

ADRIELLE CRISTINA OZANSKI

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL NA
AVALIAÇÃO ECONÔMICA ENTRE SISTEMAS RENOVÁVEIS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONECTADOS À REDE PARA
PROPRIEDADES RURAIS

CASCVEL
PARANÁ – BRASIL
DEZEMBRO – 2024

ADRIELLE CRISTINA OZANSKI

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL NA
AVALIAÇÃO ECONÔMICA ENTRE SISTEMAS RENOVÁVEIS DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONECTADOS À REDE PARA
PROPRIEDADES RURAIS

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira.

Coorientador: Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
DEZEMBRO – 2024

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Ozanski, Adrielle Cristina

Desenvolvimento de ferramenta computacional na avaliação econômica entre sistemas renováveis de geração de energia elétrica conectados à rede para propriedades rurais. / Adrielle Cristina Ozanski; orientador Jair Antonio Cruz Siqueira; coorientador Carlos Eduardo Camargo Nogueira. -- Cascavel, 2024.

71 p.

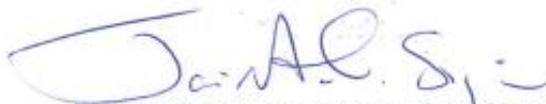
Tese (Doutorado Campus de Cascavel) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2024.

1. Energias renováveis . 2. Energia Solar. 3. Energia Eólica. 4. Biogás. I. Cruz Siqueira, Jair Antonio, orient. II. Camargo Nogueira, Carlos Eduardo, coorient. III. Título.

ADRIELLE CRISTINA OZANSKI

Desenvolvimento de ferramenta computacional na avaliação econômica entre sistemas renováveis de geração de energia elétrica conectados à rede para propriedades rurais

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, linha de pesquisa Fontes renováveis e racionalização de energia na agroindústria e agricultura, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientador - Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARITANE PRIOR
Data: 10/12/2024 13:42:09-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Maritane Prior
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
gov.br REGINALDO FERREIRA SANTOS
Data: 11/12/2024 09:48:37-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Reginaldo Ferreira Santos
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Documento assinado digitalmente
gov.br FERNANDO DE LIMA CANEPELE
Data: 11/12/2024 15:14:29-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Fernando de Lima Caneppele
Universidade de São Paulo (USP)

Documento assinado digitalmente
gov.br VANDER FÁBIO SILVEIRA
Data: 10/12/2024 13:54:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Vander Fábio Silveira
Parque Científico e Tecnológico de Biociências (BIOPARK)

Cascavel, 09 de dezembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, sabedoria e bênçãos que me sustentaram durante toda essa jornada acadêmica e pessoal.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo exemplo de dedicação e por serem minha base em todos os momentos.

Aos meus irmãos e meu sobrinho, pela convivência e pelas contribuições em momentos importantes ao longo desta caminhada.

Ao meu namorado, pelo carinho, paciência e apoio incondicional, que, com seu amor e dedicação, me trouxe forças e serenidade.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado com palavras de incentivo, paciência e companheirismo.

À minha equipe de trabalho na Secretaria de Obras, que me apoiou e possibilitou minha participação nos encontros com o orientador, demonstrando compreensão e colaboração essenciais para o andamento deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Jair A. C. Siqueira, pela paciência, dedicação e pela confiança depositada em mim. Sua orientação foi essencial para a realização deste trabalho.

Ao meus coorientador, Dr. Carlos E. C. Nogueira pela contribuição técnica, pelo incentivo e pela confiança que fizeram toda a diferença nesta pesquisa.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioeste e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, pelo suporte acadêmico e pela infraestrutura que possibilitaram a concretização deste estudo.

Por fim, expresso minha gratidão a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho. A cada um de vocês, meu sincero reconhecimento e agradecimento por tornarem este sonho possível.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das fontes na capacidade instalada.	16
Figura 2 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbia.....	21
Figura 3 - Curva de potência, Modelo ELV-H6.4 - 5 kW.	35
Figura 4 - Representação fossa biodigestor tubular.....	38
Figura 5 - Seção da fossa do biodigestor tubular.	38
Figura 6 - Fluxograma do <i>software</i>	45
Figura 7 – Inserção de equipamentos no programa.....	47
Figura 8 – Página inicial do programa – Dados 400 kWh	48
Figura 9 – Simulação 01 - Resultados do dimensionamento	50
Figura 10 – Simulação 01 - Fluxo de caixa – Parte 01 – Ano 0 ao Ano 08	51
Figura 11 – Simulação 01 - Fluxo de caixa – Parte 02 – Ano 09 ao Ano 17	52
Figura 12 – Simulação 01 - Fluxo de caixa – Parte 03 – Ano 17 ao Ano 25	53
Figura 13 – Simulação 02 - Resultados do dimensionamento – 9.000 kWh	56
Figura 14 – Simulação 02 - Fluxo de caixa – Parte 01 – Ano 0 ao Ano 08	57
Figura 15 – Simulação 02 - Fluxo de caixa – Parte 02 – Ano 09 ao Ano 17	58
Figura 16 – Simulação 02 - Fluxo de caixa – Parte 03 – Ano 17 ao Ano 25	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Custo aerogeradores.....	42
Tabela 2 - Custo biodigestor (R\$/m ³)	42
Tabela 3 - Irradiação solar diária média mensal Cascavel/PR (kWh·m ⁻² ·dia ⁻¹)	46
Tabela 4 - Irradiação solar diária média mensal Guarapuava/PR (kWh·m ⁻² ·dia ⁻¹) ...	54

OZANSKI, Adrielle Cristina. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, julho, 2024. **Desenvolvimento de ferramenta computacional na avaliação econômica entre sistemas renováveis de geração de energia elétrica conectados à rede para propriedades rurais.** Orientador: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma ferramenta computacional para comparação econômica entre sistemas de geração de energia fotovoltaica, eólica e biogás conectados à rede para propriedades rurais. O estudo busca auxiliar produtores rurais quanto à decisão da escolha do sistema de geração de energia renovável que apresente o melhor custo/benefício. Inicialmente, foram coletados dados sobre as características das propriedades rurais e os recursos disponíveis para o dimensionamento de cada sistema. Posteriormente, foram estimados os custos de implantação, manutenção e operação das alternativas de geração de energia. Com essas informações, foi calculado o LCOE de cada sistema, permitindo comparações precisas quanto à viabilidade econômica. Com base no roteiro de dimensionamento e análise econômica, foram desenvolvidas rotinas computacionais utilizando as linguagens *C#* e *JavaScript*. Essas rotinas deram origem a uma plataforma *on-line* de fácil acesso, disponibilizada por meio de um *website* público. A ferramenta oferece uma interface intuitiva e amigável, permitindo que os usuários realizem o dimensionamento dos sistemas e a comparação econômica entre eles de maneira prática, rápida e eficiente. Os resultados das simulações indicaram que o sistema solar fotovoltaico é a melhor opção de investimento entre as alternativas analisadas. O sistema eólico também se destacou como uma opção competitiva em comparação ao biodigestor, principalmente devido aos altos custos associados a este último. Foi observada, por meio dos resultados, a importância de se realizar análises cuidadosas no momento do planejamento dos investimentos. Com o auxílio da ferramenta, pode-se estudar cada alternativa com cautela, evitando que os investidores criem uma concepção errônea sobre a viabilidade econômica do projeto. Além do mais, espera-se que essa abordagem contribua com a adoção de energias renováveis em áreas rurais, promovendo eficiência e sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar, Energia Eólica, Biodigestor, Custo nivelado.

OZANSKI, Adrielle Cristina. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, July, 2024.
Development of a computational tool for the economic evaluation of renewable electricity generation systems connected to the grid for rural properties.
Advisor: Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira. Co-advisor: Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira.

ABSTRACT

The main objective of this study was to develop a computational tool for economic comparison between grid-connected photovoltaic, wind and biogas energy generation systems for rural properties. The study aims to assist rural producers in choosing the renewable energy generation system that offers the best cost/benefit ratio. Initially, data were collected on the characteristics of the rural properties and the resources available for sizing each system. Subsequently, the costs of implementation, maintenance and operation of the energy generation alternatives were estimated. With this information, the LCOE of each system was calculated, allowing accurate comparisons regarding economic viability. Based on the sizing and economic analysis script, computational routines were developed using the C# and JavaScript languages. These routines gave rise to an easily accessible online platform, made available through a public website. The tool offers an intuitive and user-friendly interface, allowing users to size the systems and make economic comparisons between them in a practical, fast and efficient manner. The results of the simulations indicated that the photovoltaic solar system is the best investment option among the alternatives analyzed. The wind system also stood out as a competitive option compared to the biodigester, mainly due to the high costs associated with the latter. The results showed the importance of carrying out careful analyses when planning investments. With the help of the tool, each alternative can be studied carefully, preventing investors from creating a misconception about the economic viability of the project. Furthermore, it is expected that this approach will contribute to the adoption of renewable energy in rural areas, promoting efficiency and sustainability.

KEYWORDS: Solar energy, Wind energy, Biodigester, Levelized cost.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo geral.....	13
1.2	Objetivos específicos	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Fontes Renováveis de Energia.....	14
2.1.1	Fontes Renováveis de Energia no Mundo	14
2.1.2	Fontes Renováveis de Energia no Brasil	16
2.2	Energia Solar	17
2.3	Energia Eólica.....	18
2.3.1	Aerogeradores	19
2.4	Biodigestores	20
2.4.1	Tipos de biodigestores.....	21
2.5	Geração Descentralizada de Energia	22
2.5.1	Geração Descentralizada de Energia na Alemanha	23
2.5.2	Geração Descentralizada de Energia nos Estados Unidos	24
2.5.3	Geração Descentralizada de Energia no Brasil	24
2.6	Métodos de Avaliação Econômica de Sistemas Renováveis de Energia	26
2.6.1	Custo nivelado de energia	28
2.7	Programas computacionais para Dimensionamento e Avaliação de Sistemas Renováveis de Energia	28
2.8	Estudos de Caso sobre a Viabilidade Econômica e Técnica de Energias Renováveis.....	30
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1	Dimensionamento Sistema Fotovoltaico.....	32
3.2	Dimensionamento Sistema Eólico	34
3.3	Dimensionamento Biodigestor	36
3.4	Avaliação da viabilidade econômica	39
3.4.1	Sistema Energia Fotovoltaica	40
3.4.2	Sistema eólico	41
3.4.3	Biodigestor Tubular.....	42
3.5	Desenvolvimento programa computacional	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.	CONCLUSÕES	60

1. INTRODUÇÃO

A agricultura moderna vem enfrentando uma série de desafios devido à crescente demanda global por alimentos, associada com a escassez de recursos e a necessidade de práticas sustentáveis. O modelo tradicional tem forte dependência das fontes de energia habituais e dos trabalhos manuais, tendo como consequência a degradação ambiental e a ineficiência energética (REHMAN *et al.*, 2024).

As mudanças climáticas são agravadas pela emissão de gases do efeito estufa, representando tanto uma ameaça ao meio ambiente quanto à segurança alimentar, uma vez que as alterações dos padrões climáticos afetam a produção agrícola, com eventos extremos mais frequentes e o surgimento de novas pragas (DUMITRAN *et al.*, 2024).

O agravamento dos problemas de caráter ambiental e os riscos de apagões energéticos impulsionaram a busca por novos padrões de exploração dos recursos naturais. Logo, as energias renováveis figuram como uma alternativa eficaz para o esgotamento dos combustíveis fósseis, visto que podem ser utilizadas tanto em grandes centros urbanos quanto em locais remotos, onde não há disponibilidade de rede (NINO, 2018; YAHYAOU, 2017).

O Brasil tem se destacado na utilização de energias renováveis, realizando avanços significativos com uma participação de 49,1% de fontes renováveis em sua matriz energética total. No entanto, as Usinas Hidroelétricas (UHEs) constituem mais da metade desse percentual, evidenciando uma significativa dependência dos recursos hídricos para a geração de energia no país (EPE - Empresa de Pesquisa Energética, 2024).

A predominância das fontes de geração hídrica torna o país vulnerável às variações na disponibilidade de água. Devido às variações pluviométricas que ocorrem ao longo dos anos, as vazões dos afluentes aos reservatórios das UHEs são impactadas, afetando diretamente o sistema de geração de energia, especialmente em períodos prolongados de estiagem. Destaca-se que os subsistemas geradores de energia, embora interligados, estão sujeitos aos diferentes regimes de chuvas, podendo afetar regiões distintas (VILAR *et al.*, 2020).

Em 2024, por exemplo, o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), por meio de análises de dados históricos, identificou que o país passou pela seca com maior extensão e intensidade dos últimos 70 anos. No mês de agosto, 3.978 municípios apresentavam algum grau de seca, sendo que 201 se encontravam em condições de seca extrema (BRASIL, 2024).

Em 2021, ocorreu a redução de 8,50% na geração hidráulica com aumento na geração eólica e solar fotovoltaica. Entretanto, a diversificação da matriz energética continuou sendo um desafio (EPE, 2022).

A partir do referido cenário, a geração distribuída tem o intuito de ampliar o acesso dos consumidores às energias renováveis, buscando a economia financeira, autossustentabilidade e consciência socioambiental, bem como os benefícios gerados ao sistema elétrico, isto é, menos investimentos com a expansão dos sistemas de distribuição e transmissão, redução dos impactos ambientais, melhoria da qualidade do serviço devido à redução das cargas nas redes e das perdas, principalmente na transmissão de energia a longas distâncias (ANEEL, 2016; VIVENZA; GOMES, 2022).

Tendo em vista a importância da expansão das fontes renováveis de energia, a utilização de *softwares* para avaliação econômica e comparativa torna-se indispensável, dado que diversos aspectos afetam a produção de energia elétrica, levando em conta ainda a zona rural. Vale frisar que cada propriedade apresenta singularidades que devem ser ponderadas no momento da escolha do melhor sistema de geração. Portanto, deve-se ter uma abordagem abrangente para análise das diferentes opções, observando os custos de instalação, manutenção e operação, pois estes impactarão diretamente na viabilidade financeira do investimento.

Ao utilizar os *softwares*, os planejadores e tomadores de decisão podem avaliar diferentes cenários e identificar a combinação ideal de tecnologias renováveis para atender às demandas energéticas, otimizando investimentos e promovendo a sustentabilidade.

Sabendo que as fontes renováveis de energia produzem benefícios para a sociedade e reduzem os impactos ambientais, além da necessidade nacional da diversificação da matriz energética, observa-se a importância de se obter uma ferramenta que auxilie na tomada de decisão quanto ao sistema de geração de

energia a ser implantado, permitindo avaliar a opção que evidencia mais vantagem econômica para os produtores rurais.

