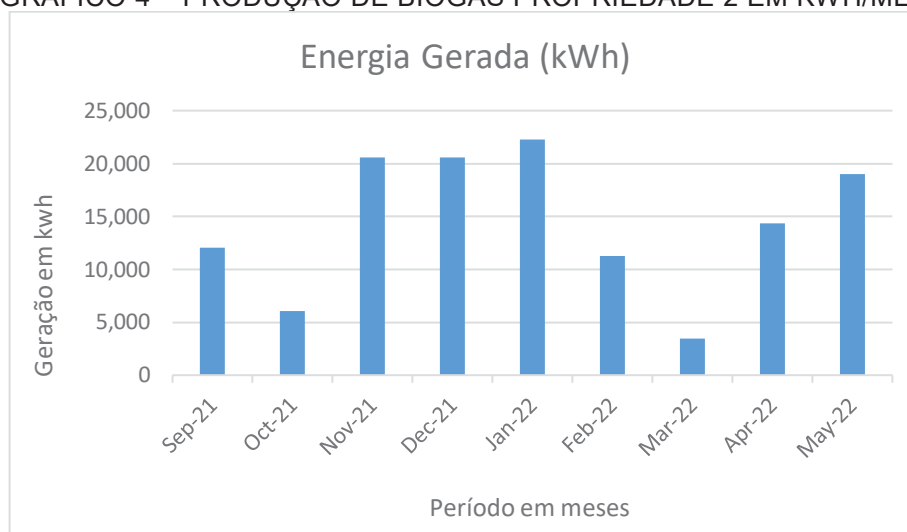
A produção de biogás para a geração de eletricidade está diretamente relacionada a capacidade instalada da planta e da quantidade de animais, assim como a fase que os animais se encontram, pois quanto maiores mais dejetos produzem para alimentar o biodigestor anaeróbio.

Os dados eletricidade gerada mês a mês foram coletados através do histórico de cada empreendimento, sendo que a propriedade 1 teve média mensal de 14.343kwh/mês, em 19 meses, mostrado no Gráfico 3 e a propriedade 2 teve média mensal de produção de 14.396kwh/mês em 9 meses, mostrado no Gráfico 4.



FONTE: Autor

GRÁFICO 4 – PRODUÇÃO DE BIOGÁS PROPRIEDADE 2 EM KWH/MÊS



FONTE: Autor.

4.2.3 Cálculo de viabilidade econômica

Para obtenção da viabilidade econômica, será utilizado o Valor Presente Líquido (VPL), calculando por meio da equação 4. Primeiro é o fluxo de caixa, ou seja, o somatório de todos os custos e receitas em cada período. Em seguida, é descontado o valor anual pela taxa mínima de atratividade (TMA) adotada, sendo o somatório destes valores anuais descontados igual ao valor presente líquido Casarotto Filho et al. (1994 citado por MORAES, 2020).

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (4)$$

onde:

- VPL Valor presente líquido;
- I_0 Investimento inicial na planta;
- FC_t Fluxo de caixa no período;
- i Taxa de juros em %;
- η Número de períodos totais do projeto;
- t Período em anos;

Sendo que o investimento inicial na planta foi obtido dos custos de implantação gastos pelo investidor da planta de geração. O fluxo de caixa no período é resultante das receitas geradas subtraídas das despesas do mesmo período. A TMA ou taxa de juros adotada foi de 4%, 8% e 12% ao ano. Levando em conta que a

inflação média dos últimos 20 anos segundo o IBGE foi de 6,3% ao ano. E o número de períodos é dado em anos.

O custo anual evitado é todo custo futuro que pode ser evitado. Calculado pela quantidade de energia gerada vezes o valor pago pelo kwh. Onde também deve ser descontado da energia gerada mensalmente a taxa mínima da concessionária, que segundo a Resolução Normativa 414 de 2010 da ANEEL (Agência Nacional de Energia) é de 100kwh para padrão trifásico. O payback a ser utilizado é o descontado para ser trazidos os custos a valores presentes.

4.2.4 Levelized Cost of Energy (LCOE)

Para o cálculo do custo nivelado de energia foi adotado Moraes (2020), onde o LCOE pode ser calculado tomando primeiro o valor presente líquido do custo total da construção e operação do ativo gerador. Esse número é então dividido pela geração total de eletricidade ao longo de sua vida útil.

$$LCOE = \frac{\sum_t^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_t^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

onde:

$LCOE$	Custo nivelado de energia;
I_t	Despesas de investimento no ano t (R\$);
M_t	Despesas de operação e manutenção no ano t (R\$);
F_t	Despesas com combustível no ano t (R\$);
E_t	Geração de eletricidade no ano t (MWh);
n	Vida do sistema (anos);
r	Taxa de desconto (% a.a.);
t	Tempo em anos;

Sendo que: I - despesas de investimento foram obtidas pelos custos de investimento inicial gastos pelo investidor na implantação de cada projeto; M - as despesas de operação e manutenção foram estipuladas na média anual dos gastos que o investidor tem nesses empreendimentos estudados e outros que administra, considerando manutenções preventivas, corretivas, trocas de peças e eventuais correções que devam ser feitas para funcionamento do sistema, onde foi adotado manutenção anual média de 7% do custo do investimento inicial; F – não foram

consideradas despesas com combustível na planta estudada, portando, considerado valor zero para o item; E – a geração de eletricidade foi obtida através do histórico de geração de cada propriedade; n – a vida útil do sistema adotada foi de 20 anos por ser um período considerado coerente para retorno máximo de um investimento e também termos valores consideráveis de manutenção do equipamento acima desse período, tomando como referência que Gomes e Raiher (p.801. 2013) adotam vida útil de 10 anos para sistema enquanto Weirich (2021) adotou 25 anos de vida útil para o sistema de produção de biogás a partir de dejetos suínos, r - as taxas de desconto adotadas foram estipuladas em 4%,8% e 12% ao ano.

4.2.5 Fator de Capacidade

O fator de capacidade é a relação entre a quantidade de energia que um projeto gera em relação a Capacidade que poderia gerar.

Para o cálculo do Fator de Capacidade foi adotado a fórmula 6 de Megawhat (2022):

$$FC: \frac{E_t}{P \times t} \quad (6)$$

onde:

E [em MWh] é a energia gerada no período de tempo t; (anual).

P [em MW] é a potência instalada. Fator de potência do gerador igual a 0,8.

T [em horas] é o intervalo de tempo considerado. (8.760horas).

O conceito de Fator de Capacidade é um conceito técnico para medir indicador de produtividade muito usado em plantas solares e eólicas. Segundo Megawhat (2022) quanto mais próximo de 1, maior é a geração de energia dessas usinas em relação à capacidade instalada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para cada propriedade estudada foi analisado o LCOE obtido utilizando os custos de investimento iniciais para implantação, os custos de operação e manutenção e a energia gerada para o período definido de 20 anos que seria a vida útil econômica estipulada para o sistema, podendo é claro que ele dure além desse período mais 10, 20 ou 30 anos desde que haja as manutenções devidas, sendo que após esse período o valor para manter o seu correto funcionamento deve ser um pouco mais alto pelo desgaste do equipamento e talvez possa haver alguma alteração na produção. O valor obtido do Lcoe foi comparado com o valor contratado pago por kwh pela concessionária de energia.

5.1 PROPRIEDADE 1

5.1.1 Investimento

Os investimentos totais gastos para implantação do sistema de biogás para geração de energia elétrica da propriedade 1 estão na Tabela 5, desde escavação do biodigestor e colocação de lona apropriada para retenção do gás, custo do motor gerador já adaptado ao biogás e o painel de controle e conexão com a rede.

TABELA 5 – INVESTIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO 1

Etapa	Custos (R\$)
Biodigestor modelo mistura completa:	R\$ 75.000,00
Motor Gerador Modelo Biogás - WEG 73kVA - Ciclo Otto - GGB 75	R\$ 150.000,00
Implantação - Painel de controle e ligação c/ rede	R\$ 100.000,00
Total do investimento	R\$ 325.000,00

FONTE: Autor.

Após o investimento inicial de implantação foi considerado um valor de manutenção anual de 7% do valor do custo total de implantação, para manutenções periódica preventivas como troca de óleo e filtros, que geralmente acontecem a cada 300 horas de funcionamento do equipamento, e manutenções corretivas do motor, como bobinas, turbina e válvulas dentre outros que tem trocas constantes também,

além de quebras ou acidentes eventuais que podem ocorrer e tem um custo para manter o sistema em operação. Essas informações de implantação e custos de manutenção foram baseadas em valores repassados pelo operador do sistema que opera a usina desde sua implantação.

Na propriedade 1 a produção teve um pico de 22.160kwh/mês, com a média mensal de 14.343kwh/mês, em torno de 35% menor que o valor máximo, tendo ao longo do período a geração oscilado 26,61% (coeficiente de variação). Um dos fatores dessa oscilação é decorrente do estágio de terminação dos suínos. Em geral quando a propriedade recebe os suínos com aproximadamente 60 dias e pesando entre 20kg e 23kg por animal a produção de dejetos é menor, além do período do vazio sanitário adotado de 10 a 15 dias, onde a planta fica sem animais.

Os dejetos que alimentam o biodigestor vêm por meio da gravidade até a lagoa coberta que fica em cota mais baixa que os barracões que abrigam os animais.

5.1.2 Cálculo do LCOE e resultados

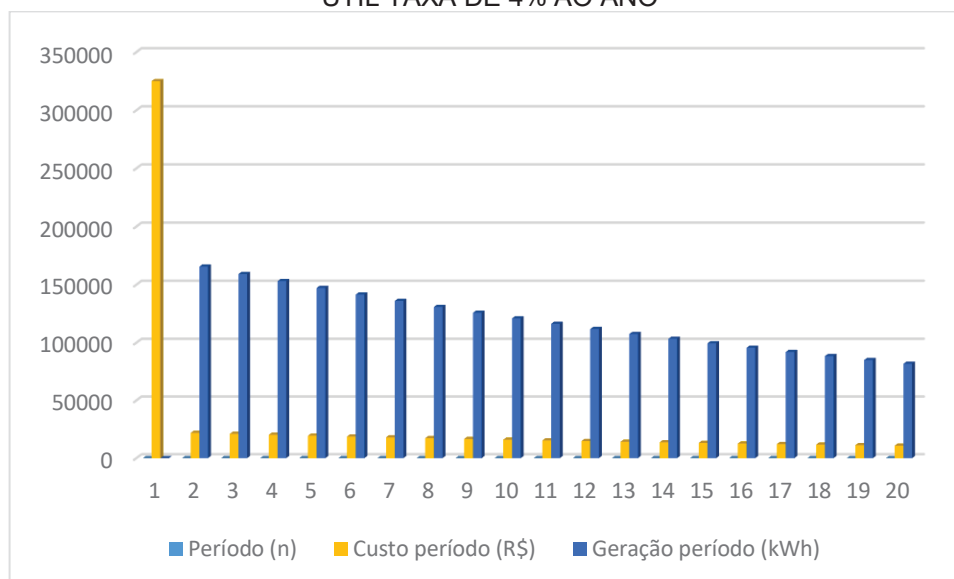
Para o cálculo do LCOE foi considerado os custos do investimento inicial, custos de operação anual, a vida útil adotada e a média da geração de energia no período em kwh.

- Investimento inicial: R\$ 325.000;
- Custos de operação e manutenção anual: R\$ 22.757,50;
- Taxa de juros anual: 4%;
- Período: 20 anos;
- Total gerado: 172.116 kWh;

O valor do LCOE encontrado para a taxa de juros de 4% ao ano foi de **0,271R\$/kwh**.