A hipótese desse trabalho é a de que uma ferramenta computacional que permita comparar economicamente diferentes tipos de sistemas renováveis de geração de energia será útil na análise de decisão com relação a qual sistema será mais viável em uma dada propriedade rural, em função dos recursos renováveis disponíveis.

1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do estudo proposto é desenvolver uma ferramenta computacional para comparação econômica entre sistemas de geração de energia fotovoltaica, eólica e biogás conectados à rede para propriedades rurais.

1.2 Objetivos específicos

- Elaborar uma rotina computacional para dimensionar os sistemas de geração de energia fotovoltaica, eólica e biogás para propriedades rurais.
- Desenvolver uma rotina computacional para o cálculo do custo nivelado de energia.
- Implementar uma rotina computacional que realize a comparação econômica entre os sistemas e determine o mais viável para a propriedade rural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fontes Renováveis de Energia

Existem diversas fontes de energia em toda a natureza, convencionalmente são classificadas em duas categorias: não renováveis e renováveis. As fontes não renováveis são limitadas na reserva e no fornecimento, em razão do longo tempo necessário para que elas se reestabeleçam naturalmente. O carvão, o petróleo e o gás natural são exemplos de fontes não renováveis. Em compensação, os recursos renováveis são aqueles reabastecidos continuamente ou em um curto período de tempo, tais como: a energia solar, eólica, hídrica, biomassa e geotérmica (ISLAM; HASANUZZAMAN, 2020).

Nas áreas rurais, é comum a utilização de recursos renováveis disponíveis no local para obtenção de energia, como pequenas rodas de água, o sol, o vento e os resíduos agrícolas. Tais fontes desempenham um papel fundamental na garantia da estabilidade da produção de energia elétrica no campo, além dos benefícios ambientais e econômicos. Portanto, aplicando tecnologias adequadas é possível atender o consumo das propriedades rurais, por meio de micro e minicentrals hidrelétricas, de biogás, de biocombustíveis, de biomassa ou das energias eólicas e solar (MENEZES, 2017).

2.1.1 Fontes Renováveis de Energia no Mundo

Em 2021, as energias renováveis tiveram crescimento em capacidade de energia, apesar das consequências da pandemia do COVID-19, da queda na capacidade instalada em 2020, do aumento dos preços dos *commodities* que pertencem a cadeia de fornecimento de energia renovável e de projetos atrasados (REN 21, 2022).

Em vista disso, nos últimos quatro anos muitos países aceleraram a adoção de energias renováveis como resposta à crise causada pela pandemia e as preocupações com segurança energética. Desde 2020, os investimentos globais em energia limpa aumentaram 60% e estes investimentos foram cerca de 2 (dois) trilhões de dólares por parte dos governos (IEA, 2024).

As adições globais à capacidade de energia renovável aumentaram 473 GW cerca de 36% em 2023, batendo o recorde pelo 22º ano consecutivo. A energia solar foi destaque sendo responsável por quase três quartos de todas as adições de capacidade de energia renovável (REN 21, 2024a).

A energia solar fotovoltaica e a energia eólica *onshore* juntas representaram mais de 95% dos 473 GW em capacidade de energia renovável adicionada. A energia solar fotovoltaica representou um aumento de 73% em 2023, correspondendo a 346 GW, ao passo que a energia eólica *onshore* adicionou 104 GW, com um crescimento de 48%. Os sistemas eólicos *offshore* tiveram um aumento de 27% em comparação com o ano anterior (IRENA, 2024).

Outras tecnologias tiveram adições mais modestas, como a energia solar concentrada (CSP), geotérmica, bioenergia e energia hidrelétrica. Combinadas totalizaram 12 GW de capacidade instalada adicional em 2023, sendo que 7 GW eram energia hidrelétrica, que sofreu uma diminuição comparada a 2022 (IRENA, 2024).

A China se tornou o primeiro país a superar um TW de capacidade instalada de energia renovável em 2021 (REN 21, 2022). Em 2023, representou o maior mercado de energia, tendo como participações: energia eólica terrestre 66%, energia eólica *offshore* 65%, energia fotovoltaica 63% e energia hidrelétrica 44%. Salienta-se as adições substanciais de energias renováveis no país, que impulsionaram o declínio dos custos médios ponderados globais dessa tecnologia (IRENA, 2024).

Globalmente, ocorreram progressos nas adições de energia renovável, porém com variações entre regiões e tecnologias. Nos Estados Unidos, por exemplo, em relação a 2022, o único crescimento foi em energia solar fotovoltaica, tendo um aumento de capacidade total instalada de mais de 50%, passando para 33 GW. Por outro lado, as adições de energia eólica caíram para um nível mais baixo desde 2014 (REN 21, 2024a).

Na Oceania, a participação das energias renováveis na matriz energética aumentou 43% em 2023, em consequência do desenvolvimento na Austrália, que obteve um crescimento de 9% em geração de energias renováveis no mesmo ano. Esses resultados foram atribuídos principalmente ao crescimento combinado da

participação das energias eólica e solar fotovoltaica, tendo um incremento de 20% na região (REN 21, 2024b).

2.1.2 Fontes Renováveis de Energia no Brasil

A grande participação das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira confere uma posição privilegiada ao Brasil em relação ao resto do mundo no que se refere à sustentabilidade ambiental, em razão de corresponder a 49,10% da oferta interna de energia (EPE, 2024).

Em 2023, a participação de renováveis na matriz elétrica ficou em 89,2%, sendo representada pela hidráulica (58,90%), eólica (13,20%), biomassa (8,00%) e solar (7,00%), como ilustrado na Figura 1 (EPE, 2024).

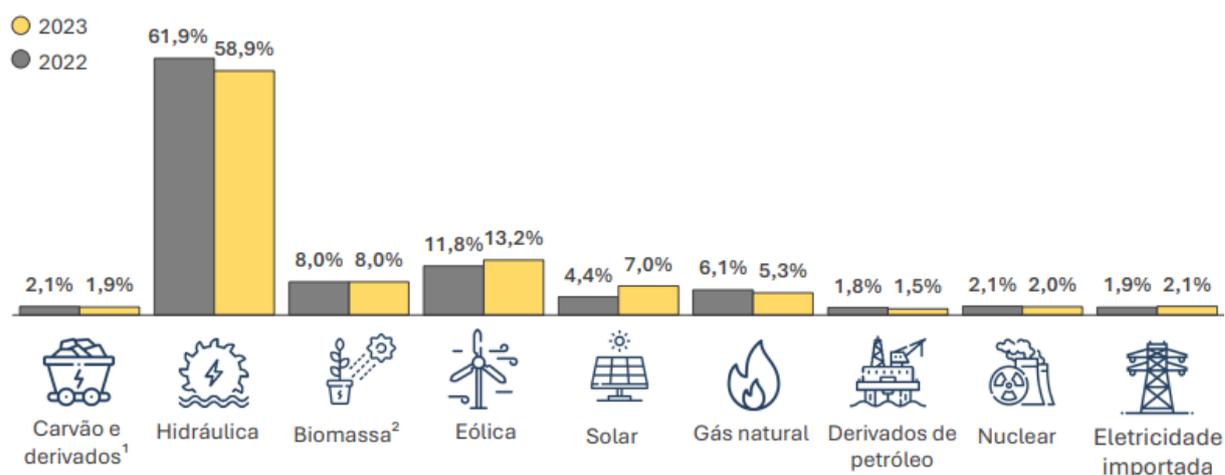


Figura 1 - Participação das fontes na capacidade instalada.

Fonte: EPE (2024).

Historicamente, a produção de energia por meio de fontes hidráulicas, formada por Usinas Hidrelétricas (UHE), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) e Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH), exerce um papel fundamental. Entretanto, entre os anos de 2014 e 2015 aconteceu uma redução na participação das fontes renováveis na matriz energética, em consequência da redução da oferta hídrica (EPE, 2022).

Em 2015, as fontes renováveis retomaram seu crescimento, com a expansão dos derivados de cana, da energia eólica e do biodiesel, atingindo 48,50% de representação em 2020. Entretanto, ocorreu uma redução novamente em 2021 em consequência da escassez hídrica (EPE, 2022).

Apesar de o Brasil possuir grandes avanços em relação à introdução de fontes renováveis de energia em sua matriz, observa-se a necessidade de cada vez mais diversificá-la, tendo em vista que, embora as usinas hidroelétricas possuam grandes reservatórios em longos períodos de estiagem, como já registrado, estes não atendem às necessidades energéticas da população e crescente demanda energética (MARQUEZINO, 2017).

2.2 Energia Solar

A energia solar é a fonte de energia mais abundante no planeta Terra. Origina-se do sol, por meio da fusão nuclear, quando partículas de hidrogênio são transformadas em hélio, liberando energia radiante em forma de luz e calor. Esta energia pode ser empregada de diversas formas e por diferentes sistemas como, por exemplo, os artificiais, como os sistemas fotovoltaicos, ou os naturais, como na fotossíntese (NAKABAYASHI, 2014).

O fenômeno responsável pela conversão direta da luz em eletricidade é denominado efeito fotovoltaico, que foi descoberto pelo cientista francês Alexandre Edmond Becquerel, em 1839, enquanto investigava o efeito de metais imersos em eletrólitos. Na ocasião, constatou a geração de elétrons livres em um material semiconductor sujeito a um fluxo de fótons (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005; ASDRUBALI; DESIDERI, 2019).

Por intermédio dos sistemas fotovoltaicos, a energia solar é transformada em energia elétrica, o componente responsável por essa conversão são as células fotovoltaicas. Cada célula é composta por camadas de material semiconductor. A luz incide sobre ela e cria um campo elétrico por meio das camadas, permitindo que a eletricidade flua (CRESESB, 2008b; TYAGI *et al.*, 2013; MOLAEI, M. J., *et al.*, 2022).

As células fotovoltaicas são unidades básicas responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica, por meio do efeito fotovoltaico. A geração de um fluxo de elétrons, decorrente da incidência de feixes de radiação do sol sobre a superfície da placa fotovoltaica, é denominada efeito fotovoltaico. Este efeito ocorre em materiais semicondutores, utilizados para fabricação das placas (ASDRUBALI; DESIDERI, 2019; SAMPAIO *et al.*, 2019).

O sistema fotovoltaico é composto pelos módulos fotovoltaicos, que consistem no agrupamento de diversas células, destinados à conversão da radiação

solar em eletricidade, gerada em CC (corrente contínua). O inversor solar é responsável pela conexão entre o gerador fotovoltaico (conjunto de módulos fotovoltaicos) e a carga dos equipamentos ou rede, que são alimentados em CA (corrente alternada), nele ocorre a transformação da corrente (OVELHA, 2017).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede – SFCR ou Sistemas Fotovoltaicos Isolados – SFI. Os SFI, além dos componentes citados anteriormente, possuem ainda um banco de baterias para o armazenamento do excedente gerado, bem como o consumo durante a noite ou em períodos nublados. Nesses sistemas, também é necessário utilizar controladores de carga, para evitar descargas excessivas ou sobrecargas (KHALIGH; ONAR, 2018).

2.3 Energia Eólica

Há séculos a humanidade vem utilizando a energia eólica, que contribuía com a realização de atividades cotidianas como moagem dos grãos, bombeamento de água, entre outras. A energia eólica é iniciada por meio da radiação solar, o que a torna ilimitada na escala de tempo da humanidade, porém favorece o desenvolvimento sustentável (MENEZES, 2012; BELYAKOV, 2019).

Os deslocamentos das massas de ar dão origem ao vento com grande potencial para ser utilizado na geração de eletricidade. Comparada à queima de combustíveis fósseis, a energia eólica tem um impacto ambiental significativamente menor, evidenciando-se como uma alternativa sustentável e renovável. Nos tempos modernos, a energia eólica emergiu como uma das formas de energia renovável de crescimento mais rápido. Com a queda dos preços e avanços tecnológicos, seu uso está se expandindo globalmente, sendo consolidado sobre os fundamentos estabelecidos há mais de um século, quando as primeiras turbinas eólicas geradoras de eletricidade foram desenvolvidas nas décadas de 1880 nos Estados Unidos e no Reino Unido (PICCOLO *et al.*, 2014, ABDULHAYAN, 2023).

A energia eólica provém da radiação solar, levando em conta a energia total disponível dos ventos ao redor do planeta. Estima-se que 2% da energia solar absorvida pela terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (DUTRA, 2008).

2.3.1 Aerogeradores

Os aerogeradores são equipamentos cuja função é a conversão da energia cinética do vento em energia elétrica. O sistema funciona basicamente pelo acionamento das pás da turbina, por meio do vento, que produzirá um torque mecânico responsável por arrastá-las. Parte da energia cinética contida no vento é capturada pela turbina, que será convertida em energia mecânica rotacional e transmitida a um gerador elétrico (ZANCHETTIN, 2012).

Basicamente são compostos por rotor, sistemas de controle, gerador e torre. As turbinas eólicas podem ser classificadas quanto à sua maneira de interação com o vento e também quanto à disposição do eixo para o qual é transmitido o movimento mecânico (LIMA, 2018).

A conversão da energia eólica em energia elétrica depende de forças aerodinâmicas, denominadas força de arrasto e força de sustentação. Para uma mesma velocidade de vento, rotores sujeitos ao efeito das forças de sustentação admitem liberar uma potência maior do que aqueles sob efeito de forças de arrasto (CRESESB, 2008a).

Atualmente, os rotores possuem duas ou três lâminas, que podem ser constituídas de material composto, como fibra de vidro. Rotores modernos com mais de três pás são utilizados quando se necessita de um grande torque de partida, como para o de bombeamento mecânico de água. Contudo, o elevado número de pás e alto torque de partida implicam em menor eficiência (AMARAL, 2011).

Na produção de energia eólica, os principais tipos de aerogeradores são as turbinas de eixo horizontal e as turbinas de eixo vertical. As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns e amplamente utilizadas atualmente. Elas consistem em pás que giram em torno de um eixo horizontal, sendo mais eficientes em áreas de ventos consistentes e de alta velocidade. Por outro lado, as turbinas de eixo vertical possuem pás que giram em torno de um eixo vertical, apresentando vantagens em termos de menor impacto visual, menor necessidade de manutenção e capacidade de operar em ventos turbulentos e de baixa velocidade (RODRIGUES *et al.*, 2016; EFTEKHARI *et al.*, 2022).

Em geral, as turbinas eólicas convencionais modernas de eixo horizontal possuem uma torre de aço ou concreto, um sistema de guinada entre a torre e a nacela (carcaça da seção central da turbina eólica), que orienta a turbina em direção ao vento, além do trem de força (caixa de engrenagens ou gerador de acionamento direto), um conversor e o rotor com as pás (JUNGINGER *et al.*, 2020).

2.4 Biodigestores

Os biodigestores são compostos por duas partes, a câmara de biodigestão, reservatório fechado onde acontece a fermentação anaeróbica dos resíduos, a liberação do biogás e a formação do biofertilizante, e o gasômetro, campânula na qual o biogás gerado é capturado para o seu devido aproveitamento ou conversão energética (GASPAR, 2003; SANTOS *et al.*, 2017).

A digestão anaeróbica é um processo de recuperação de energia sustentável a partir de resíduos biodegradáveis obtidos de resíduos agrícolas, do lodo de esgoto, de resíduos industriais, entre outros. Os dejetos passam por processos nos quais os microrganismos decompõem materiais biodegradáveis na ausência de oxigênio para produzir biogás. Os resíduos digeridos podem ser usados como corretivo do solo ou fertilizante na agricultura. Devido ao seu benefício para o meio ambiente (redução na emissão de gases de efeito estufa, redução de resíduos orgânicos) e a produção de energia, existe uma tendência crescente dos agricultores utilizarem os biodigestores como uma forma alternativa de manejo de dejetos (WUKOVITS; SCHNITZHOFFER, 2009; EPA, 2011; NOOR *et al.*, 2020).

O biogás é formado pela mistura de gás metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Diferentes conjuntos de microrganismos são necessários para a produção do biogás, sendo que atuam em conjunto com diversos fatores, por exemplo: tipo de substrato, PH e temperatura. Todos esses elementos afetam a composição do biogás produzido (KARLSSON, 2014).

O processo de formação do biogás é resultado de várias etapas vinculadas nas quais o material é continuamente dividido em unidades menores. Ele pode ser definido nas seguintes fases: hidrólise, primeira fase do processo, onde a matéria orgânica complexa (polímeros) é quebrada em parte menores e mais simples;

acidogênese, nesta etapa, os produtos da hidrólise são convertidos em substratos para metanogênese; a acetogênese, que também converte os produtos da acidogênese que não sofrem metanogênese diretamente; e, por fim, a metanogênese, que é a produção de metano dos substratos por bactérias anaeróbias (SEADI *et al.*, 2008; MIRMOHAMADSADEGHI *et al.*, 2019).

Na Figura 2, tem-se a representação esquemática das etapas do processo de digestão anaeróbia.

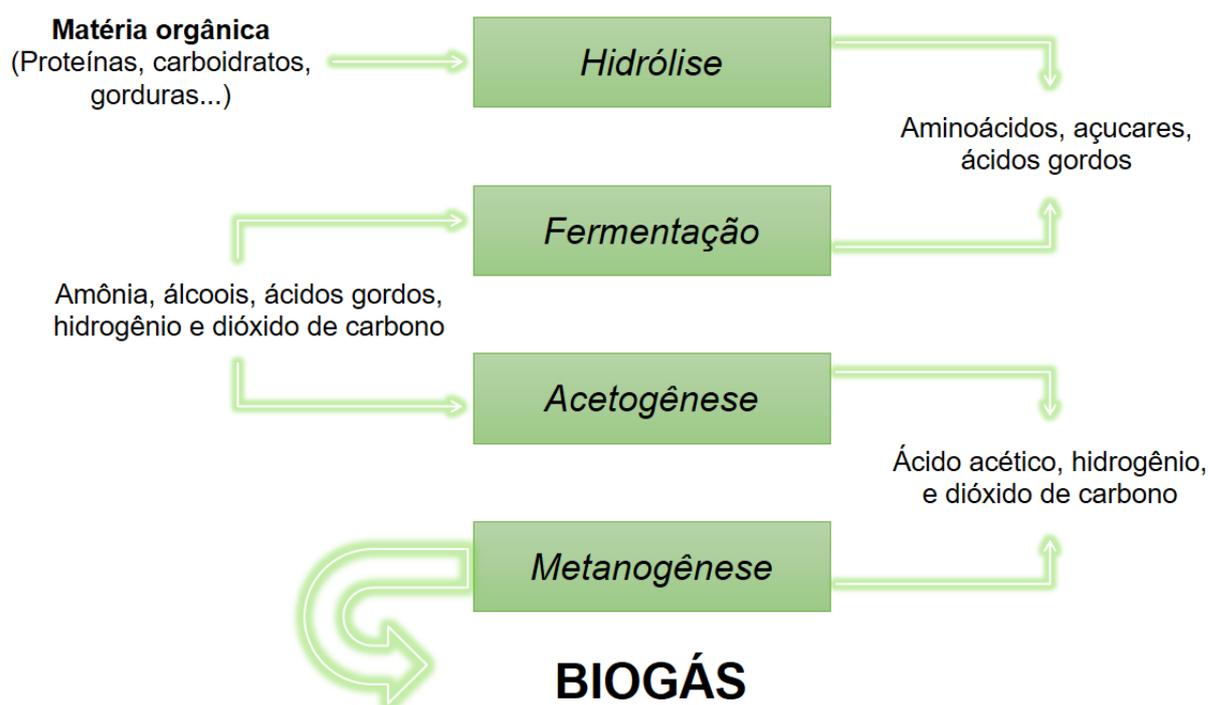


Figura 2 - Representação esquemática das etapas da digestão anaeróbia.

Fonte: Karlsson (2014). Adaptada pela autora.

2.4.1 Tipos de biodigestores

A literatura apresenta como principais modelos de biodigestor: o chinês, o canadense e o indiano.

O Modelo Chinês tem uma câmara cilíndrica em alvenaria para fermentação e teto abobado, impermeável para armazenamento do biogás. Seu funcionamento tem como princípio a prensa hidráulica, visto que o aumento de pressão interna resultante do acúmulo de biogás acarreta o deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída. Quando ocorre a descompressão, o

deslocamento acontece no sentido contrário (DEGANUTTI *et al.*, 2002; SILVA; YADA, 2019).

O Modelo Canadense, tipo horizontal, é composto por uma caixa em alvenaria, em que a largura é maior no tocante à profundidade, possibilitando a geração de um volume elevado de biogás, devido à sua maior área de exposição ao sol. O material utilizado na cúpula é de plástico maleável, tipo PVC, que infla com a produção de gás (TORRES *et al.*, 2012; CALZA *et al.*, 2015).

O Modelo indiano é constituído por uma campânula com gasômetro que pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou em selo d'água externo. Possui também uma parede central que divide o tanque de fermentação em duas câmaras, com a função de permitir que o material circule por todo o interior da câmara de fermentação. O seu funcionamento ocorre sob pressão constante, uma vez que na proporção que o volume cresce e não é consumido, o gasômetro tende a mover-se verticalmente, expandindo seu volume. Assim sendo, a pressão no interior é mantida de maneira constante (BONTURI; VAN DIJK, 2012).

2.5 Geração Descentralizada de Energia

A geração descentralizada (GD) ou distribuída é a energia gerada próximo ao ponto de consumo. A GD reduz a necessidade de infraestrutura em transmissão e distribuição, resultando em economias financeiras e diminuição de perdas. Além disso, oferece mais flexibilidade, eficiência e economia comparada com a geração centralizada. Várias tecnologias de energia podem ser empregadas em sistemas de GD, dependendo do tipo de projeto e da aplicação (ASIF, 2022).

A tarifação Feed-in (FIT) é uma política de compensação direcionada à geração distribuída de energias renováveis. Países da América do Sul, da Europa e a China utilizam tal mecanismo com o objetivo de acelerar os investimentos em energias renováveis. A FIT é uma iniciativa governamental que exige que as empresas de rede elétrica comprem eletricidade de produtores de energia renovável a preços especificados pelo governo, garantindo o pagamento de tarifas pré-estabelecidas pela injeção de energia elétrica na rede de distribuição. Resumidamente, as tarifas feed-in são esquemas baseados em preços com contratos de longo prazo, pelos quais um investidor recebe uma remuneração fixa

ou variável por um longo período (15 a 20 anos), ou seja, durante um intervalo de tempo suficiente para tornar o investimento atrativo (YU-ZHUO *et al.*, 2017; BARBOSA *et al.*, 2020; SILVA *et al.*, 2020).

A medição líquida (Net Metering) é outra política empregada em vários países, inclusive no Brasil, permitindo que os clientes vendam o excesso de eletricidade gerada a partir de fontes de energia renovável de volta às concessionárias a uma taxa de compensação especificada. A medição líquida é amplamente considerada como tendo um papel importante na implantação da geração distribuída (LAWSON, 2019; SMITH *et al.*, 2021).

O sistema de compensação baseia-se na medição do fluxo de energia em uma unidade consumidora beneficiada por um sistema de geração distribuída conectado à rede, por meio de medidores bidirecionais. Assim, no ponto de conexão registra-se o valor líquido da energia. Se a geração for maior que a demanda, o consumidor adquire créditos em energia. Do contrário, pagará a diferença entre a energia gerada/consumida (BENICIO, 2019).

2.5.1 Geração Descentralizada de Energia na Alemanha

Na Alemanha, a geração descentralizada foi impulsionada pela *Erneuerbare Energie Gesetz – EGG* (Lei de Energias Renováveis), que tem o objetivo de impulsionar a participação das energias renováveis na matriz energética, tendo como meta atingir 80% de participação até 2050. Esses incentivos apresentam também os interesses climáticos, a proteção ambiental e o desenvolvimento energético sustentável. Ademais, os recursos de energia fóssil são poupados e promove-se o desenvolvimento tecnológico na área de energia renováveis (EGG, 2016).

A EEG prevê que as distribuidoras recebam toda energia proveniente de fontes renováveis. No início do plano, previa-se o pagamento de um incentivo financeiro para os produtores, garantido por 20 anos. As tarifas pagas são denominadas feed-in e diminuíam em intervalos regulares para exercer pressão de custos sobre geradores de energia e fabricantes de tecnologia. Essa redução é aplicada apenas para novas plantas e os pagamentos são realizados proporcionais ao tipo de tecnologia implantado, sendo os sistemas solares fotovoltaicos os melhores remunerados (BUCHHOLZ *et al.*, 2019).

Entretanto, para que esse incentivo seja viável, toda a população alemã que consome energia elétrica paga uma taxa denominada EGG-Umlage, que tem o objetivo de financiar a remuneração paga aos produtores de energia (SOARES, 2019).

2.5.2 Geração Descentralizada de Energia nos Estados Unidos

Os Estados Unidos não possuem uma política federal que apoie o desenvolvimento da energia renovável. As políticas de energia renovável dos EUA incluem padrões estaduais de portfólio de energia renovável (RPSes), que determinam a quantidade mínima de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis de energia que as concessionárias locais devem fornecer. O Plano de Energia Limpa proposto que estabelece metas de redução de emissões estado a estado até 2030; é o Clean Energy Act de 2007, que apresenta medidas que buscam aumentar a eficiência energética e a produção de combustível renovável (OKIOGA *et al.*, 2018).

A maioria dos estados adota o sistema baseado no Net Metering para a inclusão das energias renováveis, porém alguns estados adotam critérios específicos, como:

- Tipo de consumidor que pode ser beneficiado. Em alguns estados, admite-se apenas consumidores residenciais, outros ampliam também aos consumidores do tipo comercial e ainda outros permitem qualquer tipo de consumidor.

- Tecnologia usada. Em cada estado, é avaliada a fonte de energia utilizada para produção de energia para aceite ao programa.

- Capacidade instalada. São estabelecidos limites de capacidade instalada para os usuários. Em geral, o limite fixado é inferior a 100 kW. Determinadas distribuidoras estipulam também um limite total de capacidade da geração distribuída, por exemplo, em alguns casos o somatório de todas as capacidades instaladas dos consumidores não deve ultrapassar a faixa de 0,10% da demanda horária de pico da companhia (N.C. CLEAN ENERGY TECHNOLOGY CENTER, 2022).

2.5.3 Geração Descentralizada de Energia no Brasil

O sistema elétrico brasileiro foi constituído com base na matriz a partir da qual a fonte hidráulica se destacou. Além da abundante disponibilidade de potenciais hidrelétricos em todo território nacional, também apresenta competitividade econômica em relação às demais fontes alternativas, tais como biomassa, térmicas ou nuclear. Com a expansão dessa fonte de energia, surgiu a necessidade da construção de usinas cada vez mais distantes dos centros consumidores e, conseqüentemente, com custos maiores, tendo em vista a necessidade de construção de extensas linhas de transmissão, aliada a complexidade de operação. Desta forma, mostrou-se necessário buscar alternativas para geração descentralizada (VIVENZA; GOMES, 2022).

Com o intuito de ampliar o sistema de geração de energia, promovendo o incremento da implantação de energias renováveis, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa (REN) nº 482/2012, no dia 17 de abril de 2012, regulamentando e autorizando o consumidor brasileiro a gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e criando o sistema de compensação de energia elétrica, conhecido como *Net Metering* (ANEEL, 2012; GONÇALVES, 2018).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2018), investimentos na geração distribuída se justificam pelos benefícios promovidos ao sistema elétrico, entre eles, o adiantamento dos investimentos em expansão do sistema de transmissão e distribuição, a redução no carregamento da rede, a minimização de perdas, a diversificação da matriz energética e o baixo impacto ambiental.

Em 2015, foi publicada a Resolução Normativa – RN ANEEL nº 687 revisando a nº 482, estabelecendo que a microgeração distribuída corresponde a uma central geradora com potência instalada até 75 quilowatts (kW) e a minigeração distribuída aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (ANEEL, 2015).

Foram ressaltados também novos critérios para o sistema de compensação de energia. Os referidos critérios definem que o consumidor tem um prazo de até 60 meses para utilização dos créditos, podendo ser utilizados na unidade consumidora responsável pela geração, ou ainda para abater o consumo de outras unidades da

mesma titularidade situadas em outra localidade, desde que atendida pela mesma concessionária (ANEEL, 2015).

2.6 Métodos de Avaliação Econômica de Sistemas Renováveis de Energia

Nem sempre as alternativas tecnológicas que introduzem maior eficiência técnica também terão mais economia financeira ou maior lucro aos investidores, pois são tecnologias que demandam alto investimento, valor que pode não retornar ao investidor no horizonte de tempo planejado. Logo, deve-se definir as prioridades para o sistema (maior eficiência ou maior economia financeira). Desta forma, a matemática financeira auxilia na análise deste investimento com ferramentas que têm a finalidade de racionalização de recursos que auxiliam na tomada de decisão acerca destes investimentos (FILHO, 2019).