Isso significa que o LCOE < 0,42R\$/kwh (valor recebido pelo kwh gerado). Portanto em comparação com o valor pago pela kwh gerado o sistema é viável por ter um custo menor que o valor de venda. No Gráfico 5, temos o comparativo entre geração e custo ao longo do período da vida útil proposta. Nota-se que o custo inicial é maior e vai diminuindo ao longo do tempo. Com a geração bem maior que os custos.

GRÁFICO 5 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 4% AO ANO



FONTE: Autor.

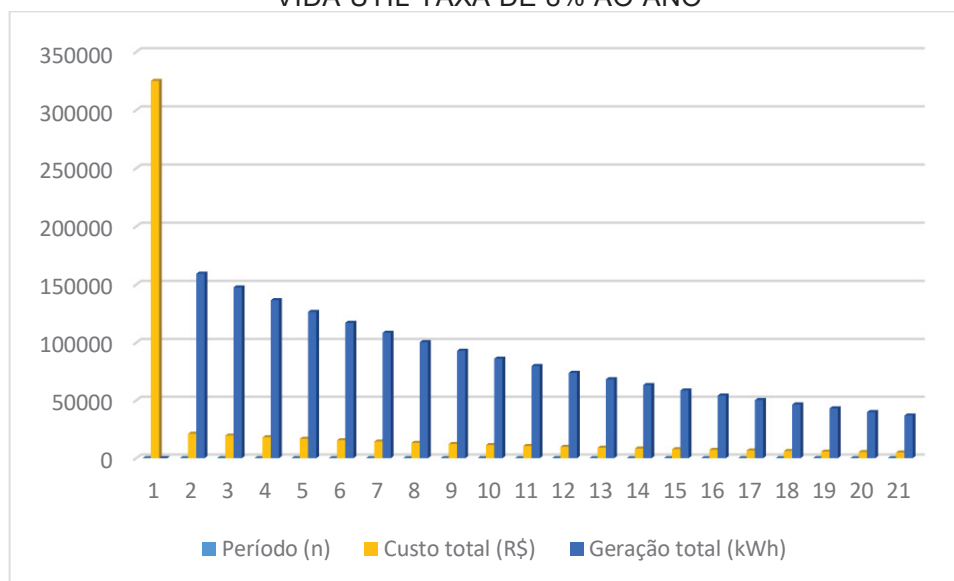
Utilizando a mesma forma de cálculo do Lcoe agora com taxa de juros anual de 8%.

- Investimento inicial: R\$ 325.000;
- Custos de operação e manutenção anual: R\$ 22.757,50;
- Taxa de juros anual: 8%;
- Período: 20 anos;
- Total gerado: 172.116 kWh;

O valor do LCOE encontrado para a taxa de juros de 8% ao ano foi de **0,325R\$/kwh**.

Isso significa que o LCOE < 0,42R\$/kwh (valor recebido pelo kwh gerado). Portanto em comparação com o valor pago pela kwh gerado o sistema é viável por ter um custo menor que o valor de venda. No Gráfico 6, temos o comparativo entre geração e custo ao longo do período da vida útil proposta.

GRÁFICO 6 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTOS AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 8% AO ANO



FONTE: Autor.

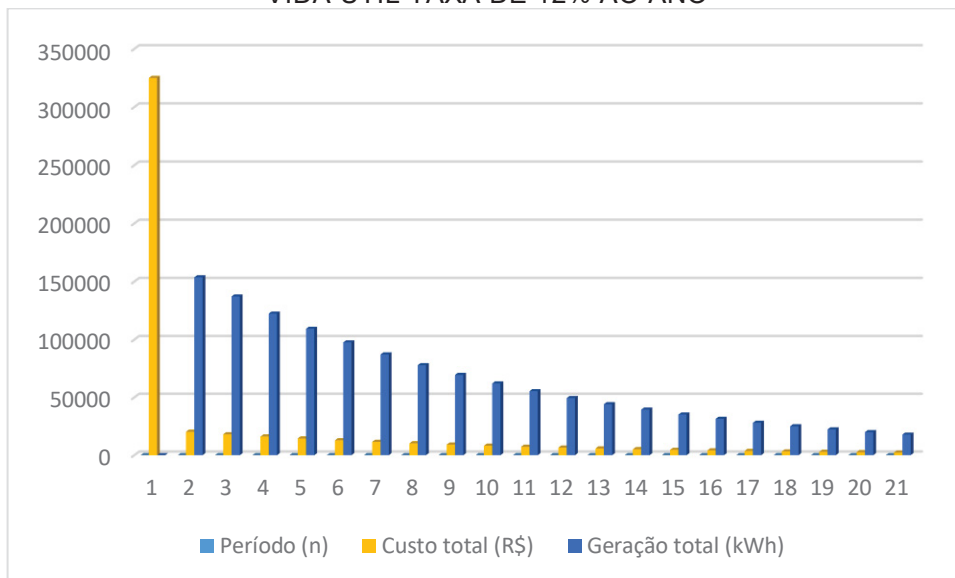
Utilizando a mesma forma de cálculo do LCOE, agora com taxa de juros anual de 12%.

- Investimento inicial: R\$ 325.000;
- Custos de operação e manutenção anual: R\$ 22.757,50;
- Taxa de juros anual: 12%;
- Período: 20 anos;
- Total gerado: 172.116 kWh;

O valor do LCOE encontrado para a taxa de juros de 12% ao ano foi de **0,385R\$/kwh**.

Isso significa que o LCOE < 0,42R\$/kwh (valor recebido da pelo kwh gerado). Portanto em comparação com o valor pago pela kwh gerado o sistema é viável por ter um custo menor que o valor de venda. No Gráfico 7, temos o comparativo entre geração e custo ao longo do período da vida útil proposta. Percebemos que continua a diminuição da curva dos custos e a geração de energia continua um pouco maior que os custos.

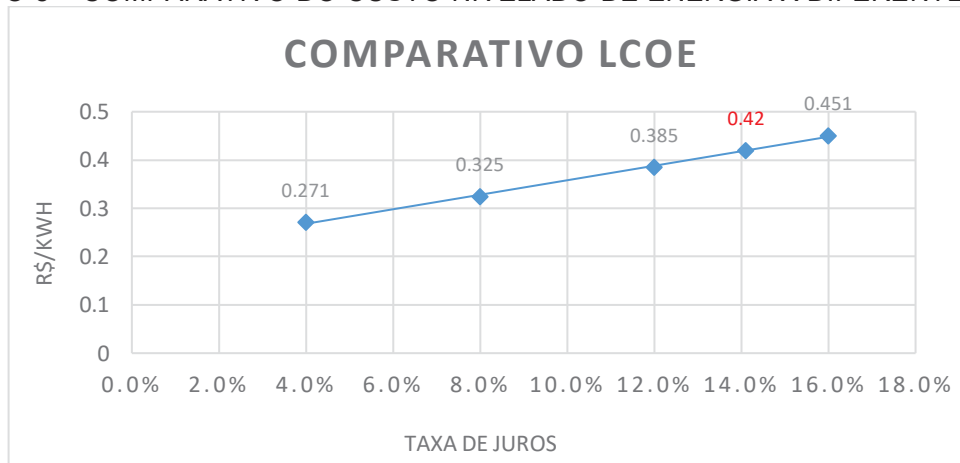
GRÁFICO 7 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 12% AO ANO



FONTE: Autor.

No Gráfico 8, temos um resumo do comparativo dos resultados de LCOE obtidos com as diferentes taxas aplicadas.

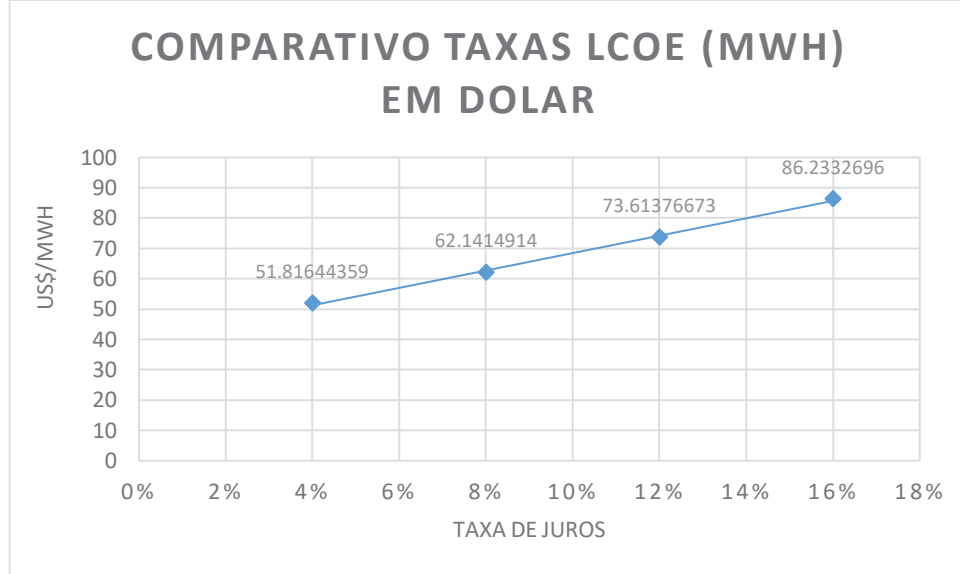
GRÁFICO 8 – COMPARATIVO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA X DIFERENTES TAXAS



FONTE: Autor.

Comparando as diferentes taxas adotadas para o custo nivelado de energia (LCOE) vemos a crescente do custo/kwh de energia à medida que a taxa de juros aumenta. Até os 12% ao ano ainda se encontra menor que R\$0,42/kwh recebido. Sendo, portanto, ainda viável se adotado essa ferramenta como parâmetro. Destacado em vermelho no gráfico o Lcoe de 0,42R\$/kwh que representa a taxa de juros de equilíbrio para ter viabilidade o projeto, que ficou em 14,1% ao ano. Também temos o Lcoe de 0,451R\$/kwh correspondente a taxa de juros de 16% ao ano.

GRÁFICO 9 – COMPARATIVO DO LCOE EM DÓLAR X DIFERENTES TAXAS



FONTE: Autor.

No Gráfico 9, temos o comparativo do custo nivelado de energia em dólar. Foi adotado o câmbio de US\$1,00 x R\$5,23 cotação do dia 30 de junho de 2022. Também foi usado o megawatt-hora (Mwh), que é a medida usada internacionalmente para o LCOE, dólar por megawatt-hora (Mwh). Observa-se que o LCOE resultante está entre as energias mais baratas comparados a outras formas de geração de energia estudadas em Lazard, (2022), renováveis e convencionais, que variam de US\$37,00 – US\$212,00/Mwh (Megawatt-hora), mostradas no ANEXO 1.

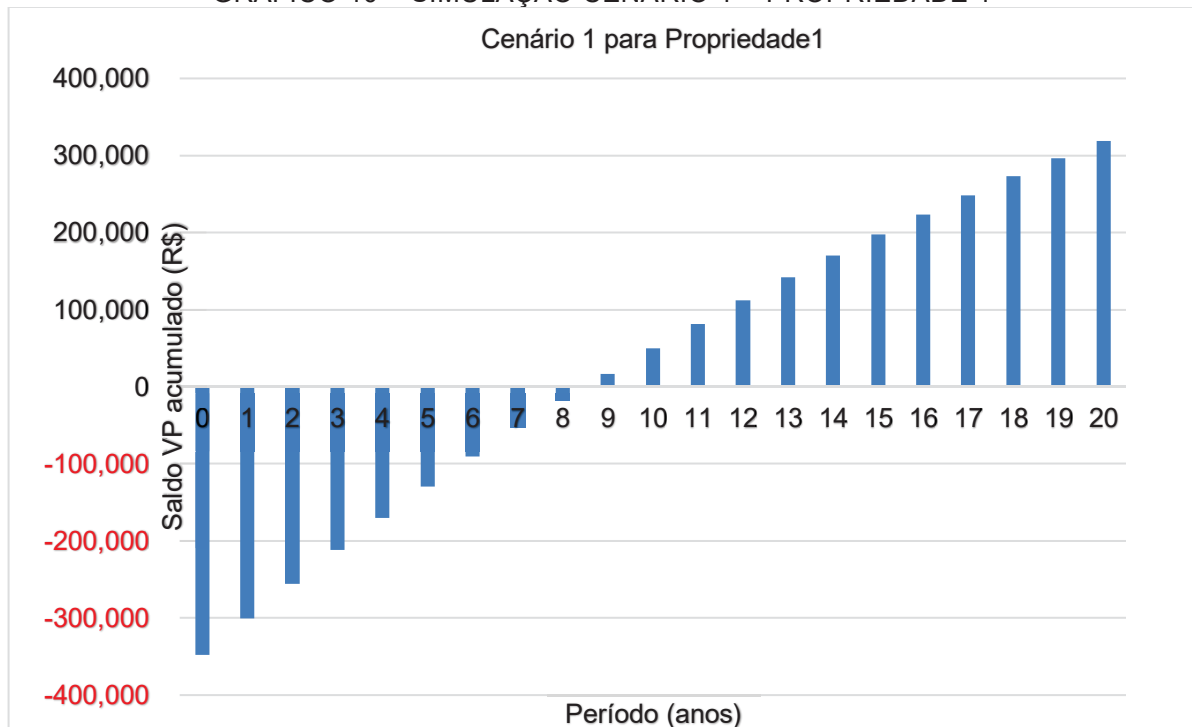
5.1.3 Análise da viabilidade econômica

Para a análise da viabilidade econômica foram feitas análises utilizando o valor presente líquido (VPL) aplicando 3 cenários de taxas diferentes, 4%, 8% e 12% ao ano. Tendo um custo anual evitado de R\$71.784,72 nos três cenários.

5.1.3.1 Cenário 1

Utilizando a taxa de juros de 4% ao ano para o cálculo do valor presente líquido acumulado, vemos no Gráfico 10 que o investimento leva 9 anos para se pagar. Com saldo acumulado negativo no final do oitavo ano de R\$ -17.669,74 e a partir do nono ano ficando positivo com saldo acumulado de R\$16.776,14.

GRÁFICO 10 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 1 – PROPRIEDADE 1



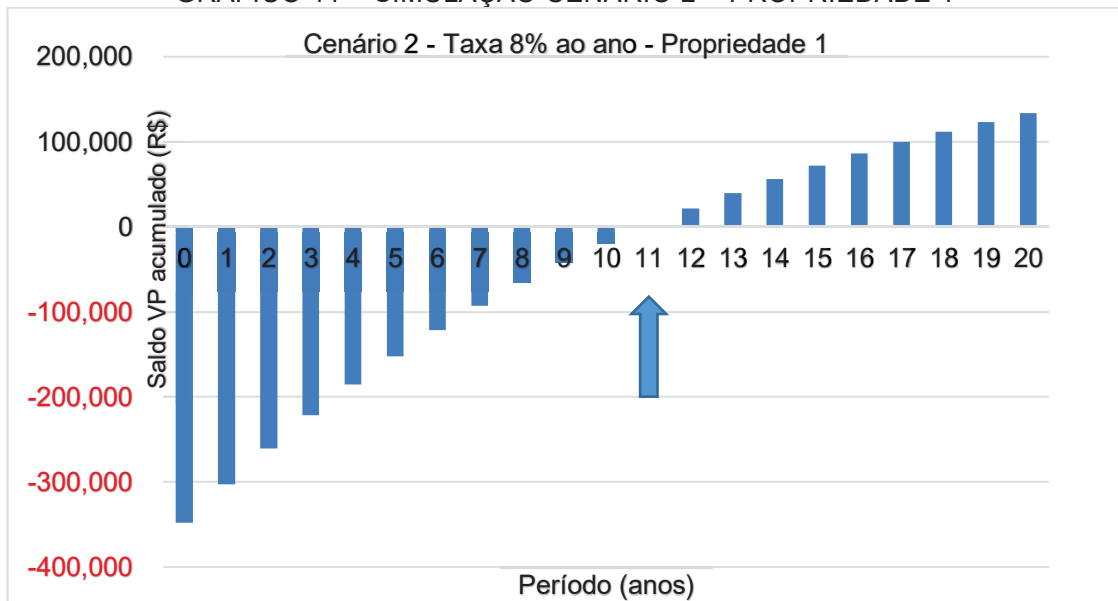
FONTE: Autor.

Com base nessa análise conclui-se que o tempo de retorno para esse cenário é de 9 anos e o investimento se apresenta viável pois o retorno está dentro da vida útil do sistema.

5.1.3.2 Cenário 2

Utilizando a taxa de juros de 8% ao ano para o cálculo do valor presente líquido acumulado, observa-se no Gráfico 11 que o investimento leva 11 anos para se pagar. Com saldo acumulado negativo no final do décimo ano de R\$ -18.780,86 e a partir do decimo primeiro ano ficando positivo com saldo acumulado de R\$2.246,07.

GRÁFICO 11 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 2 – PROPRIEDADE 1



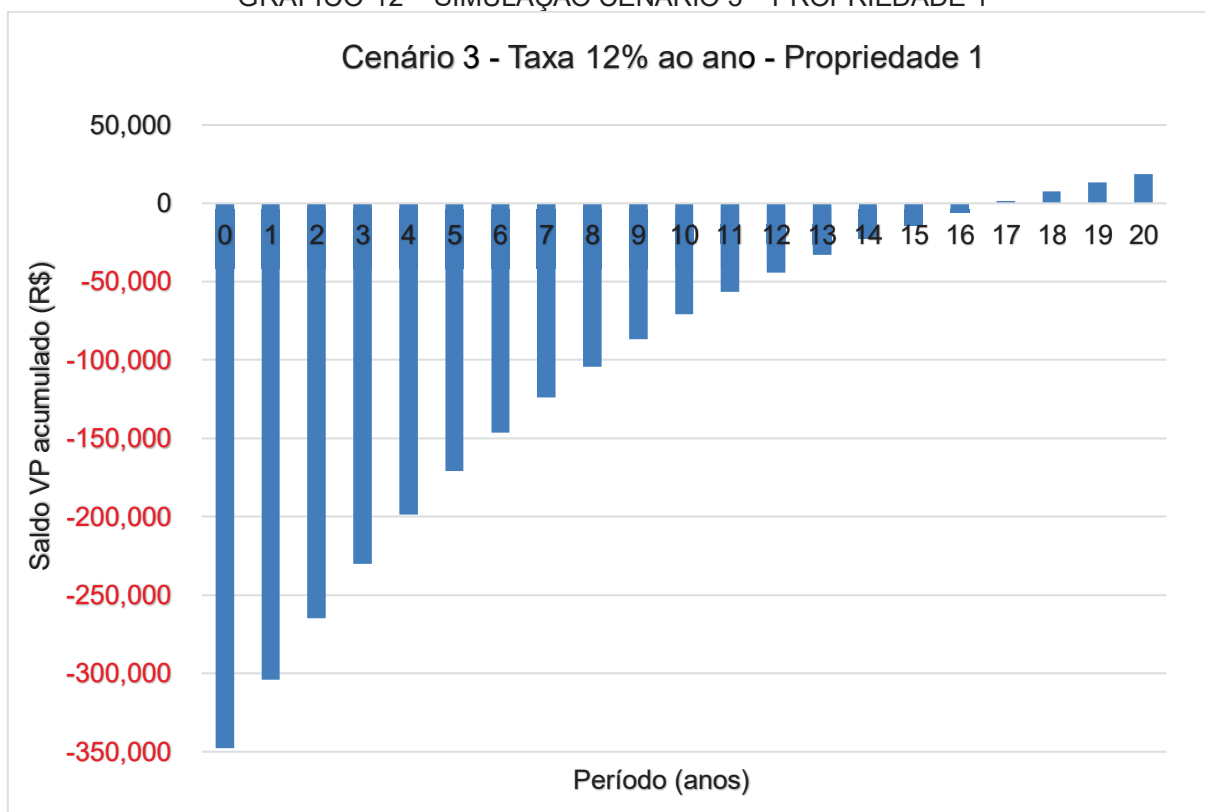
FONTE: Autor.

Com base nessa análise conclui-se que o tempo de retorno para esse cenário é de 11 anos e o investimento se apresenta viável pois o retorno está dentro da vida útil considerada do sistema.

5.1.3.3 Cenário 3

Utilizando a taxa de juros de 12% ao ano para o cálculo do valor presente líquido acumulado, vemos no Gráfico 12 que o investimento se paga dentro do período de 17 anos. Com saldo acumulado negativo no final do decimo sexto ano de R\$ - 5.842,35 e a partir do décimo sétimo ano acumula saldo de R\$1.298,19.

GRÁFICO 12 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 3 – PROPRIEDADE 1

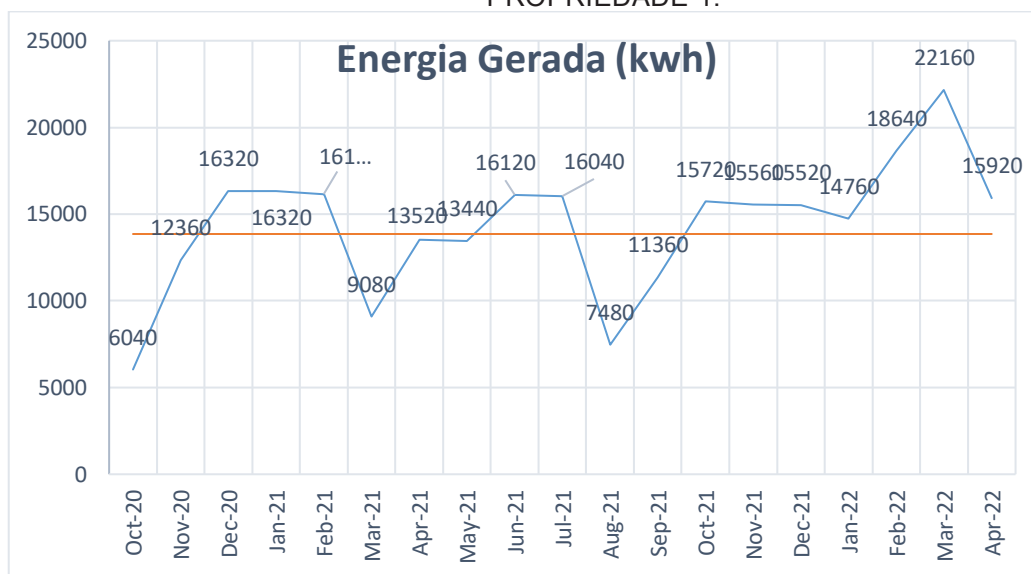


FONTE: Autor.

Com base nesses dados é possível concluir que o investimento se apresenta viável, pois o saldo acumulado se torna positivo dentro da vida útil adotada para o sistema.