A avaliação econômica de um projeto consiste em estimar os gastos envolvidos em cada uma de suas etapas, desde sua concepção, operação, manutenção e receitas geradas durante um período de tempo determinado. Com base nestas estimativas, é possível determinar o fluxo de caixa relativo ao investimento, por meio dos custos e receitas para, então, determinar os indicadores econômicos obtidos para o empreendimento. Resumidamente, a análise de viabilidade econômica de um projeto busca determinar a rentabilidade de um empreendimento e sua atratividade perante outras oportunidades de igual ou menor risco (CAVALER, 2022).

A literatura salienta uma diversidade de ferramentas para auxiliar na avaliação econômica de empreendimentos, na sequência serão evidenciadas algumas delas.

Taxa Mínima de Atratividade – TMA é a taxa de desconto que mostra o mínimo de retorno que se almeja com um projeto para que ele seja considerado atrativo. É utilizada para refletir valores futuros de um fluxo de caixa a valores presentes e demonstra o custo de oportunidade referente aos outros investimentos que se renunciam ao optar por uma alternativa específica. É um parâmetro muito importante em análises financeiras. Por isso, deve ser determinada com cuidado (PUCCINI, 2021).

Valor Presente Líquido – VPL é uma ferramenta amplamente empregada na avaliação econômica de projetos, visto que representa a diferença entre um

investimento inicial e o valor presente de fluxos de caixa futuros a uma taxa de desconto i . Ou seja, transportam-se os valores do fluxo de caixa para instante presente (data do investimento), a uma taxa de mercado (ou taxa de atratividade), e soma-se algebricamente com o seu investimento (CARVALHO, 2018; VIANNA, 2018).

O VPL positivo aponta a viabilidade econômica do empreendimento, pois o valor presente nas saídas de caixa é menor que a entrada de caixa, gerando um retorno igual ou maior que o custo do capital investido. Logo, quando o projeto apresenta o VPL menor que zero, o seu custo capital é superior ao seu retorno e, então, é considerado inviável (CAVALER, 2022).

Para Silva e Carneiro (2022), ele pode ser expresso matematicamente pela Equação 1.

$$VPL = I + \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (1)$$

Em que:

VPL = Valor Presente Líquido;

I = Investimento inicial;

Σ = Somatório da data 1 até a data n;

FC_t = Fluxo de caixa no t-ésimo período;

k = Taxa requerida ou TMA.

A Taxa Interna de Retorno – TIR é a taxa de juros que torna o valor presente das receitas igual ao valor presente das despesas, isto é, representa a taxa de juros que torna o VPL nulo. A TIR obtida para um empreendimento pode ser confrontada com a taxa mínima de atratividade desejada objetivando direcionar a decisão de investimento. Demonstra a viabilidade econômica ou não do projeto, se a $TIR > TMA$, o sistema é viável, se $TIR < TMA$, o sistema é inviável (OTTONELLI *et al.*, 2020).

O Payback descontado tem como finalidade estabelecer o tempo necessário para que o valor investido em um projeto seja compensado pelos benefícios gerados, simplificado, para que o valor investido seja equivalente às entradas de fluxo de caixa. Nessa abordagem, é oportuno levar em conta os descontos que

acontecem na série de valores de fluxo de caixa, referentes à inflação ou outras taxas pertinentes ao projeto (RASOTO *et al.*, 2012; LACCHINI, 2017).

Esse método pode ser utilizado para avaliar os benefícios de curto e longo prazo dos projetos de sistemas de energia. Sistemas com períodos de retorno mais curtos são economicamente mais favoráveis aos que apresentam tempo de retorno mais longos. Assim sendo, um período de retorno menor é associado a uma maior sustentabilidade (DINCER; ABU-RAYASH, 2020).

2.6.1 Custo nivelado de energia

O custo nivelado de energia (LCOE, do inglês Levelized Cost of Energy) é um método amplamente utilizado na avaliação econômica de projetos de geração de energia, uma vez que não leva em conta apenas a energia produzida/poupada durante a vida útil do sistema, mas também leva em conta o custo de instalação, de manutenção e de operação (FERRARI, 2021; TAZI *et al.*; 2022).

O custo nivelado de energia reflete o custo médio por unidade de energia produzida em um determinado sistema durante sua vida útil. O custo é determinado pela divisão dos custos totais do sistema de energia pela energia total gerada ao longo de sua vida útil. Os custos devem ser ajustados para refletir o valor do dinheiro na escala de tempo do projeto, usando uma taxa de desconto, ou seja, transportando para o valor presente (BRUNING, 2022).

O custo nivelado de energia é comumente utilizado para comparar diferentes fontes de energia e tecnologias de geração de energia, permitindo que os tomadores de decisão avaliem a viabilidade econômica de diferentes opções de geração de energia. É oportuno lembrar que o custo nivelado de energia não pondera outros fatores importantes, como a segurança, a confiabilidade e o impacto ambiental de diferentes sistemas de energia (GUIMARÃES, 2019).

2.7 Programas computacionais para Dimensionamento e Avaliação de Sistemas Renováveis de Energia

O crescente interesse em fontes de energia renovável tem impulsionado a utilização de sistemas de geração de energia solar, eólica e biogás em diversos países. Todavia, o dimensionamento desses sistemas requer conhecimentos

técnicos e econômicos específicos. A utilização de programas computacionais para auxiliar no dimensionamento e na análise econômica desses sistemas tem sido uma tendência crescente.

Atualmente, existem alguns *softwares* disponíveis que auxiliam no dimensionamento e análises econômicas de diferentes sistemas de energia renováveis. No dimensionamento de sistemas de energia solar, por exemplo, destaca-se o PVsyst, *software* comercial desenvolvido pela empresa suíça PVsyst SA e vendido por assinatura anual, com diferentes níveis de funcionalidades e opções de licença para empresas e profissionais. O *software* permite projetar, dimensionar, simular e analisar o desempenho de sistemas de energia solar fotovoltaica. As análises podem ser realizadas em diferentes locais, tendo em vista diferentes condições climáticas, inclinação e orientação dos painéis solares, entre outros parâmetros. Além disso, é possível avaliar ainda a eficiência dos inversores e das baterias, além de fornecer dados detalhados sobre a geração de energia ao longo do tempo (PVSYST, 2023).

O mercado também destaca outros *softwares* como o System Advisor Model (SAM), oferecido de forma gratuita, desenvolvido pelo National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos Estados Unidos. Ele apresenta a modelagem e análise de diversos sistemas de energia renovável como: solar, eólica, hidroelétrica, geotérmica e biomassa. É capaz de simular o desempenho do sistema de energia renovável em diferentes condições, como o clima, a localização, o tipo de tecnologia e o tamanho do sistema, ele pode fornecer informações sobre a produção de energia, a eficiência do sistema, o custo do ciclo de vida e outras métricas importantes (SAM, 2023).

Para análises de viabilidade técnica, econômica e ambiental para projetos de energia renovável e eficiência energética, tem-se o RETScreen desenvolvido pelo Governo do Canadá, também oferecido de forma gratuita que pode ser usado por profissionais e estudantes de diversas áreas. Esse programa proporciona analisar projetos de diversas fontes de energia renovável, incluindo solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica, bem como projetos de eficiência energética, como a substituição de equipamentos por outros mais eficientes. Ele permite avaliar diversos aspectos de um projeto, como a produção de energia, o fluxo de caixa do projeto, o retorno sobre o investimento e o período de retorno (RETSCREEN, 2023).

Voltado para o dimensionamento de sistemas de geração de energia eólica, tem-se o *software* WindPRO, desenvolvido pela empresa EMD International A/S, que oferece licenças de uso para empresas e profissionais da indústria de energia eólica, os preços variam conforme o tipo de licença e o número de usuários. Ademais, é possível obter uma versão gratuita para testes. É amplamente utilizado para avaliação de projetos de energia eólica, bem como para otimizar projetos de parques eólicos. Oferece uma diversidade de recursos para análises, que vão desde a modelagem do terreno, o cálculo do perfil de vento, a análise de turbulência, a estimativa de produção de energia eólica, até a otimização do layout do parque eólico (WINDPRO, 2023).

2.8 Estudos de Caso sobre a Viabilidade Econômica e Técnica de Energias Renováveis

Bissani (2022) desenvolveu uma análise técnica e econômica para diferentes sistemas de geração de energia elétrica, tendo como foco uma propriedade rural que produz frangos de corte com demanda energética mensal acima de 9.000 kWh. Os sistemas estudados foram o biogás, fotovoltaico e híbrido, os resultados apontaram que o sistema de biogás apresenta um grande potencial com tempo de retorno similar ao híbrido. Contudo, a área necessária para implantação do sistema e o armazenamento da biomassa tornam o investimento menos atrativo. O sistema híbrido se destacou em relação ao fotovoltaico por ter um tempo de retorno menor. Desta forma, este figurou como a melhor opção de investimento.

Grandi (2022) realizou um estudo comparativo técnico-econômico para os sistemas de geração de energia renováveis eólico, fotovoltaico e híbrido. O experimento conduzido em uma propriedade rural com dois aviários no município de Corbélia, região oeste do estado do Paraná. Os resultados apontaram que o sistema eólico e o híbrido não são viáveis financeiramente para aquelas condições, devido seu alto custo de implantação, o que resultou em um Valor Presente Líquido VPL negativo. A utilização de aerogeradores importados impactou diretamente no elevado custo de implantação dos sistemas. O sistema fotovoltaico mostrou melhores resultados, com VPL positivo e tempo de retorno do investimento de 10

anos, sendo esperado um custo evitado anualmente de R\$ 47.562,77 e um retorno financeiro de R\$ 496.431,51 ao final da vida útil do sistema.

Araújo (2021) também conduziu uma pesquisa sobre a viabilidade técnico-econômica entre sistemas de geração de energia, biodigestores tubulares e sistema fotovoltaico. O experimento foi conduzido em uma propriedade rural produtora de leite bovino, no município de Brasilândia do Sul, estado do Paraná. Ambos os sistemas apresentaram viabilidade econômica com VPL positivos, porém o sistema fotovoltaico teve melhor tempo de retorno do investimento de 8 anos e custo de implantação de R\$ 171.687,10. No caso do biodigestor tubular, apesar do custo de implantação maior de R\$ 204.132,66, o tempo de retorno foi menor de 6 anos. As duas simulações levaram em conta a aquisição dos sistemas por meio do pagamento a vista.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia empregada na elaboração da ferramenta computacional. Inicialmente, são exibidas as sequências de cálculo utilizadas para o dimensionamento dos sistemas de geração de energia, posteriormente, foram feitas ponderações sobre a sua concepção, ressaltando a abordagem sistemática adotada.

Para Almeida e Luz (2012), no contexto da gestão de negócios, os fatores econômicos desempenham um papel crucial, destacando-se particularmente os indicadores de decisão e gestão. A determinação destes indicadores requer a aplicação de metodologias adequadas, com níveis de complexidade e detalhamento determinados em função do porte e diversificação do empreendimento.

3.1 Dimensionamento Sistema Fotovoltaico

O dimensionamento do sistema fotovoltaico seguiu a metodologia proposta por Pinho e Galdino (2014).

O primeiro passo do dimensionamento do sistema fotovoltaico é o levantamento do histórico de consumo mensal de energia elétrica da propriedade. Tal levantamento permite estimar o consumo médio diário, que é utilizado no cálculo da potência necessária para o sistema fotovoltaico.

Outro fator importante para o dimensionamento está ligado aos dados de irradiação solar no local onde será instalado o sistema. Os valores mencionados são obtidos por meio da base de dados SunData (CRESESB, 2018c).

Os autores orientam ignorar os efeitos da variação da irradiância a cada instante e analisar a totalidade de energia elétrica convertida em intervalos de horários para as estimativas de energia. As Horas de Sol Pleno (HSP) resumem essa ideia, já que refletem o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer constante e igual a 1kW/m^2 . Logo, a energia resultante é proporcional à energia disponibilizada pelo sol no local em questão.

Com base nos dados coletados, é possível calcular a potência do sistema fotovoltaico pela Equação 2:

$$P_{FV} = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}} \quad (2)$$

Em que:

P_{FV} = Potência Total do Painel Fotovoltaico (kWp);

E = Consumo médio anual diário ou fração, (kWh);

TD = Taxa de desempenho;

HSP_{MA} = Média das horas equivalentes de sol pleno no plano do painel fotovoltaico, (h).

A literatura recomenda que a taxa de desempenho esteja entre 70% e 85%. No estudo desenvolvido, foi fixado 70%.

Logo que é conhecida a potência necessária para atender à demanda da propriedade, são selecionados os equipamentos que farão a composição do sistema. Com base nas características técnicas desses equipamentos, é definido o número de módulos fotovoltaicos necessários, bem como os demais componentes do sistema fotovoltaico.

Após o cálculo da potência total do painel fotovoltaico, é calculado o número de módulos do sistema fotovoltaico por meio da Equação 3:

$$NM = \frac{(PFV \times 1000)}{PNMF} \quad (3)$$

Em que:

NM = Número de Módulos Fotovoltaicos;

PFV = Potência Total do Painel Fotovoltaico, (kWp);

$PNMF$ = Potência Nominal do Módulo Fotovoltaico, (Wp).

Por conseguinte, é realizada a escolha do inversor, que deverá levar em conta a potência do gerador fotovoltaico, a tecnologia e as características elétricas do módulo escolhido para integrar o gerador, tal como as características ambientais do local e a topologia de instalação escolhida.

Deste modo, calcula-se o fator de dimensionamento do inversor (FDI) por meio da Equação 4, que é representada pela relação entre a potência nominal CA do inversor e a potência de pico do gerador fotovoltaico.

$$FDI = \frac{P_{NCA}}{P_{FV}} \quad (4)$$

Em que:

FDI= Fator de Dimensionamento do Inversor;

P_{NCA} = Potência Nominal do Inversor (kWp);

P_{FV} = Potência Total do Painel Fotovoltaico (kWp).

Os valores de FDI ideais situam-se entre 0,75 a 0,85, não podendo ultrapassar o limite máximo de 1,05.

3.2 Dimensionamento Sistema Eólico

A produção de energia da turbina eólica está diretamente ligada à capacidade eólica local. É possível avaliar a produção e o rendimento da energia eólica por meio de estimativas dos recursos eólicos baseados nas características do vento e da curva de potência do aerogerador. Essas avaliações deverão ser realizadas de forma cuidadosa, pois impactarão diretamente nos custos de geração de energia e nos benefícios econômicos associados (NYMPHAS; TELIAT, 2024).

Existe uma variedade de métodos para avaliação de energia eólica, sendo o mais preciso o realizado por meio de medições meteorológicas no local proposto para instalação da turbina, porém essa abordagem é demorada e dispendiosa. Como alternativa, tem-se a avaliação com base em análises estatísticas. Assim sendo, a variação da velocidade do vento é descrita pela função de distribuição de probabilidade, sendo a distribuição de Weibull amplamente utilizada para esse fim (WAIS, 2017).

A função de densidade de probabilidade da distribuição Weibull pode ser expressa pela Equação 5:

$$f(u) = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (5)$$

Em que:

$f(u)$ = Probabilidade de observar a velocidade do vento;

k = Parâmetro de forma adimensional;

c = Parâmetro de escala em unidades de velocidade do vento.

O fator de forma controla a amplitude da distribuição, e o fator de escala é o parâmetro relacionado à velocidade média do vento. O fator de forma e a velocidade do vento são diretamente proporcionais e podem ser inconsistentes para baixas velocidades (DÍAZ; MOYA, 2024).

Os parâmetros k e c para cada localidade serão obtidos por meio do Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, que pode ser consultado na base de dados no *site* do CRESESB (CRESESB, 2015).

Uma propriedade relevante da distribuição Weibull que a torna interessante para aplicações eólicas, é que os parâmetros são estimados em uma determinada altura, sendo possível ajustá-los quando é preciso (AKDAĞ; DINLER, 2009).

A distribuição de Weibull indica as velocidades do vento mais frequentes no local escolhido para instalação. Sendo esse parâmetro utilizado para auxiliar na seleção do aerogerador, possibilitando a escolha de um modelo que possua uma curva de potência que se adeque de forma mais eficiente às velocidades do vento.

É fundamental compreender a relação entre a velocidade do vento incidente no aerogerador e a potência elétrica gerada por ele nessas condições. A curva de potência do aerogerador representa essa informação, por meio de um gráfico que indica para diferentes velocidades de vento a produção máxima de energia elétrica (PAVINATTO, 2005; NUNES, 2020).

A Figura 3 ilustra a curva de potência do aerogerador Modelo ELV-H6.4 - 5 kW.

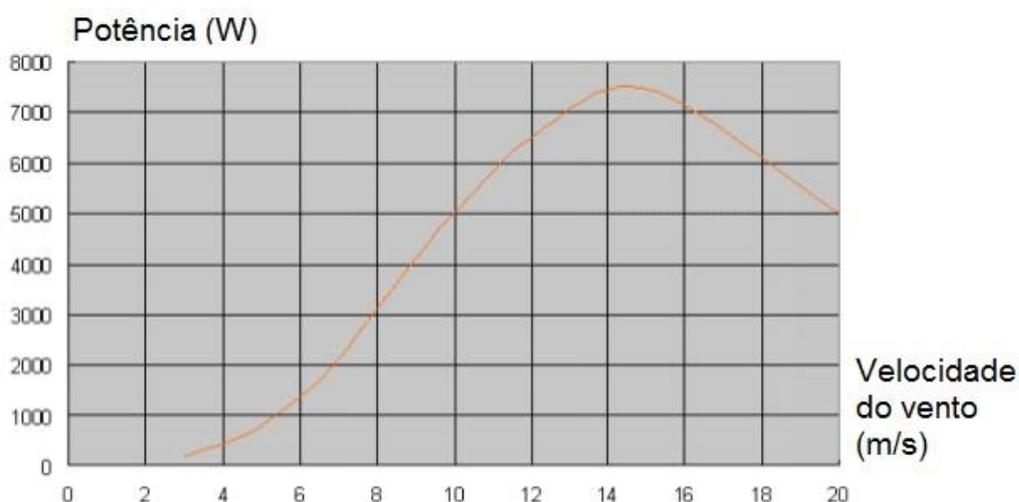


Figura 3 - Curva de potência, Modelo ELV-H6.4 - 5 kW.

Fonte: Eletrovento (2024).

A integração dos dados da modelagem da distribuição da velocidade do vento pela distribuição Weibull com a curva de potência do aerogerador fornecerá a estimativa do potencial de geração de energia elétrica do sistema eólico.

3.3 Dimensionamento Biodigestor

Para o desenvolvimento da pesquisa, optou-se pelo modelo de biodigestor tubular, tipo canadense. O dimensionamento foi baseado na metodologia descrita por Alves (2017).

Inicialmente, estima-se o volume do biodigestor, em função da carga diária e do tempo de retenção hidráulica necessários para o substrato selecionado. A carga diária varia em função do tipo de matéria orgânica utilizada e a quantidade de animais existentes na propriedade.

Após o levantamento destes dados, calcula-se o volume diário de dejetos por meio da Equação 6:

$$V_D = D_A \times N \quad (6)$$

Em que:

V_D = Volume de dejetos, (L/dia);

D_A = Quantidade de dejetos por animal, (L/dia);

N = Número de animais.

Em seguida, calcula-se a proporção de água necessária para a mistura, utilizando a Equação 7.

$$V_A = V_D \times R_A \quad (7)$$

Em que:

V_A = Volume de água, (L);

V_D = Volume de dejetos, (L/dia);

R_A = Fator de relação de dejetos e água.

Então, pela Equação 8 calcula-se o volume de carga diária produzida.

$$V_C = V_A + V_D \quad (8)$$

Em que:

V_C = Volume da carga diária, (m³);

V_A = Volume de água, (m³);

V_D = Volume de dejetos, (m³).

Finalmente, calcula-se o volume total da fossa do biodigestor, por meio da Equação 9.

$$V_{FB} = V_C \times TRH \quad (9)$$

Em que:

V_{FB} = Volume fossa do biodigestor, (m³);

V_C = Volume da carga diária, (m³);

THR = Tempo de retenção hidráulica.

O volume total da fossa do biodigestor é equivalente ao volume geométrico da fossa em forma de trapezoide, conforme Figura 4. Desta maneira, o volume geométrico é calculado pela Equação 10.

$$V_{FB} = \frac{(a+b)}{2} \times h \times L \quad (10)$$

Em que:

V_{FB} = Volume fossa do biodigestor, (m³);

a = Largura base superior, (m);

b = Largura base inferior, (m);

h = Altura útil da fossa, (m);

L = Comprimento longitudinal da fossa, (m).

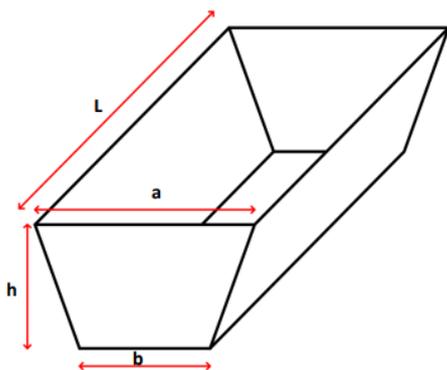


Figura 4 - Representação fossa biodigestor tubular.

Fonte: Alves (2017).

Pode-se observar que a Equação 10 apresenta 3 incógnitas referentes às medidas gerais da fossa do biodigestor. Alves (2017) recomenda que, para determinar tais valores, é preciso levar em conta as condições de funcionamento do sistema de biodigestão, por exemplo, a inclinação do talude e comprimento da superfície da fossa.

Alves (2017) adotou uma inclinação fixa de 110° para o talude, com o objetivo de simplificar a resolução das incógnitas e garantir a viabilidade prática do projeto. Nesta pesquisa, foi utilizada a mesma abordagem, tendo em vista que essa inclinação atende adequadamente às condições típicas de funcionamento do sistema.

A seção da fossa do biodigestor é formada por um trapézio cujas medidas são denominadas na Figura 5, as variáveis são: a (largura da base superior), b (largura da base inferior), h (altura). No referido trapézio, ao se isolar um dos cantos inclinados, forma-se um triângulo retângulo cujo ângulo adjacente à altura (h) foi denominado θ , e equivale a subtração do ângulo reto da inclinação do talude.

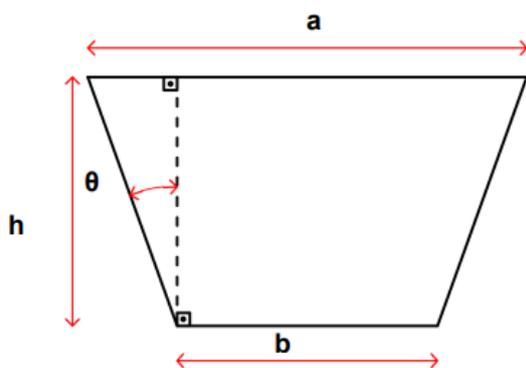


Figura 5 - Seção da fossa do biodigestor tubular.

Fonte: Alves (2017).

Isolando o triângulo retângulo demonstrado na Figura 5, é possível obter novas relações entre as dimensões a (largura da base superior), b (largura da base inferior) e h (altura). Considerando a inclinação adotada de 110° , é possível obter o valor de θ equivalente a 20° . A Equação 11 é a simplificação da função tangente, cuja igualdade é representada pela divisão do cateto oposto pelo cateto adjacente.

$$a=0,7279h+b \quad (11)$$

Para a determinar a relação entre a largura e o comprimento da superfície superior da fossa, Alves (2017) adotou a relação de 1:5, resultando na Equação 12:

$$L=5a \quad (12)$$

Fazendo as devidas substituições entre a Equação 11 e 12, obtém-se a Equação 13.

$$L=3,6395h+5b \quad (13)$$

Com base nas relações encontradas, fez-se a substituição das incógnitas na Equação 10. Após as simplificações necessárias, resultou na Equação 14.

$$b = \frac{-5,459h^2 + \sqrt{29,80h^2 - 4(5h \times (1,345h^3 - V_{FB}))}}{10h} \quad (14)$$

Para resolver a Equação 13, é necessário o volume da fossa, que é estabelecido durante o dimensionamento e o valor da altura (h), porém este deve ser definido arbitrariamente. Alves (2017) orienta utilizar para volumes até 100 m^3 , a altura de 1,5 m, volumes entre 100 e 500 m^3 , a altura de 2,5 m, volumes entre 500 e 2000 m^3 a altura de 3,5 m e volumes acima de 2000 m^3 , a altura de 4,5 m.

3.4 Avaliação da viabilidade econômica

A avaliação da viabilidade econômica dos sistemas foi realizada por meio do custo nivelado de eletricidade, em inglês *Levelized Cost of Energy* – LCOE. Essa

metodologia é amplamente aplicada para avaliar os custos de produção de eletricidade entre diferentes tipos de geração de energia. O LCOE é baseado na correspondência entre o valor presente das receitas e o valor presente dos custos ao longo da vida útil do projeto. Ele representa a tarifa de eletricidade necessária para recuperar todos os custos associados durante o período financeiro de vida útil da usina (ZAINALI *et al.*, 2023).

Para Nakabayashi (2014), o LCOE pode ser determinado de acordo com a Equação 15.

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Custos ao longo da vida útil do empreendimento}}{\text{Energia gerada ao longo da vida útil do empreendimento}} \quad (15)$$

No desenvolvimento da pesquisa, para o cálculo dos valores presentes dos custos envolvidos nos sistemas e da energia gerada ao longo da vida útil do empreendimento, foi utilizado o valor correspondente a taxa SELIC em 31/01/2024 de 11,15% ao ano como taxa de juros.

3.4.1 Sistema Energia Fotovoltaica

O dimensionamento do sistema solar fotovoltaico determina o número de painéis fotovoltaicos e inversores solares necessários para atender à demanda energética da propriedade. Para o cálculo, o programa tem acesso a um banco de dados que contém informações técnicas e o valor de aquisição dos equipamentos. Os painéis fotovoltaicos com potências variando de 155 a 595 W e inversores solares com potências de 1,5 a 125 kW. Outrossim, o usuário terá a opção da inserção de outros modelos de equipamentos para realizar o dimensionamento, permitindo maior personalização do projeto.

Os demais custos relacionados à aquisição dos equipamentos e serviços foram baseados na pesquisa de Ozanski (2021). Para compor o sistema, é necessária a instalação de uma *string box*, responsável por realizar a interface entre os módulos fotovoltaicos e os inversores. Como referência, adotou-se 4% do valor de custos dos painéis fotovoltaicos e inversores solares. Para a estrutura e os acessórios, foi estimado 22% do valor dos equipamentos (painéis fotovoltaicos + inversores solares + *string box*). A mão de obra corresponde a 30% do valor total de

todos os componentes (painéis fotovoltaicos + inversores solares + *string box*+ estrutura e acessórios).

Na maioria dos casos, os sistemas fotovoltaicos exigem apenas um grande reinvestimento, isto é, a substituição do inversor. A substituição do equipamento leva apenas algumas horas. Portanto, assume-se que o reinvestimento é realizado em um prazo predefinido. Para o estudo proposto, foi determinado que a substituição do inversor ocorrerá no ano 10 e 20 do investimento.

Os custos com Operação e Manutenção (O&M) também devem ser considerados para composição do LCOE. Estes referem-se às despesas necessárias para garantir o funcionamento eficiente do sistema ao longo de sua vida útil. Para o sistema fotovoltaico, são ponderados o monitoramento contínuo e a substituição de componentes quando necessário, além da limpeza dos módulos. Segundo Diniz (2017), tais custos representam cerca de 0,93% do valor investido inicialmente. Vale frisar que o referido valor foi adotado como parâmetro para esse estudo.

3.4.2 Sistema eólico

Com base na capacidade eólica do local, o dimensionamento do sistema eólico determinará a potência necessária dos aerogeradores para atender à demanda energética da propriedade. Assim como no sistema fotovoltaico, o programa oferecerá um banco de dados com informações técnicas e o valor de aquisição dos aerogeradores, as potências dos equipamentos variam de 1 kW a 5 kW. A determinação do aerogerador é realizada com base nas características do vento e na curva de potência de cada modelo, buscando uma solução eficiente e otimizada. O usuário também terá a possibilidade de adicionar novos modelos de equipamentos para esse sistema.

Em razão da dificuldade para obter os valores atualizados dos equipamentos diretamente no mercado, foram utilizados na composição do banco de dados os valores apresentados por Ferques (2017), ajustados anualmente para refletir as variações econômicas ao longo do tempo. Na Tabela 1, são exibidos os modelos de aerogeradores e seus valores atualizados anualmente de acordo com a taxa SELIC vigente.

Tabela 1- Custo aerogeradores

Modelo	Potência (W)	Valor (R\$)	
H3.1	1000	R\$	11.884,07
H3.8	2000	R\$	16.174,59
H4.6	3000	R\$	25.538,82
H6.4	5000	R\$	83.426,83

Fonte: Ferques, 2017. Adaptado pela autora.