Analisando alguns fatores de influência e fazendo uma análise dos parâmetros para cálculo do valor presente líquido, adotando a taxa de juros mais crítica de 12% ao ano, o projeto continuaria viável gerando mensalmente apenas 13.855kwh, para o sistema se pagar em 20 anos, ou seja esse valor pode ser adotado como mínimo para termos um sistema viável nesse prazo e como mostrado no Gráfico 13 isso ocorreu em 12 meses dos 19 relatados, onde temos como linha de viabilidade em laranja o valor de 13.855kwh/mês para esses fatores adotados.

GRÁFICO 13 – ENERGIA GERADA EM KWH/MÊS X LINHA DE VIABILIDADE – PROPRIEDADE 1.



FONTE: Autor.

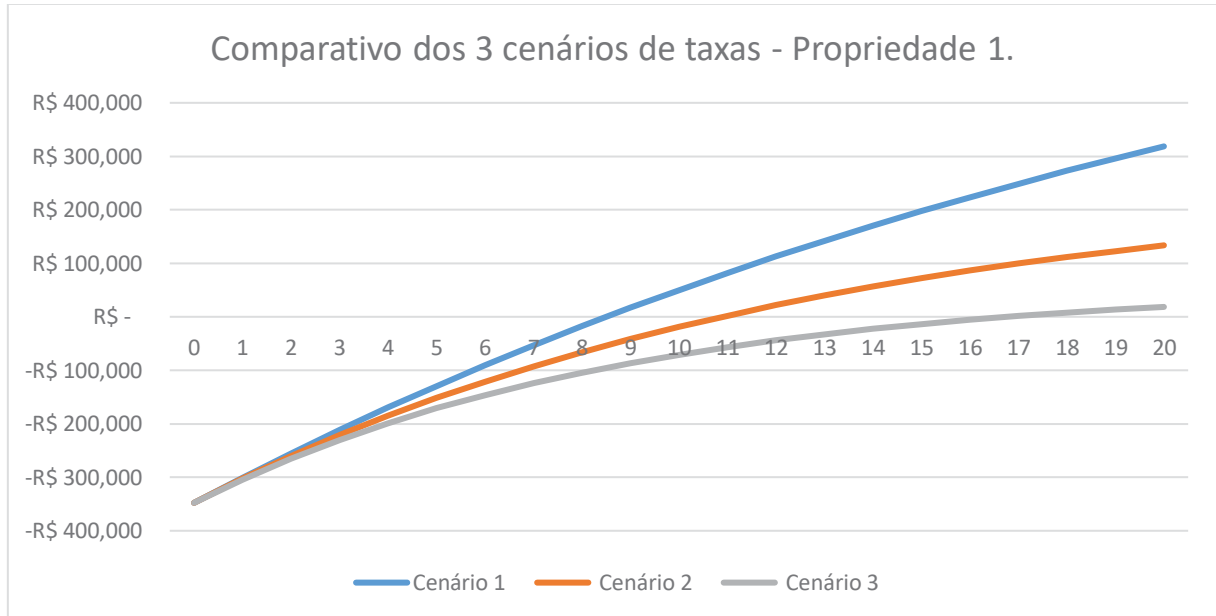
Outro fator que pode ser estudado para viabilidade do projeto com taxa de juros de 12% ao ano, é a manutenção anual que poderia chegar até a R\$24.900,00 por ano ou 7,66% do valor do investimento ao invés dos 7% adotados e mesmo assim o projeto continuaria viável com tempo de retorno de 20 anos. Esse item tem mais possibilidade de aumentar no final da vida útil do gerador, devido a quantidade de horas que o sistema fica ativo, mais de 12 horas por dia, praticamente todos os dias do ano.

Um terceiro fator que se alterado continua a ter viabilidade para o projeto 1 com a taxa de juros de 12% ao ano é a diminuição do valor recebido pelo kwh de R\$0,42 centavos para R\$0,41 centavos por kwh.

Tendo o projeto 1 o custo de investimento inicial aumentado de R\$325.000,00 para R\$340.000,00 o projeto se pagaria dentro do prazo de 20 anos.

Fazendo uma simulação para o investimento se pagar completamente em 4 anos com a taxa de juros de 12% ao ano, mantendo os outros dados, o valor recebido pelo kwh teria que ser de R\$0,81/kwh. Sendo que ao final do quarto ano acumularia um saldo positivo de R\$3.617,00.

GRÁFICO 14 – COMPARATIVO DOS OS 3 CENÁRIOS – PROPRIEDADE 1



FONTE: Autor.

Observando o Gráfico 14, onde tem-se o comparativo do VPL dos três cenários propostos de juros, vemos a curva do Cenário 1 e Cenário 2 cortando da faixa do saldo negativo para o positivo, ou Payback, entre 9 e 11 anos, já o Cenário 3 os retornos serão positivos a partir do 17º ano para o investimento. Mostrando que para os três cenários o projeto se demonstra viável dentro da vida útil do investimento.

5.1.4 Cálculo do Fator de Capacidade

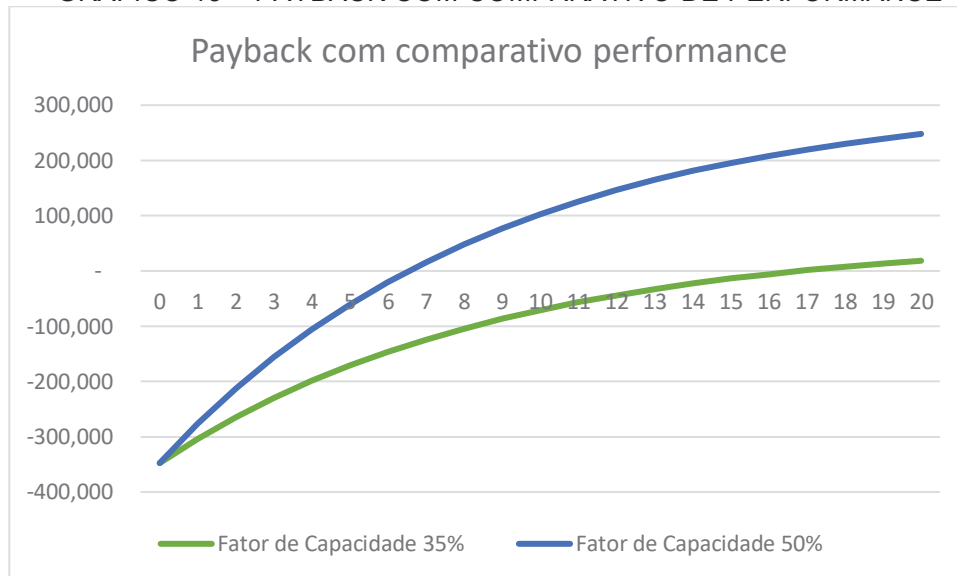
Utilizando a fórmula (6) para o cálculo e utilizando os dados:

- Total gerado anual: 172.116 kWh;
- Potência do gerador adotada para cálculo: 70kva;
- Tempo (1ano): 8.760h;

O valor do fator de capacidade encontrado é de 0,3508 que equivale a 35,08%. Que seria equivalente a performance da planta. Isso mostra geração de energia elétrica da planta em relação a sua capacidade máxima de geração. No Gráfico 15 temos o comparativo de payback para o cenário de taxa de juros 12% com 35% de aproveitamento da performance total da planta, que se dá em 17 anos e a planta com aproveitamento de 50%, o payback acontece com 7 anos. Isso mostra uma diferença

de tempo significativa, que pede um correto dimensionamento da planta para retorno mais atrativo do investimento.

GRÁFICO 15 – PAYBACK COM COMPARATIVO DE PERFORMANCE



FONTE: Autor.

5.2 PROPRIEDADE 2

O projeto implantado na propriedade 2 trabalha com dejetos de suínos para a geração do biogás, tendo em média, em torno de 4200 animais alojados sendo que o gerador funciona em torno de 15 horas por dia. Tendo uma produção mensal média de 14.396 kWh/mês no período de 9 meses.

5.2.1 Investimento

Os investimentos totais gastos para implantação do sistema de biogás para geração de energia elétrica da propriedade 2 estão na Tabela 6, desde escavação do biodigestor e colocação de lona apropriada para retenção do gás, custo do motor gerador já adaptado ao biogás e o painel de controle e conexão com a rede. Por ter o gerador igual do sistema 1 e ter sido executado pela mesma empresa o custo foi igual do projeto 1.

TABELA 6 – INVESTIMENTO PARA IMPLANTAÇÃO DO PROJETO 2

Etapa	Custos (R\$)
Biodigestor modelo mistura completa:	R\$ 75.000,00
Motor Gerador Modelo Biogás - WEG 73kVA - Ciclo Otto - GGB 75	R\$ 150.000,00
Implantação - Painel de controle e ligação c/ rede	R\$ 100.000,00
Total do investimento	R\$ 325.000,00

FONTE: Autor.

Após o investimento inicial de implantação será considerado um valor de manutenção anual de 7% do valor do custo total de implantação, para manutenções periódica preventivas como troca de óleo e filtros, que geralmente acontecem a cada 300 horas de funcionamento do equipamento, e manutenções corretivas do motor, como bobinas, turbina e válvulas dentre outros que tem trocas constantes também, além de quebras ou acidentes eventuais que podem ocorrer e tem um custo para manter o sistema em operação. Essas informações foram baseadas em valores repassados pelo operador do sistema que opera a usina desde sua implantação.

Foi considerado uma vida útil de 20 anos para o sistema, podendo é claro que ele dure além desse período mais 10, 20 ou 30 anos desde que haja as manutenções devidas, sendo que após esse período o valor para manter o correto funcionamento do sistema deve ser um pouco mais alto pelo desgaste do equipamento e talvez possa haver alguma alteração na produção. O dejetos que alimenta o biodigestor vem por meio da gravidade até a lagoa coberta que fica em cota mais baixa que os barracões que abrigam os animais.

Na propriedade 2 a produção teve um pico de 22.280kwh/mês, com a média mensal de 14.396kwh/mês, em torno de 35,3% menor que o valor máximo, tendo ao longo do período a geração oscilado 46,86% (coeficiente de variação). Um dos fatores dessa oscilação é decorrente do estágio de terminação dos suínos. Em geral quando a propriedade recebe os suínos com aproximadamente 60 dias e pesando entre 20kg e 23kg por animal a produção de dejetos é menor, além do período do vazio sanitário de 10 a 15 dias que a planta fica sem animais.

5.2.2 Cálculo do LCOE e resultados

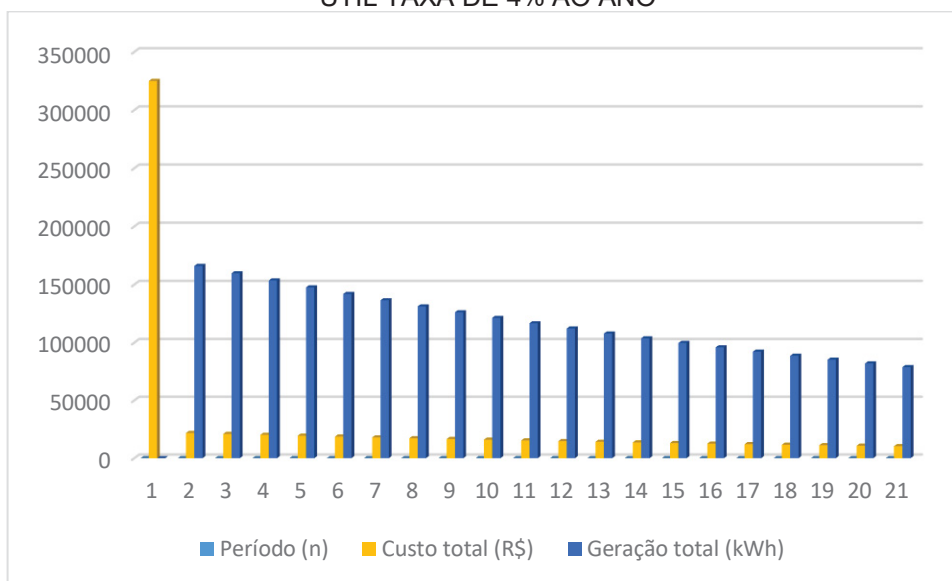
Para o cálculo do LCOE foi utilizado a equação 5, e foram considerados para o cálculo os custos do investimento inicial, custos de operação anual pelo período de 20 anos, que foi a vida útil considerada e a média da geração de energia no período em kwh expandida para o período de 1 ano já que o sistema teve sua implantação a apenas 9 meses.

- Investimento inicial: R\$ 325.000;
- Custos de operação e manutenção anual: R\$ 22.757,50;
- Taxa de juros anual: 4%;
- Período: 20 anos;
- Total gerado: 172.747 kWh;

O valor do LCOE encontrado para a taxa de juros de 4% ao ano foi de **0,270R\$/kwh**.

Isso significa que o $LCOE < 0,42R\$/kwh$ (valor recebido pelo kwh gerado). Portanto em comparação com o valor pago pelo kwh gerado o sistema é viável por ter um custo menor que o valor de venda. No Gráfico 16 em curva e Gráfico 20 temos em números o comparativo entre geração e custo ao longo do período da vida útil proposta. Nota-se que o custo inicial é maior e vai diminuindo ao longo do tempo. Com a geração bem maior que os custos.

GRÁFICO 16 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 4% AO ANO



FONTE: Autor.

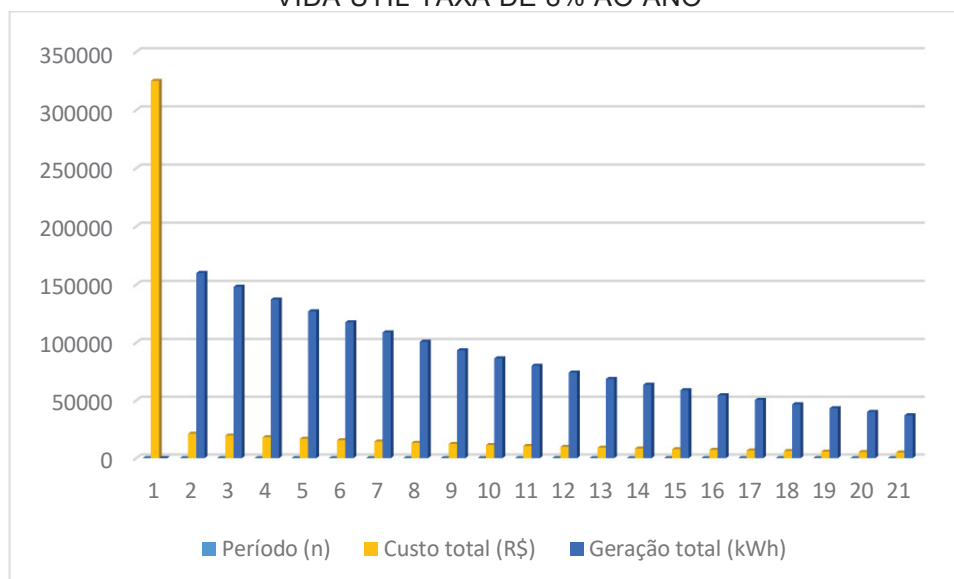
Utilizando a mesma forma de cálculo do Lcoe agora com taxa de juros anual de 8%.

- Investimento inicial: R\$ 325.000;
- Custos de operação e manutenção anual: R\$ 22.757,50;
- Taxa de juros anual: 8%;
- Período: 20 anos;
- Total gerado: 172.747 kWh;

O valor do LCOE encontrado para a taxa de juros de 8% ao ano foi de **0,323R\$/kwh**.

Isso significa que o LCOE < 0,42R\$/kwh (valor recebido pelo kwh gerado). Portanto em comparação com o valor pago pela kwh gerado o sistema é viável por ter um custo menor que o valor de venda. No Gráfico 17 temos a curva e Gráfico 22 temos em números o comparativo entre geração e custo ao longo do período da vida útil proposta.

GRÁFICO 17 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 8% AO ANO



FONTE: Autor.

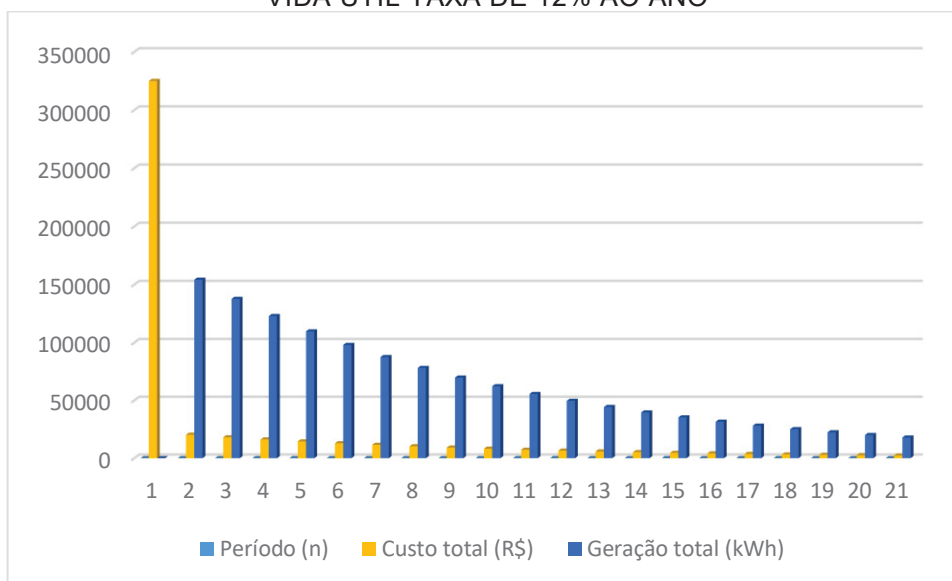
Utilizando a mesma forma de cálculo do LCOE, agora com taxa de juros anual de 12%.

- Investimento inicial: R\$ 325.000;
- Custos de operação e manutenção anual: R\$ 22.757,50;
- Taxa de juros anual: 12%;
- Período: 20 anos;
- Total gerado: 172.747 kWh;

O valor do LCOE encontrado para a taxa de juros de 12% ao ano foi de **0,384R\$/kwh**.

Isso significa que o LCOE < 0,42R\$/kwh (valor recebido da pelo kwh gerado). Portanto em comparação com o valor pago pela kwh gerado o sistema é viável por ter um custo menor que o valor de venda. No Gráfico 18 em curva e Gráfico 24 temos o comparativo entre geração e custo ao longo do período da vida útil proposta. Percebemos que continua a diminuição da curva dos custos e a geração de energia continua um pouco maior que os custos.

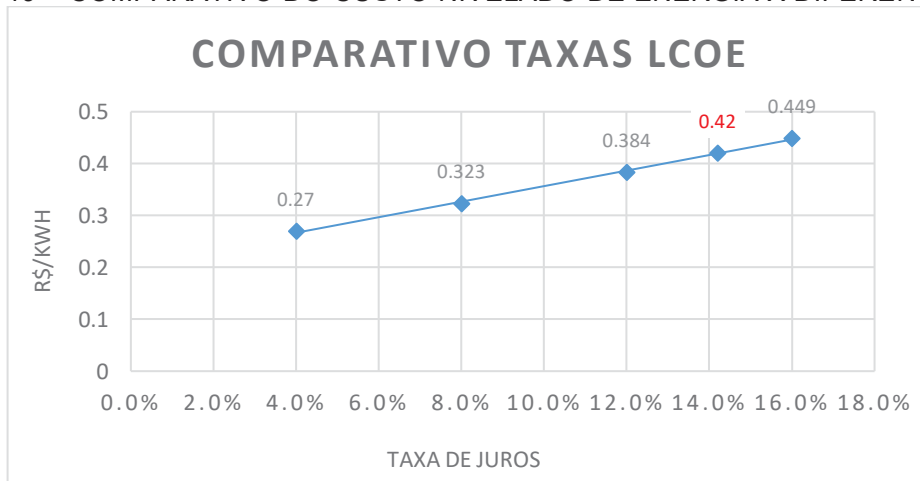
GRÁFICO 18 – COMPARATIVO ENTRE GERAÇÃO E CUSTO AO LONGO DO PERÍODO DA VIDA ÚTIL TAXA DE 12% AO ANO



FONTE: Autor.

No Gráfico 19, temos um resumo do comparativo dos resultados de LCOE obtidos com as diferentes taxas aplicadas.

GRÁFICO 19 – COMPARATIVO DO CUSTO NIVELADO DE ENERGIA X DIFERENTES TAXAS

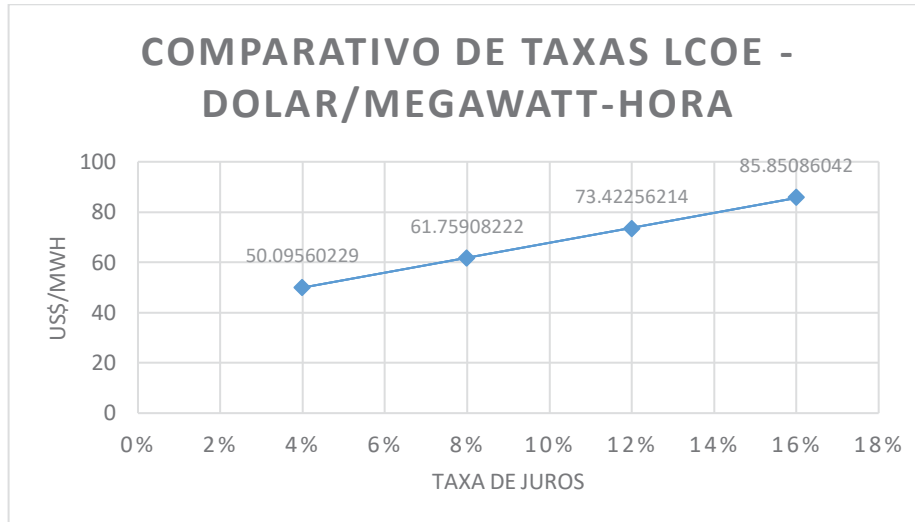


FONTE: Autor.

Comparando as diferentes taxas adotadas para o custo nivelado de energia (LCOE) vemos a crescente do custo/kwh de energia à medida que a taxa de juros aumenta. Até os 12% ao ano ainda se encontra menor que R\$0,42/kwh recebido. Sendo, portanto, ainda viável se adotado essa ferramenta como parâmetro. Destacado em vermelho no gráfico o Lcoe de 0,42R\$/kwh que representa a taxa de juros de equilíbrio para ter viabilidade o projeto, no período de 20 anos, que ficou em

14,2% ao ano. Também temos o Lcoe de 0,449R\$/kwh correspondente a taxa de juros de 16% ao ano.

GRÁFICO 20 – COMPARATIVO DO LCOE EM DÓLAR X DIFERENTES TAXAS



FONTE: Autor.