Aquila *et al.* (2021) determinam que o valor presente da despesa de capital para os sistemas eólicos é composto pelos seguintes itens: aerogeradores (70%); construção civil (15%); ligação ao sistema elétrico (10%); projeto e administração (5%). Grande parte dos custos durante a vida útil do sistema eólico ocorre na fase de implantação. Já os custos de operação e manutenção são de aproximadamente 2% ao ano em relação ao investimento inicial. Tais parâmetros serão utilizados para a análise na pesquisa proposta.

3.4.3 Biodigestor Tubular

O custo do investimento inicial é calculado com base no volume da fossa. Na Tabela 2, são apresentadas as estimativas de valores para as diversas faixas de volumes de biodigestores. Como referência, foram utilizados os valores constatados por Alves (2017), corrigidos anualmente de acordo com a taxa SELIC vigente. Assim, o valor de implantação do sistema será expresso em reais por metro cúbico (R\$/m³) de volume.

A dificuldade de obtenção dos custos de implantação atualizados foi semelhantemente aos aerogeradores. Diversos profissionais foram consultados, porém não foi possível chegar a um consenso que refletisse a realidade atual.

Tabela 2 - Custo biodigestor (R\$/m³)

Volume em m ³	Fator Inv. - Valor por m ³
0 < VF < 99	R\$ 2695,92
100 < VF < 500	R\$ 779,48
501 < VF < 3.000	R\$ 292,11
3.001 < VF < 6.000	R\$ 203,75

6.001 < VF < 20.000	R\$ 168,69
20.001 < VF < 200.000	R\$ 138,45
200.000 ≤ VF	R\$ 124,82

Fonte: Alves, 2017. Adaptado pela autora.

Por meio de consultas com profissionais da área, estimou-se o valor para aquisição do grupo gerador R\$ 1.600,00 por kVA de potência.

Outros custos associados ao biodigestor envolvem a manutenção dos equipamentos, a limpeza interna do biodigestor e a troca de manta. Ademais, o sistema exige atenção constante para garantir um desempenho eficiente e prolongar a vida útil, necessitando de um processo de supervisão diária, que inclui o controle do funcionamento do grupo gerador, a limpeza regular das instalações e a verificação do estado geral do equipamento.

Cervi *et al.* (2010) estimam que anualmente as operações diárias do sistema consomem cerca de 200 horas. Deste modo, existirá um custo associado às horas de trabalho do funcionário responsável. Os autores calculam que todos os custos relacionados à manutenção, operação do biodigestor e do grupo gerador representam cerca de 11,08% ao ano do investimento inicial.

3.5 Desenvolvimento programa computacional

A ferramenta desenvolvida será ofertada na versão *on-line* por meio de um *website*, proporcionando maior facilidade de acesso aos diferentes usuários. Na tela inicial, será exibido ao usuário os campos para preenchimento das informações. Primeiro serão informados os dados relacionados à propriedade, como: o consumo de energia, tipo de ligação (monofásica, bifásica, trifásica) e valor do kWh.

Cada sistema requer dados específicos para seu dimensionamento. Nos sistemas fotovoltaicos, por exemplo, o usuário deverá informar a irradiância solar diária média mensal para as coordenadas geográficas do local onde deseja instalar o sistema. Para o sistema eólico, o usuário fornecerá os parâmetros eólicos da região, que incluem o fator de forma k e o fator de escala c . Por fim, para o dimensionamento dos biodigestores tubulares, serão necessárias informações sobre o tipo de criação de animais presente na propriedade.

O dimensionamento dos sistemas seguirá as metodologias detalhadas anteriormente. No item 4.1, abordou-se o dimensionamento do sistema fotovoltaico;

no item 4.2, o sistema eólico; e, no item 4.3, o dimensionamento do biodigestor tubular. Após inserir as informações solicitadas na tela inicial, o usuário poderá dar início ao processo de dimensionamento clicando em um botão determinado. Em seguida, o programa automaticamente executará as sequências de cálculos necessárias para obter o dimensionamento de cada sistema, proporcionando uma experiência prática e eficiente.

A ferramenta foi desenvolvida utilizando a linguagem de programação C# (lê-se “C Sharp”) com o intuito de dimensionar e estimar os custos financeiros de diferentes modelos de geração de energia, possibilitando a comparação econômica entre os sistemas. Na linguagem, foram utilizados conjuntos de códigos previamente escritos, denominados como bibliotecas, semelhantes aos usados pelas planilhas Excel para executar cálculos de funções como NPV (sigla em inglês para Valor Presente Líquido). A recepção dos dados de entrada para cada iteração dos cálculos foi feita por meio de uma *Application Programming Interface* – API hospedada no serviço de soluções em nuvem do Azure. No desenvolvimento da API, foi utilizado o ecossistema de desenvolvimento NET Core 8.0, que é a última versão estável publicada pela Microsoft nos dados de seu desenvolvimento até o momento.

Todos os dados são acessados por meio de uma página *web* disponível publicamente. A camada de exibição dos dados foi construída com a linguagem de programação *Javascript*, utilizando as bibliotecas *React* e *Ant Design*. Esta camada é responsável por disponibilizar o formulário de preenchimento dos dados que serão enviados para a API, e após o envio e processamento desses dados, o *site* oferece uma visualização organizada dos resultados individuais de cada modelo de geração de energia.

Os códigos-fonte não serão mostrados, pois o programa passará por um processo de registro, o que impossibilita sua disponibilização neste momento. Esse procedimento busca garantir a proteção e a conformidade do *software*, restringindo o acesso ao código até a conclusão do registro.

As rotinas previstas para programa computacional podem ser observadas no fluxograma da Figura 6.

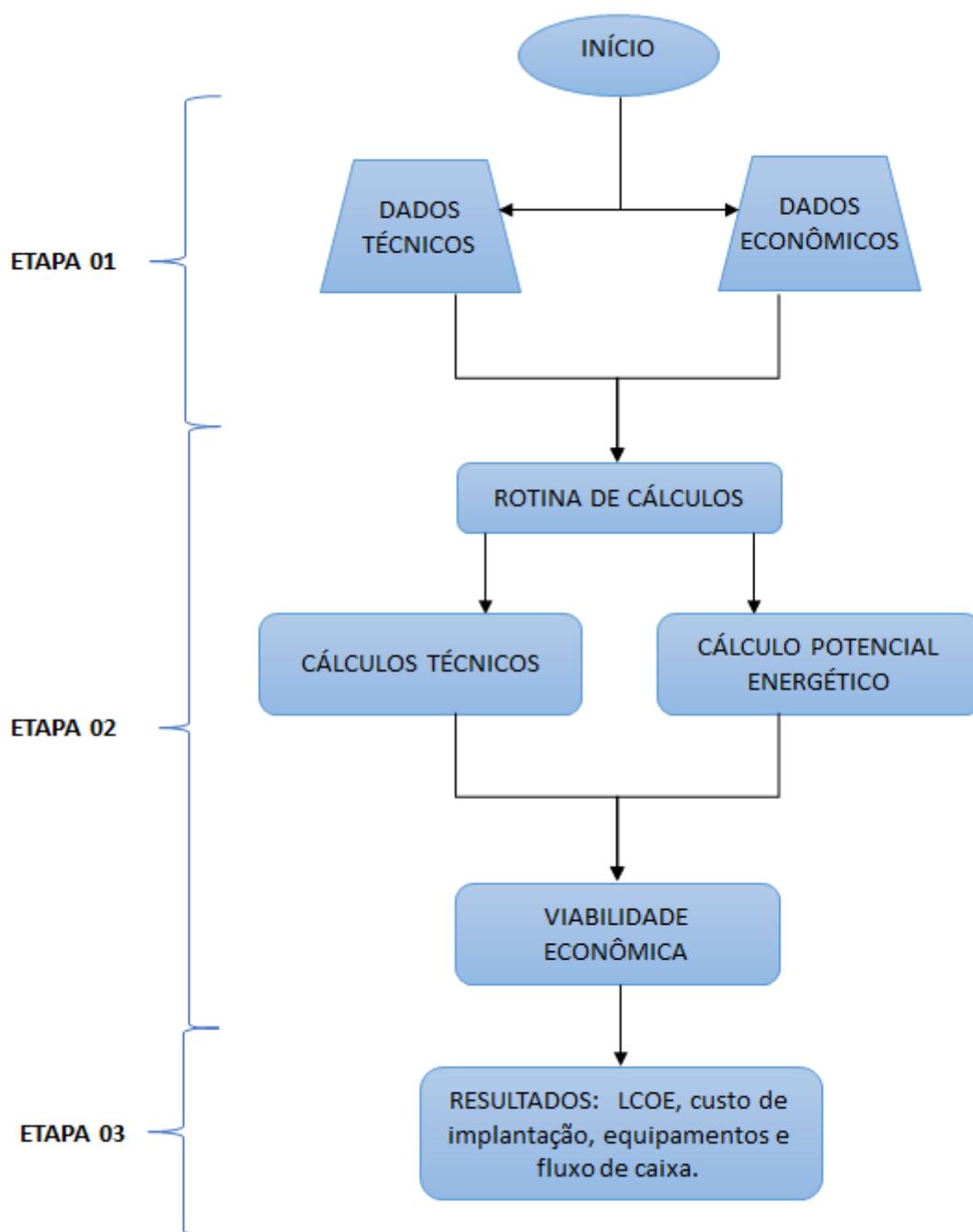


Figura 6 - Fluxograma do *software*.

Fonte: Autora (2024).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar a funcionalidade do programa desenvolvido, foram realizadas simulações para verificar sua eficácia e usabilidade. Na primeira simulação, foi adotado o consumo médio mensal de 400 kWh e a fase do padrão de entrada de energia da propriedade bifásico. A localidade escolhida foi o município de Cascavel, na região Oeste do estado do Paraná, latitude sul 24°57'21" e longitude oeste 53°27'19".

A produção animal selecionada para a propriedade foi a bovinocultura. Os parâmetros referentes ao recurso eólico região utilizados foram o fator de forma $k = 2,23$ e o fator de escala $c = 5,60$ (CRESCCEB, 2015). Os dados de irradiação solar média mensal estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Irradiação solar diária média mensal Cascavel/PR ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$)

Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
5,18	5,11	5,05	4,75	4,07	3,78	4,08	4,98	4,61	4,88	5,33	5,32

Fonte: Cresceb (2018).

Na página inicial, o programa salienta quatro seções para inserção de dados. Na seção de dados iniciais, tem-se:

- a) *kWh Médio Mensal*: inserir o consumo médio de energia por mês;
- b) *Tipo de Fase*: selecionar o tipo de instalação elétrica (monofásico, bifásico ou trifásico).

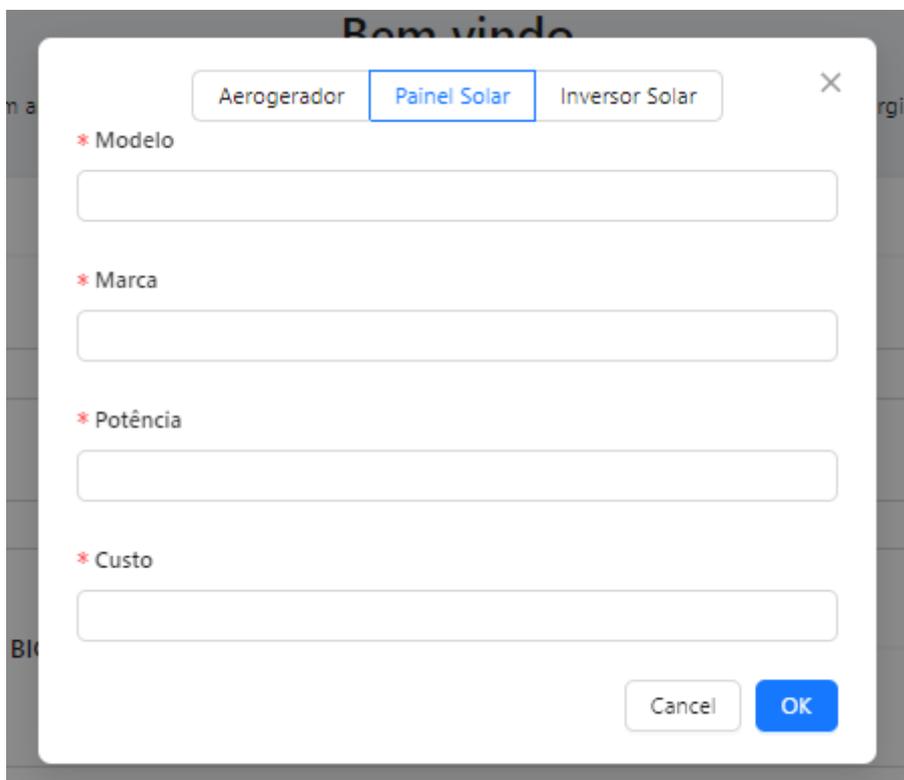
Na seção de dimensionamento do sistema eólico:

- c) *Parâmetro de forma adimensional (k)*: inserir o valor numérico correspondente para localidade escolhida, obtida por meio do *link* disponível;
- d) *Parâmetro de escala em unidades de velocidade do vento (c)*: inserir o valor numérico correspondente para localidade escolhida, obtida por meio do *link* disponível.

Na seção de dimensionamento do sistema fotovoltaico:

- e) *Irradiação Solar Média Mensal*: inserir os valores numéricos nos campos de irradiação solar para cada mês do ano, obtidos por meio do *link* disponível.

No botão "+Adicionar", no caso, é possível inserir outros modelos de equipamentos que não estejam contemplados no banco de dados. O usuário poderá selecionar na aba superior o equipamento que deseja adicionar para ser utilizado no dimensionamento, conforme Figura 7.



A imagem mostra uma janela de diálogo com o título "Bem vindo" e um ícone de fechamento (X) no canto superior direito. No topo, há uma barra de abas com três opções: "Aerogerador", "Painel Solar" (destacada com um contorno azul) e "Inversor Solar". Abaixo das abas, há quatro campos de entrada de texto, cada um precedido por um asterisco vermelho (*): "Modelo", "Marca", "Potência" e "Custo". Na base da janela, há dois botões: "Cancel" (botão padrão) e "OK" (botão azul).

Figura 7 – Inserção de equipamentos no programa

Fonte: Autora (2024).

Os *links* "Acesse aqui" direcionam o usuário para o *site* do CRESCEB, por meio do qual poderão obter os dados solicitados. Ao clicar no botão "Enviar", os dados inseridos são enviados para um servidor possibilitando realizar os cálculos de dimensionamento e análise econômica.

A Figura 8 exibe a página inicial do programa e os dados inseridos.