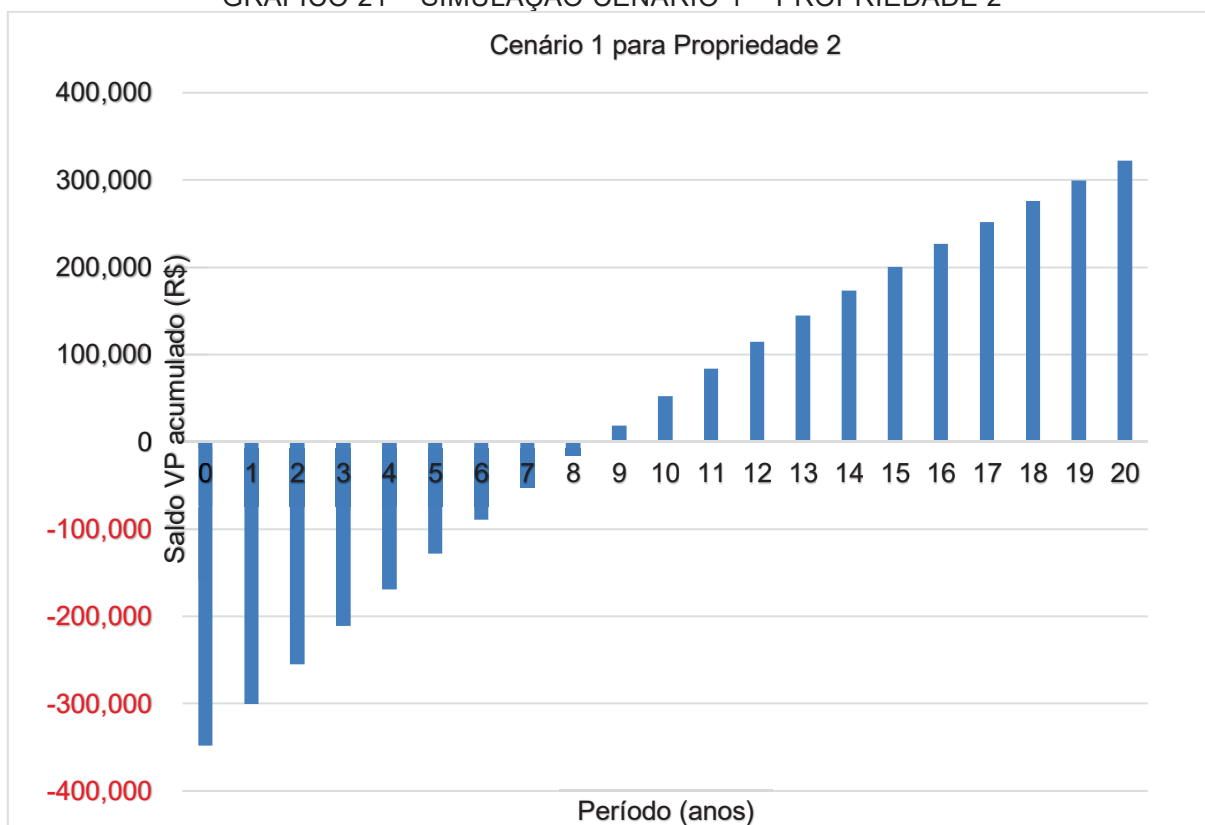
5.2.3 Análise da viabilidade econômica

Para a análise da viabilidade econômica da propriedade 2 foram feitas análises utilizando novamente o valor presente líquido através de 3 cenários de taxas anuais, 4%, 8% e 12% ao ano. Tendo um custo anual evitado de R\$72.051,84 para os três cenários.

5.2.3.1 Cenário 1

Utilizando a taxa de juros de 4% ao ano para o cálculo do valor presente líquido acumulado, vemos no Gráfico 21 que o investimento leva 9 anos para se pagar. Com saldo acumulado no final do oitavo ano de R\$ -15.871,29 e a partir do nono ano ficando positivo com saldo acumulado de R\$18.762,26.

GRÁFICO 21 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 1 – PROPRIEDADE 2



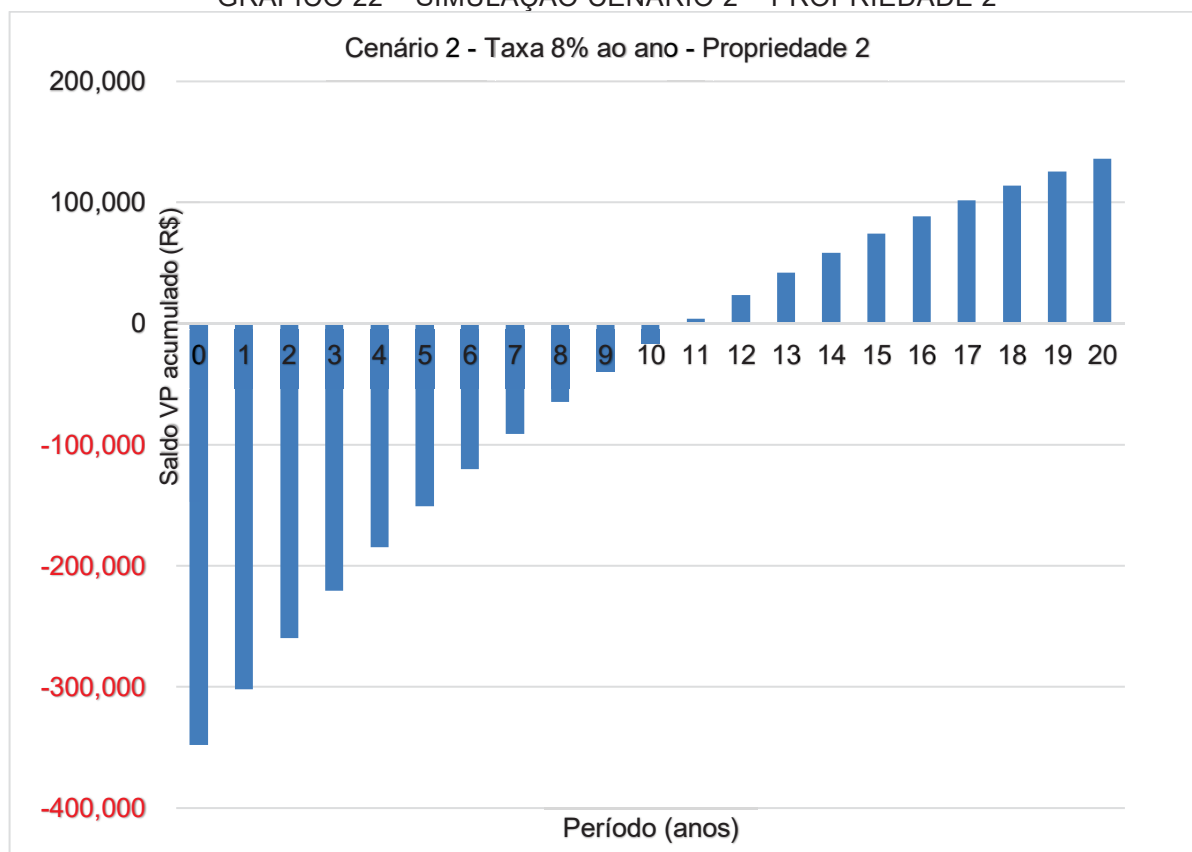
FONTE: Autor.

Com base nessa análise conclui-se que o tempo de retorno para esse cenário é de 9 anos e o investimento se apresenta viável pois o retorno está dentro da vida útil do sistema.

5.2.3.2 Cenário 2

Utilizando a taxa de juros de 8% ao ano para o cálculo do valor presente líquido acumulado, vemos no Gráfico 22 que o investimento leva 11 anos para se pagar. Com saldo acumulado no final do décimo ano de R\$ -16.988,47 e a partir do décimo primeiro ano ficando positivo com saldo acumulado de R\$4.153,03.

GRÁFICO 22 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 2 – PROPRIEDADE 2



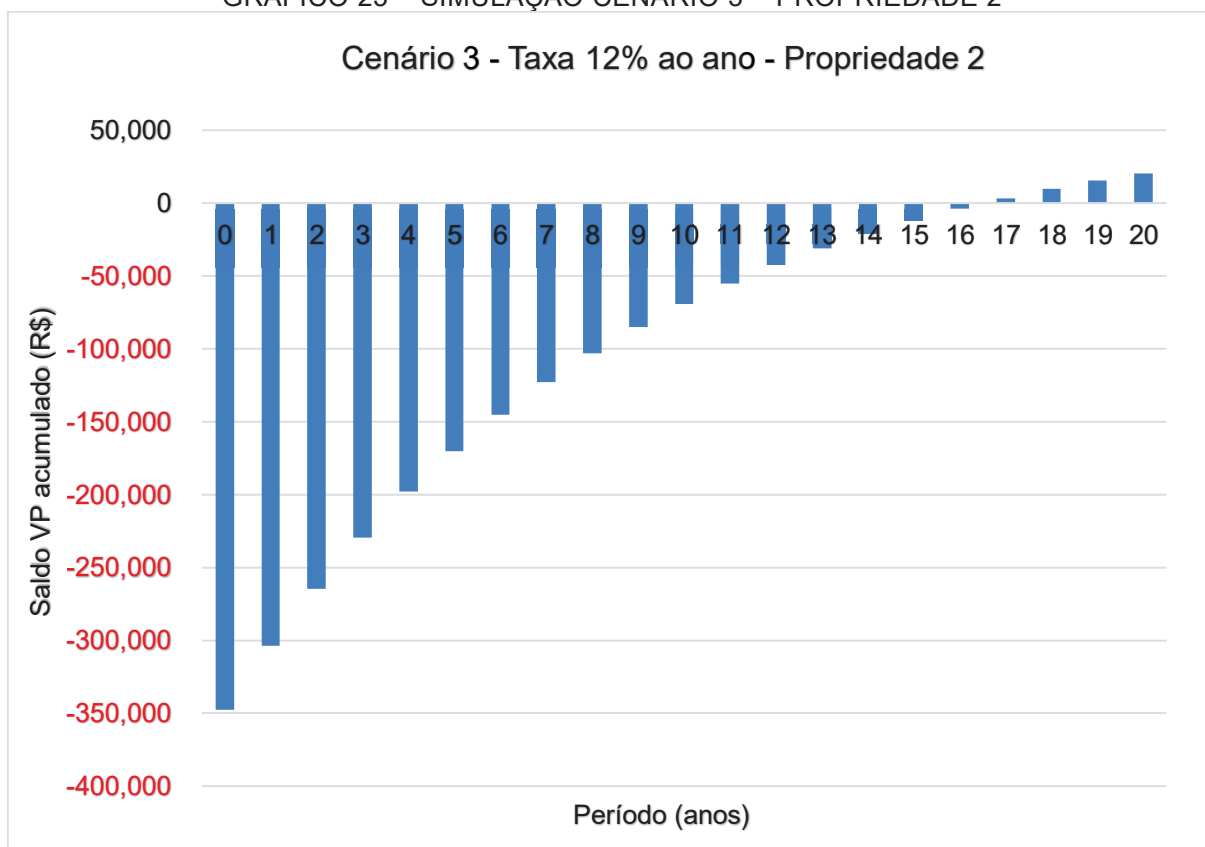
FONTE: Autor.

Com base nessa análise conclui-se que o tempo de retorno para esse cenário é de 11 anos e o investimento se apresenta viável pois o retorno está dentro da vida útil considerada do sistema.

5.2.3.3 Cenário 3

Utilizando a taxa de juros de 12% ao ano para o cálculo do valor presente líquido acumulado, temos no Gráfico 23 que o investimento tem saldo acumulado no final do décimo sexto ano de R\$ -3.979,46 e a partir do décimo sétimo ano ficando positivo com saldo acumulado de R\$3.199,99.

GRÁFICO 23 – SIMULAÇÃO CENÁRIO 3 – PROPRIEDADE 2

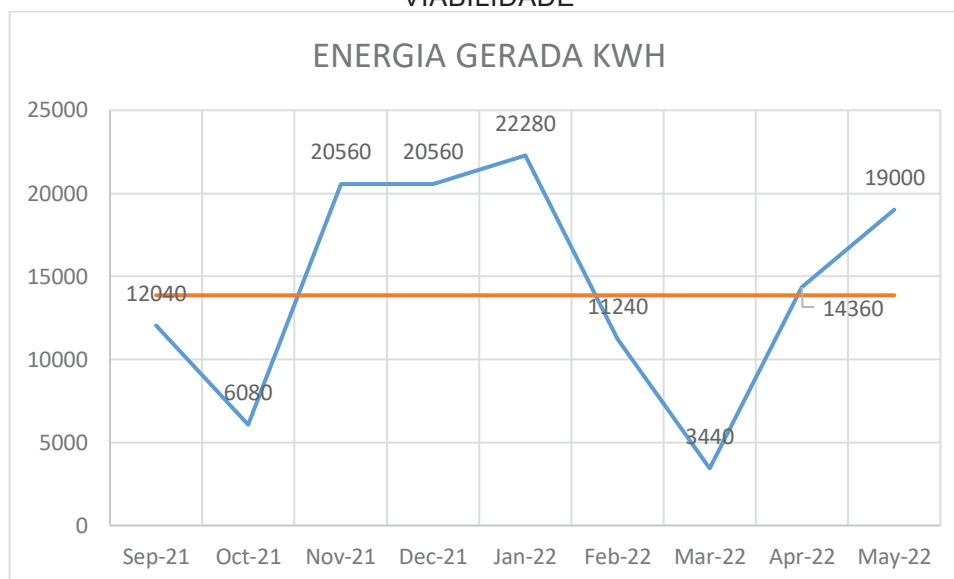


FONTE: Autor.

Com base nesses dados é possível concluir que o investimento será viável com essa taxa de juros, pois o saldo acumulado se torna positivo com 17 anos.

Fazendo uma análise dos parâmetros para cálculo do valor presente líquido o projeto 2 continua viável com a taxa de juros de 12% ao ano, mesmo gerando apenas 13.860kwh mensalmente, para o sistema se pagar em até 20 anos, sendo esse valor podendo ser adotado como mínimo para termos um sistema viável nesse prazo. O Gráfico 24 mostra que ocorreu produção acima dessa viabilidade mínima em 5 meses dos 9 relatados, sendo que 3 meses tiveram média de produção acima de 20.000 kwh/mês. Por ser um sistema com implantação recente a propriedade também teve que adaptar alguns processos e deve ter continuidade de geração mais estável na produção dos próximos meses, segundo o administrador. Não devendo ficar abaixo da linha de viabilidade muitos meses.

GRÁFICO 24 – ENERGIA GERADA EM KWH/MÊS COM A MARCAÇÃO DA LINHA DE VIABILIDADE



FONTE: Autor.

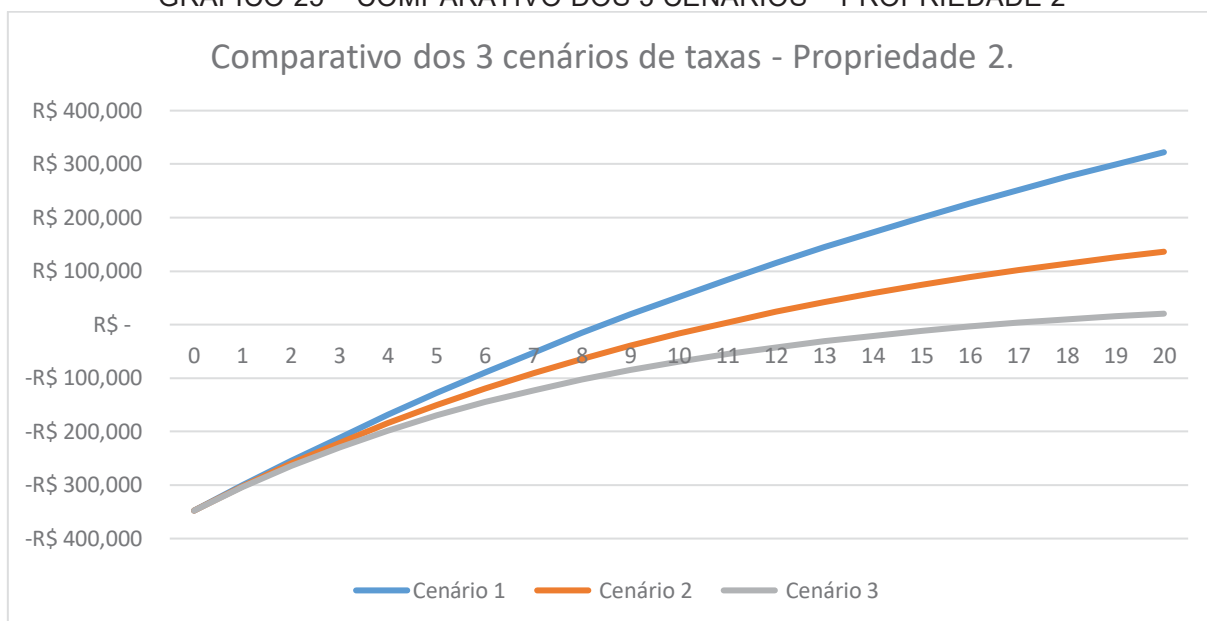
Outro fator alterado para simular a viabilidade do projeto com taxa de juros de 12% ao ano, foi a manutenção anual que poderia chegar a R\$25.170,00 por ano ou 7,74% do valor do investimento ao invés dos 7% adotados e mesmo assim o sistema continuaria viável com 20 anos. Esse item tem mais possibilidade de variar no final da vida útil do gerador, devido a quantidade de horas que o sistema fica ativo, mais de 12 horas por dia, praticamente todos os dias do ano.

Um terceiro fator que se alterado continua a ter viabilidade para o projeto 2 com a taxa de juros de 12% ao ano é a diminuição do valor recebido pelo kwh de R\$0,42 centavos para R\$0,41 centavos por kwh.

Tendo o projeto 2 o custo de investimento inicial aumentado de R\$325.000,00 para R\$345.000,00 o projeto ainda se pagaria dentro dos 20 anos.

Fazendo uma simulação para o investimento se pagar completamente em 4 anos com a taxa de juros de 12% ao ano, mantendo os outros dados, o valor recebido pelo kwh teria que ser de R\$0,81/kwh. Sendo que ao final do quarto ano acumularia um saldo positivo de R\$5.181,00.

GRÁFICO 25 – COMPARATIVO DOS 3 CENÁRIOS – PROPRIEDADE 2



FONTE: Autor.

Observando o Gráfico 25, onde tem o comparativo dos três cenários propostos vemos a curva do Cenário 1 e Cenário 2 cortando da faixa do saldo negativo para o positivo entre 9 e 11 anos, já o Cenário 3 mostra que os retornos serão positivos para o investimento a partir do 17º ano.

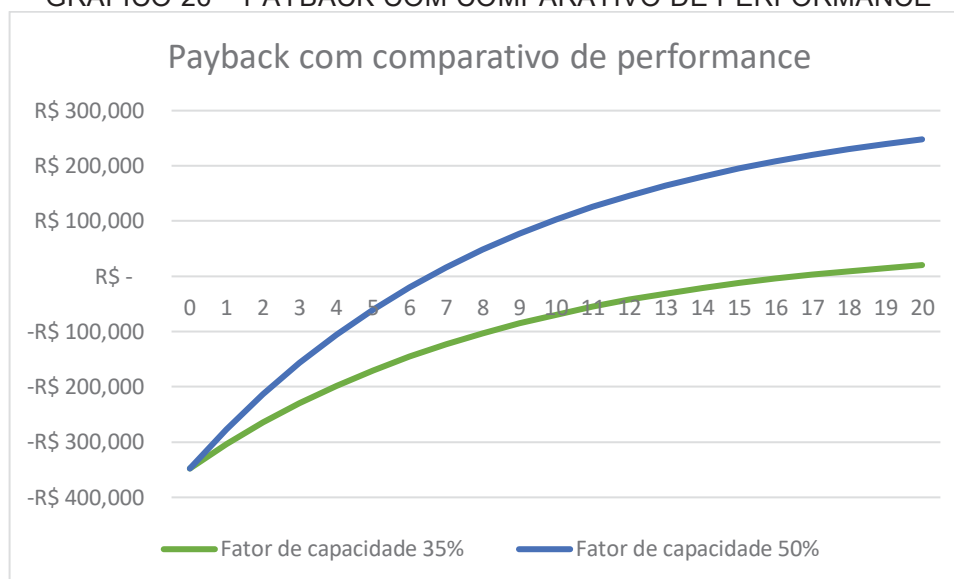
5.2.4 Cálculo do Fator de Capacidade

Utilizando a fórmula (6) para o cálculo e utilizando os dados:

- Total gerado anual: 172.116 kWh;
- Potência nominal do gerador adotada: 70kva;
- Tempo (1ano): 8.760h;

O valor do fator de capacidade encontrado é de 0,3521 que equivale a 35,21%. Isso mostra geração de energia elétrica da planta em relação a sua capacidade máxima de geração. No Gráfico 26 temos o comparativo de payback para o cenário de taxa de juros 12% com 35 de aproveitamento da performance da planta que se dá em 17 anos e a planta com aproveitamento de 50% o payback acontece com 7 anos. Isso mostra uma diferença de tempo significativa que pede um correto dimensionamento da planta para retorno mais atrativo do investimento.

GRÁFICO 26 – PAYBACK COM COMPARATIVO DE PERFORMANCE



FONTES: Autor.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram feitos os cálculos da viabilidade econômica e do custo nivelado de energia dos dois projetos que acabaram resultando em números semelhantes por terem a mesma potência de gerador de energia e funcionamento em horas por dia parecidos, apesar de o projeto 2 ter um potencial maior por ter capacidade de alojar mais animais ainda não faz uso de todo ele, na Tabela 7 temos o resumo do LCOE dos dois projetos.

TABELA 7 – RESUMO DO LCOE

PROPRIEDADE 1		PROPRIEDADE 2	
Taxa de juros %	LCOE R\$/kwh	Taxa de juros %	LCOE R\$/kwh
4	0,271	4	0,27
8	0,325	8	0,323
12	0,385	12	0,384

FONTES: Autor.

Ambas as propriedades podem ser consideradas viáveis quanto a análise do LCOE para as três taxas consideradas por ainda ficarem abaixo dos R\$0,42/kwh recebidos pela venda do kwh.

Já na Tabela 8 temos o resumo da viabilidade econômica com o tempo de retorno estipulado de vinte anos, tendo o saldo acumulado no vigésimo ano para as duas propriedades nos três cenários de juros.

TABELA 8 – RESUMO DO RESULTADO ECONÔMICO NO VIGÉSIMO ANO

PROJETO	CENÁRIO 1 TAXA 4%	CENÁRIO 2 TAXA 8%	CENÁRIO 3 TAXA 12%
PROPRIEDADE 1	318.538,42	133.598,97	18.448,56
PROPRIEDADE 2	322.168,67	136.221,60	20.433,79

FONTE: Autor.