+ Adicionar ⊗ Limpar

Utilize os Botões ao lado para adicionar e remover Inversores Solares, Painéis Solares e Aero geradores. Os itens adicionados serão considerados no momento do cálculo e podem ser escolhidos pelo algoritmo

Bem vindo

Vamos iniciar com algumas perguntas, assim iremos verificar qual a forma mais eficaz de geração de energia para o seu caso.

DADOS INICIAIS

kWh Médio Mensal

Tipo de Fase

DIMENSIONAMENTO BIODIGESTOR

Animal

DIMENSIONAMENTO SISTEMA EÓLICO

Aeroicidência

Encontre os valores [aqui](#)

Parâmetro de forma adimensional (k)

Parâmetro de escala em unidades de velocidade do vento. (c)

DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Irradiação Solar Média Mensal (Plano Inclinado - Ângulo igual a latitude)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,57	5,27	5,29	4,93	4,21	3,93	4,14	5,10	4,70	5,08	5,43	5,58

[Acesse aqui](#)

Enviar

Figura 8 – Página inicial do programa – Dados 400 kWh

Fonte: Autora (2024).

Na tela seguinte, são mostrados os resultados dos dimensionamentos dos sistemas renováveis de geração de energia. Os resultados do dimensionamento e da análise econômica para cada sistema são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Primeiro, é ressaltada a melhor forma de geração de energia, indicando entre as três opções analisadas (eólica, fotovoltaica ou biogás) qual é a melhor

opção para situação específica, de acordo com os cálculos do sistema. No caso da simulação, o melhor resultado foi o sistema fotovoltaico.

Posteriormente, são destacadas três seções. A primeira refere-se ao sistema eólico, quando são realçados os valores de LCOE, custo de implantação e o modelo de aerogerador selecionado. A segunda seção trata do sistema fotovoltaico, evidenciando os valores de LCOE, custo de implantação, além da quantidade e modelos do painel solar e inversor solar. Por fim, a terceira seção mostra os dados do biodigestor que, além dos valores de LCOE e custo de implantação, indicam o número mínimo de animais que devem estar presentes na propriedade para atender à potência necessária ao sistema.

O sistema fotovoltaico teve o melhor custo/benefício, sendo o LCOE R\$ 0,44, com custo de implantação de R\$ 11.485,05. No dimensionamento, foram ponderados 8 painéis fotovoltaicos da marca CANADIAN, potência de 435 W, modelo CS6R 435T e inversor solar marca GROWATT, potência de 3 kW, modelo MIC3000TL-X. O sistema eólico mostrou um LCOE próximo de R\$ 0,58 e custo de implantação de R\$ 23.107,14. Para o dimensionamento, foi levado em conta o aerogerador modelo ELV-H3.8 com potência de 2.000W. Por outro lado, o biodigestor foi o que teve os piores resultados, com LCOE R\$2,17 e custo de implantação R\$ 46.783,12, sendo necessários 18 bovinos na propriedade para suprir a necessidade do substrato para alimentar o biodigestor.

Na sequência, tem-se o fluxo de caixa para cada um dos sistemas ao longo de 25 anos, conforme as Figuras 10 a 12. As tabelas mostram a expectativa de geração anual de energia com simulação de 4.389,13 kWh para o sistema fotovoltaico, 5.599,88 kWh para o sistema eólico e 4.968,86 kWh para o biodigestor. São mostrados também os custos com equipamentos, instalação do sistema e os custos de manutenção, sendo para o sistema fotovoltaico de R\$ 106,81, sistema eólico 462,14 e biodigestor R\$ 5.183,57 anualmente. Observa-se que, além dos custos de implantação serem os mais elevados, os custos de manutenção e operação do biodigestor também são superiores, contribuindo com um LCOE mais alto. Os valores obtidos no instante zero foram utilizados como base para o cálculo do

LCOE.

Resultados

Informações do sistema

Melhor forma de geração de energia:

Fotovoltaico

Eólico		
LCOE:	Custo Implantação:	Aerogerador:
0.5778673420528139	R\$ 23.107,14	ELV-H3.8
Fotovoltaico		
LCOE:	Custo Implantação:	Painel Solar:
0.4421777673413288	R\$ 11.485,05	8 painéis - CANADIAN/CS6R 435T
Inversor:		
GROWATT/MIC3000TL-X		
Biodigestor		
LCOE:	Custo Implantação:	Número mínimo de animais:
2.1734434066779977	R\$ 46.783,12	18 - Bovinos

Figura 9 – Simulação 01 - Resultados do dimensionamento
 Fonte: Autora (2024).

Tabela Eólico									
Ano	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Geração de Energia	46649,0470	5599,8814	5599,8814	5599,8814	5599,8814	5599,8814	5599,8814	5599,8814	5599,8814
Custo Implantação	R\$ 23.107,14	R\$ 0,00							
Manutenção	R\$ 3.849,82	R\$ 462,14							

Tabela Fotovoltaico									
Ano	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Geração de Energia	36563,0293158328	4389,1277976	4389,1277976	4389,1277976	4389,1277976	4389,1277976	4389,1277976	4389,1277976	4389,1277976
Custo Implantação	R\$ 15.277,58	R\$ 0,00							
Manutenção	R\$ 889,77	R\$ 106,81							

Tabela Biodigestor									
Ano	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Geração de Energia	41392,4425253072	4968,864	4968,864	4968,864	4968,864	4968,864	4968,864	4968,864	4968,864
Custo Implantação	R\$ 46.783,12	R\$ 0,00							
Manutenção	R\$ 43.181,02	R\$ 5.183,57							

Figura 10 – Simulação 01 - Fluxo de caixa – Parte 01 – Ano 0 ao Ano 08

Fonte:

Autora

(2024).

Tabela Eólico									
Ano	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Geração de Energia	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 462,14								
←									
Tabela Fotovoltaico									
Ano	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Geração de Energia	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976
Custo Implantação	R\$ 0,00	R\$ 2.219,00	R\$ 0,00						
Manutenção	R\$ 106,81								
←									
Tabela Biodigestor									
Ano	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Geração de Energia	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 5.183,57								
←									

Figura 11 – Simulação 01 - Fluxo de caixa – Parte 02 – Ano 09 ao Ano 17

Fonte:

Autora

(2024).

Tabela Eólico									
Ano	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Geração de Energia	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814	5599.8814
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 462,14								

Tabela Fotovoltaico									
Ano	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Geração de Energia	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976	4389.1277976
Custo Implantação	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 2.219,00	R\$ 0,00				
Manutenção	R\$ 106,81								

Tabela Biodigestor									
Ano	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Geração de Energia	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864	4968.864
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 5.183,57								

Figura 12 – Simulação 01 - Fluxo de caixa – Parte 03 – Ano 17 ao Ano 25

Fonte:

Autora

(2024).

Na segunda simulação, foi determinado um consumo médio mensal de 9000 kWh, e a fase do padrão de entrada de energia da propriedade trifásico. A localidade escolhida foi o município de Guarapuava, localizado na região centro-sul do estado do Paraná, latitude sul 25° 23' 37" e longitude oeste 51° 27' 22".

A produção animal definida foi a avicultura. Os parâmetros referentes ao recurso eólico da região utilizados foram o fator de forma $k = 2,09$ e o fator de escala $c = 5,30$ (CRESCCEB, 2015). Os dados de irradiação solar média mensal estão exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Irradiação solar diária média mensal Guarapuava/PR ($\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,18	5,11	5,05	4,75	4,07	3,78	4,08	4,98	4,61	4,88	5,33	5,32

Fonte: Cresceb (2018).

Os resultados indicaram novamente a energia solar como a melhor opção de investimento, com menos valores de LCOE de R\$ 0,37 e custo de implantação de R\$ 253.124,71. O sistema foi composto por 148 painéis fotovoltaicos da marca LUXEN SOLAR, potência de 595 W, modelo LNVH-595M e um inversor solar marca GROWATT, potência de 100 kW, modelo MAX100KTL3-XLV. O biodigestor, apesar de suas vantagens em gestão de resíduos, assim como na primeira simulação, apresentou-se menos eficiente, com LCOE R\$ 1,18 e custos mais elevados de implantação de R\$ 552.977,26. Na referida situação, com o intuito de garantir o abastecimento do substrato para o biodigestor, seriam necessárias 15.091 aves na propriedade. Diferentemente da primeira simulação, o LCOE do sistema eólico não ficou tão próximo ao fotovoltaico, apresentando um valor de R\$ 0,64 e custo de implantação de R\$ 508.357,14. Todavia, o fato de o custo nivelado da energia ser quase metade do biodigestor torna a energia eólica uma opção mais atraente em comparação a ele.

Na

Resultados

Informações do sistema

Melhor forma de geração de energia:

Fotovoltaico

Eólico

LCOE:

0,6396723538793737

Custo Implantação:

R\$ 508.357,14

Fotovoltaico

LCOE:

0,3729824018076855

Custo Implantação:

R\$ 253.124,71

Inversor:

GROWATT/MAX100KTL3-XLV

Biodigestor

LCOE:

1,1819161693610403

Custo Implantação:

R\$ 552.977,26

Figura 13, são salientados os resultados do dimensionamento e da análise econômica para cada sistema. Na sequência, os fluxos de caixa ao longo de 25 anos, de acordo com as Figuras 14 a 16.

Pode-se observar nas Figuras 14, 15 e 16 a expectativa de geração anual de energia para cada sistema, sendo: fotovoltaico 107.146,05kWh, eólico 111.294,08 kWh e biodigestor 108.003,27 kWh. Os custos de manutenção, anualmente, serão de R\$ 2.354,06 para o sistema fotovoltaico, R\$ 10.167,17 para o sistema eólico e R\$ 61.269,88 para o biodigestor. Em ambas simulações, tanto os custos de implantação quanto os custos de manutenção e operação para os biodigestores foram mais elevados, o que contribui com um custo nivelado de energia mais alto.

Os resultados obtidos destacam a eficiência econômica dos sistemas de energia solar e eólico em relação ao biodigestor, posicionando-os como opções de investimento mais vantajosas para atender às necessidades do setor agrícola.

Resultados

Informações do sistema

Melhor forma de geração de energia:

Fotovoltaico

Eólico		
LCOE:	Custo Implantação:	Aerogerador:
0,6396723538793737	R\$ 508.357,14	22 - ELV-H3,8
Fotovoltaico		
LCOE:	Custo Implantação:	Painel Solar:
0,3729824018076855	R\$ 253.124,71	148 painéis - LUXEN SOLAR/LNVH-595M
Inversor:		
GROWATT/MAX100KTL3-XLV		
Biodigestor		
LCOE:	Custo Implantação:	Número mínimo de animais:
1,1819161693610403	R\$ 552.977,26	15091 - Aves

Figura 13 – Simulação 02 - Resultados do dimensionamento – 9.000 kWh

Fonte:

Autora

(2024).

Tabela Eólico									
Ano	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Geração de Energia	927.120,163	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085
Custo Implantação	R\$ 508.357,14	R\$ 0,00							
Manutenção	R\$ 84.695,99	R\$ 10.167,14							

Tabela Fotovoltaico									
Ano	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Geração de Energia	892.565,531	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050
Custo Implantação	R\$ 313.301,06	R\$ 0,00							
Manutenção	R\$ 19.610,17	R\$ 2.354,06							

Tabela Biodigestor									
Ano	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8
Geração de Energia	899.706,471	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269
Custo Implantação	R\$ 552.977,26	R\$ 0,00							
Manutenção	R\$ 510.400,37	R\$ 61.269,88							

Figura 14 – Simulação 02 - Fluxo de caixa – Parte 01 – Ano 0 ao Ano 08

Fonte:

Autora

(2024).

Tabela Eólico									
Ano	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Geração de Energia	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 10.167,14								

Tabela Fotovoltaico									
Ano	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Geração de Energia	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050
Custo Implantação	R\$ 0,00	R\$ 35.209,00	R\$ 0,00						
Manutenção	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06

Tabela Biodigestor									
Ano	Ano 9	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17
Geração de Energia	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 61.269,88								

Figura 15 – Simulação 02 - Fluxo de caixa – Parte 02 – Ano 09 ao Ano 17

Fonte:

Autora

(2024).

Tabela Eólico									
Ano	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Geração de Energia	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085	111.294,085
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 10.167,14								

Tabela Fotovoltaico									
Ano	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Geração de Energia	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050	107.146,050
Custo Implantação	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 35.209,00	R\$ 0,00				
Manutenção	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06	R\$ 2.354,06

Tabela Biodigestor									
Ano	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20	Ano 21	Ano 22	Ano 23	Ano 24	Ano 25
Geração de Energia	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269	108.003,269
Custo Implantação	R\$ 0,00								
Manutenção	R\$ 61.269,88								

Figura 16 – Simulação 02 - Fluxo de caixa – Parte 03 – Ano 17 ao Ano 25

Fonte:

Autora

(2024).

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa atingiu o objetivo proposto de desenvolver uma ferramenta para auxiliar no dimensionamento técnico e na análise econômica comparativa entre os sistemas fotovoltaicos, eólicos e biodigestor. Oferecendo ao usuário uma análise simples, rápida e objetiva, uma vez que existe uma complexidade envolvida no processo, o que o torna demorado quando realizado manualmente.

Em ambas simulações o sistema solar fotovoltaico destacou-se entre os demais, apresentando valores de LCOE e custos de implantação mais baixos, confirmando sua viabilidade econômica. O sistema eólico mostrou-se competitivo, principalmente na primeira simulação, especialmente em relação ao biodigestor, que mostrou resultados negativos em relação aos custos e eficiência, refletindo a complexidade e os altos investimentos associados à sua operação.

É oportuno salientar que o programa é responsivo, permite avaliar de forma dinâmica qual sistema renovável é mais viável, dadas as condições que a propriedade possui. Mesmo que tenha realçado um desempenho satisfatório nas simulações de dimensionamento, é essencial enfatizar as limitações decorrentes da singularidade de cada situação a ser levada em conta antes do dimensionamento da área. Nesse sentido, apesar da utilidade do programa para simplificar os cálculos, a orientação de um profissional é indispensável antes de qualquer tomada de decisão baseada exclusivamente nos resultados fornecidos pelo programa de dimensionamento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULHAYAN, Sayed et al. Green blockchain technology for sustainable smart cities. **Green Blockchain Technology For Sustainable Smart Cities**, [S.L.], p. 237-262, 2023. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-95407-5.00014-1>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95407-5.00014-1>. Acesso em: 21 jun. 2024.

ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. (Eds.). **Manual de agregados para a construção civil**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2043>. Acesso em: 07 jan. 2021.

ALVES, A. M. **Desenvolvimento de um aplicativo computacional para dimensionamento técnico e econômico de biodigestores tipo tubular**. 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/3010/5/Anelisiane%20Maria%20Alves.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

AMARAL, B. M. **Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e Vazão Aplicados à Comercialização de Energia**. 2011. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=19308@1>. Acesso em: 05 jan. 2021.