Ambos os projetos tiveram viabilidade com todas taxas de juros simuladas ao final do vigésimo ano. Sendo no cenário mais crítico com taxa de 12% ao ano a propriedade 1 resulta em saldo acumulado de R\$18.448,56 e a propriedade 2 com saldo acumulado de R\$20.433,79 ao final do vigésimo ano. Constatou-se que mesmo com a taxa 12% simulada, ambos os empreendimentos deram retorno dentro do prazo de vida útil econômica de 20 anos, confirmando a hipótese inicial que apontava pela viabilidade do empreendimento dentro das taxas de juros próximas da inflação.

Levando em consideração que segundo IBGE a inflação média de 2002 a 2021, foi de 6,30% ao ano, temos um modelo de investimento para geração de energia que mostrou-se viável ao longo do tempo. Os incentivos governamentais para essa linha de geração de energia não são expressivos, ou pode se dizer que praticamente inexistentes, o que deveria ser mudado para se alavancar ainda mais um forma de geração de energia limpa, renovável e fácil implantação em pequenas propriedades.

Para Freire et al. (2017, p. 55) as mudanças no contexto da inovação, assim como as novas formas de atuação de diferentes atores, se refletem nas políticas públicas. Essas mudanças exigem constante evolução e diversificação dos mecanismos de fomento, com novos instrumentos e combinações dos existentes. O autor ainda enfatiza duas tendências principais na análise do cenário internacional para políticas públicas de apoio à inovação: a presença do Estado como agente de compartilhamento de risco e como demandante de soluções inovadoras; e as ações públicas para estimular a articulação de atores do ecossistema de inovação.

Nesse estudo foi utilizado o caminho mais crítico e não foi considerado reajuste anual da tarifa de energia, pela inflação ou outro índice de correção, o que resultaria em um retorno do investimento em menor prazo. Sendo assim, este trabalho, pode servir de parâmetro para futuras análises com outras variáveis para auxiliar em tomadas de decisões referentes a investimentos em plantas de biogás para geração de energia elétrica.

Os resultados mostraram a viabilidade das plantas de biogás estudadas para

geração de energia elétrica através de uma fonte renovável, salienta-se que outro fator não menos importante é o aproveitamento de resíduos e rejeitos da produção da suinocultura, que antes eram um passivo ambiental onde teriam que ser destinados, muitas vezes com custos para a propriedade, saem agora, ao final do processo como fertilizante orgânico para ser aproveitado na propriedade ou podendo ser vendido.

O biogás gerado é uma fonte de energia renovável, limpa e viável do ponto de vista econômico, se incentivada, essa forma de geração pode se tornar um auxílio para geração de energia limpa e ter-se menor dependência de outras fontes não renováveis. Apesar das oscilações na geração ao longo do período, a geração utilizando o biogás produzido da biodigestão de dejetos da suinocultura se mostra mais contínua que outras fontes alternativas como a eólica e solar, sendo uma opção que tem um potencial enorme de crescimento dentro da matriz energética nacional.

REFERÊNCIAS

BACHMANN, N. Design and engineering of biogas plants. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook**: Science, production and applications. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

BANKS, C.; HEAVEN, S. Optimisation of biogas yields from anaerobic digestion by feedstock type. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook**: Science, production and applications. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

BARREIRA, P. **Biodigestores**: energia, fertilidade e saneamento para zona rural. São Paulo: Ícone, 2011.

BEIL, M.; BEYRICH, W. Biogas upgrading to biomethane. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook**: Science, production and applications. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

BIOSANTECH, D. et al. Biogas digestate quality and utilization. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook**: Science, production and applications. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

BOCHMANN, G.; MONTGOMERY, L. F. R. Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook**: Science, production and applications. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

BRANKER, K.; PATHAK, M. J. M.; PEARCE, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Elsevier. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 4470-4482, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>>. Acesso em: 8 abr. 2022.

BRASIL. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Probiogás. Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ) (Orgs.); Bruno Silveira et al. (Autores). Brasília: Ministério das Cidades, 2015.

CASTRO, R. V. O.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; SOARES, C. P. B.; JÚNIOR, C. A.; CASTRO, A. F. N.; CRUZ, J. P.; SANTOS, F. L.; SOUZA, C. C. Avaliação econômica de um povoamento de eucalipto desbastado e destinado a multiprodutos da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 351-357, set. 2011.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITCKE, B. H. **Análise de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 1994.

CHERNICHARO, C. A. L.; VAN LIER, J. B.; NOYOLA, A.; BRESSANI-RIBEIRO, T. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/technology**, v. 14, n. 4, 2015.

CHRISTMANN, R. A. **ANÁLISE DE INVESTIMENTOS – UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO**. Lajeado, maio de 2009.

CLIMATE DATA. **Clima Toledo (Brasil)**. 2022. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/toledo-31828/#temperature-graph>>. Acesso em: 1 maio 2022.

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás na bovinocultura e na suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

COLTURATO, L. F. D. B. **Dessulfuração de biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S**. 2015. 224 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.

CROLLA, A.; KINSLEY, C.; PATTEY, E. Land application of digestate. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

CRUZ, M. I. **Rentabilidade econômica de três regimes de manejo de pinus taeda I., em Dionísio Cerqueira – SC**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2021. p. 15.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction**. Weinheim: Wiley-VCH, 2011.

DROSG, B. et al. Analysis and characterisation of biogas feedstocks. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

DUMONT, M. N. L. et al. Methane emissions in biogas production. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética**. Matriz Energética e Elétrica. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 1 ago. 2021.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022** – ano base 2021.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e Biogás da Suinocultura**. Cascavel: Unioeste, 2012.

FERNANDES, D. M.; CONSTANZI, R. N.; FEIDEN, A.; SOUZA, S. N. M.; Biomassa Energética. **Fontes renováveis: Agroenergia**. Vol. 2. Cascavel: Edunioeste, 2013.

FREIRE, C.; MARUYAMA, F.; POLLI, M. Inovação e Empreendedorismo: Políticas Públicas e Ações Privadas. **Novos Estudos – CEBRAP**, São Paulo, v. 36.03, p. 51-78, nov. 2017.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira: uma abordagem gerencial**. 3. ed. São Paulo: Harbra, 1987.

GOLDEMBERG, J.; NIGRO, F. E. B.; COELHO, S. T. **Bioenergia no Estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GOMEZ, C. D. Biogas as an energy option: an overview. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

GOMES, M. S. T.; RAIHER, P. A. Viabilidade econômica da produção de biogás de dejetos suínos: um estudo de caso. **Revista Ciências Administrativas**, Fortaleza, v. 19, n. 2, p. 801, jul./dez. 2013.

IBGE. **IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?t=series-historicas&utm_source=landing&utm_medium=explica&utm_campaign=inflacao#plan-o-real-ano>. Acesso em: 1 jul. 2022.

JENBACHER - **Biogas Solutions** from INNIO. Disponível em: <https://www.innio.com/images/medias/files/621/innio_appsheet_biogas_a4_en_screen_ijb-320003-en.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2022.

KRETZER, S. G. et al. Produção de biogás com diferentes resíduos orgânicos de restaurante universitário. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, n. 4, p. 551-565, 2016.

LAZARD.COM. **Custo nivelado de Lazard de energia versão 14.0"** (PDF). Lazard.com. 19 out. 2020. Disponível em: <<https://www.lazard.com/media/451419/lazards-levelized-cost-of-energy-version-140.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2022.

LEITE, E. S. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas**. Viçosa, 2012. Disponível em:

<<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/3032/1/texto%20completo.pdf>>.
Acesso em: 16 maio 2022.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgotos domésticos**. 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LUZIO, E. **Finanças corporativas teoria e prática**. S.l: Cengage Learning, 2011.

MARIANI, E. **Biogás: diagnóstico e propostas de ações para incentivar seu uso no Brasil**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018.

MARTINS, M. E. **Potencial de Utilização do Biogás como Combustível Auxiliar em Altos Fornos Brasileiros**. Redemat, 2017.

MEGAWHAT. 2018. Disponível em: <<https://megawhat.energy/verbetes/29755/fator-de-capacidade>>. Acesso em: 30 ago. 2022.

MICUANSKI, V. C. **Viabilidade técnica e econômica da utilização da vinhaça para geração de energia elétrica (estudo de caso)**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

MORAES, K. H. K. **Geração de eletricidade com Biogás: estudo de viabilidade em estação de tratamento de esgotos no Paraná**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2020.

MOTTA, R. R.; CALÔBA, G. M.; **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais**. São Paulo: Atlas, 2002.

MURPHY, J. D.; THAMSIRIROJ, T. Fundamental science and engineering of the anaerobic digestion process for biogas production. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica**. 2005.

PEREIRA, C. P. P.; VAN LIER, J. B. Anaerobic digestion as a key technology for biomass valorization: contribution to the energy balance of biofuel chains. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. Preface. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

PIPATMANOMAI, S.; KAEWLUAN, S.; VITIDSANT, T. Economic assessment of biogás-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 669-674, 2009.

RESCH, G.; HELD, A.; FABER, T.; PANZER, C.; TORO, F.; HAAS, R. Potentials and Prospects for Renewable Energies at Global Scale. **Energy Policy**, v. 36, n. 11, p. 4048-4056, nov. 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2008.06.029>>. Acesso em: 2 jun. 2022.

SEADI, T. A. et al. Biomass resources for biogas production. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

SANTOS, K. G. et al. Métodos para o confinamento do biometano. In: SIQUEIRA, J. A.; SOUZA, S. N. M.; SANTOS, R. F. (Orgs.). **Fontes renováveis: Agroenergia**. Vol. 3. Cascavel: Edunioeste, 2016.

SHORT, W.; PACKEY, D. J.; HOLT, T. **A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies**. NREL National Renewable Energy Laboratory, 1995.

SIQUEIRA, J. A.; SOUZA, S. N. M.; SANTOS, R. F. Introdução. In: SIQUEIRA, J. A.; SOUZA, S. N. M.; SANTOS, R. F. (Orgs.). **Fontes renováveis: Agroenergia**. Vol. 3. Cascavel: Edunioeste, 2016.

SILVA, R. J.; SOEIRO, E. C. **VIABILIDADE DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS COMO FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA**. RunPetro, 2013.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos - Caieiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 993-1003, set./out. 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/qxvLfvjY6C8RWTFTw3CRZL/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 2 maio 2022.

TANABE, A. M. **Capim elefante como uma fonte renovável para produção de energia**. 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2017.

URBAN, W. Biomethane injection into natural gas networks. In: PETTEN, D. B.; AADORF, A. W.; MURPHY, J. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Woodhead Publishing Series in Energy: Number 52. Sawston-UK: Woodhead Publishing Limited, 2013.

WEIRICH, C. S. **Análise econômica de sistemas de geração de eletricidade no modo GD: motor gerador a biogás e painéis fotovoltaicos**. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fev. 2021.

ZAGO, C. A.; WEISE, A. D.; HORNBURG, R. A. **A Importância do Estudo de Viabilidade Econômica de Projetos nas Organizações Contemporâneas.** Congresso Virtual Brasileiro de Administração - VI CONVIBRA, 2009.

ZANINI, B. **Análise da viabilidade econômica e financeira de uma empresa de produtos para saúde, higiene e limpeza.** Cascavel, 2016.

ANEXO 1 - Tecnologias de geração de energia renovável x as tecnologias de geração convencionais