ANEEL. **Geração Distribuída**. 2018. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/destaques-distribuicao?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=14461914&_101_type=content&_101_groupId=656827&_101_urlTitle=geracao-distribuida-introducao-1&inheritRedirect=true. Acesso em: 10 jan. 2021.

_____. **Resolução Normativa Nº 482, de 2012 da ANEEL**. p. 9, 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2021.

_____. **Resolução Normativa Nº 687 de 2015 da ANEEL**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Aneel, p. 24, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2021.

_____. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.** Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. ed – Brasília: ANEEL, 2016.

Disponível em:

<https://biblioteca.aneel.gov.br/Busca/Download?codigoArquivo=178813>. Acesso em: 24 abr. 2023.

AQUILA, G. *et al.* Perspectives under uncertainties and risk in wind farms investments based on Omega-LCOE approach: an analysis in São Paulo State, Brazil. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 141, p. 110805, maio 2021. Elsevier BV. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2021.110805>. Acesso em: 22 ago. 2024.

ARAÚJO, G. F. **Viabilidade técnico-econômica do biodigestor tubular e da energia solar fotovoltaica para geração distribuída na bovinocultura leiteira.**

2019. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura)

Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019. Disponível em:

https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6127/5/Gabriela_Araujo2022.pdf. Acesso em: 14 ago. 2024.

ASDRUBALI, F.; DESIDERI, U. (Org.). Chapter 7 - High Efficiency Plants and Building Integrated Renewable Energy Systems. **Handb. Energy Effic. Build.** [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2019. p. 441–595. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128128176000401>. Acesso em: 09 jan. 2021.

ASIF, M. Chapter 3 - Sustainable energy transition in the 21st century. In: ASIF, M. **Handbook of Energy and Environmental Security.** Amsterdam: Academic Press, 2022. p. 27-38. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824084-7.00023-0>. Acesso em: 05 out. 2024.

AKDAğ, S. A.; DINLER, A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 50, n. 7, p. 1761-1766, jul. 2009. Elsevier BV. Disponível em:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.03.020>. Acesso em: 12 jun. 2024.

BARBOSA, L. *et al.* Feed-in tariff contract schemes and regulatory uncertainty. **European Journal of Operational Research**, v. 287, n. 1, p. 331–347, 2020.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221720304070>. Acesso em: 05 ago. 2022.

BELYAKOV, N. Chapter Two - Evaluation of energy resources. In: BELYAKOV, N. **Sustainable Power Generation.** Amsterdam: Academic Press, 2019. Cap.2, p. 23-61. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00011-6>. Acesso em: 21 de abril 2022.

BENICIO, M. (org.). **A Virada Digital: smart cities e smart grids em uma perspectiva multidisciplinar**. Rio de Janeiro: Interciência, 2019. 206 p.

BISSANI, F. M. **Avaliação técnica e econômica em sistema de geração de energia elétrica com biogás, fotovoltaico e híbrido biogás e fotovoltaico, em aviários de frango de corte**. 2022. 71 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Cascavel, 2022. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6267/5/Fabiane%20_Bissani.2022.pdf. Acesso em: 14 ago. 2024.

BONTURI, G. de L.; VAN DIJK, M. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. **Revista Ciências do Ambiente On-Line**, Campinas, v. 2, n. 8, p. 88-95, out. 2012. Disponível em: <http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/download/338/266>. Acesso em: 11 jan. 2021.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia e inovações. **Secas estão se tornando mais frequentes e intensas no Brasil, aponta Cemaden: 2024 já registra a seca mais extensiva desde 1950; situação pode se agravar nos próximos 3 meses na região Centro-Norte do Brasil**. [S. l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 04 de setembro de 2024. Atualizado em 04 de setembro de 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/noticias/2024/09/secas-estao-se-tornando-mais-frequentes-e-intensas-no-brasil-aponta-cemaden>. Acesso em: 14 out. 2024.

BRUNING, J. **Energia Fotovoltaica: Análise Técnica e Econômica de Sistema Autônomo para Irrigação**. 2022. 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/24637/TES_PPGEA_2022_BRUNING_JHOSEFE.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 13 mar. 2023.

BUCHHOLZ, W. *et al.* Subsidizing renewables as part of taking leadership in international climate policy: The German case. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 129, p. 765–773, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519301272>. Acesso em: 22 ago. 2022.

CALZA, L. F. *et al.* Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 35, p. 990–997, 2015. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162015000600990&lang=pt. Acesso em: 31 jan. 2023.

CARVALHO, D. B. **Impacto econômico de sistemas híbridos renováveis no agr face à antecipação e atraso do empreendimento**. 2018. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI Faculdade de Engenharia Elétrica, Itajubá, 2018. Disponível em: https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1831/dissertacao_2018142.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 16 out. 2022.

CAVALER, V. **Viabilidade econômica da utilização de biogás produzido em aterros sanitários para a geração de energia elétrica**. 2022. 81 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6043/6/Viviane_Cavaler2022.pdf. Acesso em: 19 set. 2022.

CERVI, Ricardo G. *et al.* Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 831-844, out. 2010. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162010000500006>. Acesso em: 06 set. 2024.

CRESESB. **Potencial Eólico - Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2015. Disponível em: https://cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico. Acesso em: 25 jul. 2024.

CRESESB. **Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica**. 2008a. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=231. Acesso em: 05 jan. 2021.

CRESESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica**. 2008b. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&catid=4#:~:text=Uma%20das%20poss%C3%ADveis%20formas%20de,a%20radia%C3%A7%C3%A3o%20solar%20em%20eletricidade. Acesso em: 09 jan. 2021.

CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0**. 2018c. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata>. Acesso em: 08 jan. 2021.

DEGANUTTI, R. *et al.* Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: Encontro de Energia no Meio Rural - Eficientização Energética da Fazenda, 4., 2002, Campinas. **Proceedings on-line...** Campinas: FAAC, 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/031.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2021.

DÍAZ, A. V.; MOYA, I. H. Urban wind energy with resilience approach for sustainable cities in tropical regions: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 199, p. 114525, jul. 2024. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2024.114525>. Acesso em: 13 jun. 2024.

DINCER, I.; ABU-RAYASH, A. **Chapter 6 - Sustainability modeling**. In: DINCER, I.; ABU-RAYASH, A. (Ed.). *Energy Sustainability*. [s.l.] Academic Press, 2020. p. 119–164. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819556-7.00006-1>. Acesso em: 24 out. 2022.

DINIZ, J. Metodologia para análise de investimento em sistemas fotovoltaicos considerando parâmetros de incerteza e métricas de risco. 2017. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1385M.PDF>. Acesso em: 22 ago. 2024.

DUMITRAN, Gabriela Elena *et al.* Reducing greenhouse gas emissions in Romanian agriculture using renewable energy sources. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 467, p. 142918, ago. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142918>.

DUTRA, R. **Energia Eólica: princípios e tecnologias**. Rio de Janeiro: Centro de Referência Para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito, 2008. 58 p. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 05 jan. 2021.

EFTEKHARI, H. *et al.* Aerodynamic Performance of Vertical and Horizontal Axis Wind Turbines: **A Comparison Review**. **Indonesian Journal Of Science And Technology**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 65-88, 16 dez. 2021. Universitas Pendidikan Indonesia (UPI). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17509/ijost.v7i1.43161>. Acesso em: 11 jun. 2024.

EGG - Erneuerbare Energie Gesetz. **Bundesministerium Der Justiz Und Für Verbraucherschutz**, Bonn, 2016. Disponível em: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0&toctf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_0&bk=bgbl&start=%2F%2F%5B%40node_id%3D%27943664%27%5D&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1&sinst=88E576B4. Acesso em: 22 ago. 2022.

ELETROVENTO. **Aerogerador Modelo ELV-H6.4 – 5 kW**. 2024. Disponível em: <https://www.eletrovento.com.br/site/produto/modelo-elv-h6-4-5-kw/10/>. Acesso em: 25 jul. 2024.

EPA – United States Environmental Protection Agency (Estados Unidos). **How does anaerobic digestion work?** 2011. Disponível em: <https://www.epa.gov/agstar/how-does-anaerobic-digestion-work#main-content>. Acesso em: 07 jan. 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2022: Ano base 2021**/Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf. Acesso em: 08 ago.2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). **Balço Energético Nacional 2024: Ano base 2023**/Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 14 ago.2024.

FERQUES, R. G. **Sistema computacional para dimensionamento de sistemas de geração de energia eólica utilizando redes neurais artificiais**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017. Disponível em: <http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/2970/5/Rafael%20Gil%20Ferques.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2021.

FERRARI, Joseph. Chapter 1 - Introduction to electric utilities and how they plan for the future. In: FERRARI, Joseph (Org.). **Electric Utility Resource Planning** [S.l.]: Elsevier, 2021. p. 1–38. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128198735000010>. Acesso em: 29 mar. 2023.

FILHO, A. J. T. de S. **Análise de viabilidade do sistema híbrido biogás-solar na geração de energia e seus impactos nas emissões de gases**. 2019. 122 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, Rio Verde, 2019. Disponível em: https://sistemas.ifgoiano.edu.br/sgcursos/uploads/anexos_14/2021-08-19-03-32-23Disserta%C3%A7%C3%A3o_Aroldo_Filho_Reposit%C3%B3rio.pdf. Acesso em: 07 ago. 2022.

GASPAR, R. M. B. L. **Utilização de biodigestores em pequenas e médias propriedades rurais com ênfase na agregação de valor: um estudo de caso na região de Toledo-PR**. 2003. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85585/224646.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 jan. 2021.

GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. **Photovoltaic Solar Energy Generation**. Berlin: Springer-Verlag, 2005. 237 p. Disponível em: <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/455/Springer-Verlag%20Photovoltaic%20Solar%20Energy%20Generation.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2021.

GONÇALVES, W. J. Geração Distribuída: conhecimento das normativas regulatórias. **ARGAMASSA - Revista das Engenharias, Arquitetura e Urbanismo, Geografia, Gestão, Decisão e Memória**. v. 1, n. 1, p. 34–66, abril, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/argamassa/article/view/5982/4420>. Acesso em: 21 abr. 2022.

GRANDI, D. J. de. **Comparativo técnico-econômico entre sistemas de geração eólica, fotovoltaica e híbrida eólica fotovoltaica conectados à rede em propriedade rural**. 2022. 50 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Cascavel, 2022. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6197/5/Davi_Grandi2022.pdf. Acesso em: 14 ago. 2024.

GUIMARÃES, L. do S. O Custo Nivelado da Eletricidade e Seu Impacto na Transição Energética. Caderno de Opinião. **FGV Energia**, 2019. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/coluna_opinioao_-_transicao_energetica.pdf. Acesso em: 03 mar. 2023.

IEA. **Estado da Política Energética 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/state-of-energy-policy-2024>. Acesso em: 15 out. 2024.

IRENA. **Renewable power generation costs in 2023**. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

ISLAM, M; HASANUZZAMAN, M. Chapter 1 - Introduction to energy and sustainable development. In: HASANUZZAMAN, M D; RAHIM, Nasrudin Abd (Org.). *Energy Sustain. Dev.* [S.l.]: **Academic Press**, 2020. p. 1–18. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128146453000018>. Acesso em: 08 jan. 2021.

JUNGINGER, M. *et al.* Chapter 6 - Onshore wind energy. In: JUNGINGER, M.; LOUWEN, A. B T - **Technological Learning in the Transition to a Low-Carbon Energy System** (Org.). [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 87–102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128187623000066>. Acesso em: 31 jan. 2023.

KARLSSON, T. *et al.* **Manual Básico de Biogás**. Lajeado: Univates, 2014. 70 p. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf. Acesso em: 07 jan. 2021.

KHALIGH, A.; ONAR, O. Chapter 23 - Energy Sources. In: RASHID, Muhammad H (Org.). **Power Electron. Handb.** (Fourth Ed. Fourth Edition ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2018. p. 725–765. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128114070000258>. Acesso em: 11 jan. 2021.

LACCHINI, C. **Análise econômica de sistemas fotovoltaicos residenciais no contexto brasileiro, com foco nos indicadores financeiros e nas Tarifas locais de energia elétrica.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/181239>. Acesso em: 21 jan. 2021.

LAWSON, A. J. **Net Metering: In Brief.** Congressional Research Service, novembro, 2019. Disponível em: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R46010>. Acesso em: 07 set. 2022.

LIMA, D. M. de. **Análise da estabilidade elástica, análise dinâmica e controle de vibração em torres tubulares de aço para aerogeradores de eixo horizontal.** 2018. 319 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 2018. Disponível em: <https://attena.ufpe.br/bitstream/123456789/31108/1/TESE%20Douglas%20Mateus%20de%20Lima.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2023.

MARQUEZINO, G. M. S. **Uma nova Geografia da Energia no Brasil: as fontes renováveis alternativas para a geração de energia elétrica e os incentivos governamentais para expansão do setor.** 2017. 228 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

MENEZES, A. E. da S. **Aproveitamento eólico para uma vila de pescadores.** 2012. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005275.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2021.

MENEZES, L. G. Campo sustentável: a importância das energias renováveis em propriedades rurais. **SEBRAE/RS**, 2017. Disponível em: <https://sebraers.com.br/energia/importancia-das-energias-renovaveis-em-propriedades-rurais/>. Acesso em: 09 jan. 2021.

MIRMOHAMADSADEGHI, S. *et al.* Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. **Bioresource Technology Reports**, v. 7, p. 100202, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589014X19300921>. Acesso em: 31 jan. 2023.

MOLAEI, M. J., *et al.* “Van Der Waals Heterostructures in Ultrathin 2D Solar Cells: State-of-the-Art Review”. **Materials Science and Engineering: B**, vol. 285, novembro de 2022, p. 115936. DOI.org (Crossref), Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.115936>. Acesso em: 11 jun. 2024.

NAKABAYASHI, R. K. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: condições atuais e perspectivas futuras**. 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Curso de Pós-em Engenharia. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/publico/Dissertacao_Renno_vfinal.pdf. Acesso em: 06 jan. 2021.

N.C. Clean Energy Technology Center at the N.C. State University. **Database of State Incentives for Renewables & Efficiency**. 2022. Disponível em: <https://programs.dsireusa.org/system/program>. Acesso em: 12 set. 2022.

NYMPHAS, E. F.; TELIAT, R. Evaluation of the performance of Five Distribution Functions for Estimating Weibull Parameters for wind energy potential in Nigeria. **Scientific African**, v. 23, p. e02037–e02037, 1 mar. 2024. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e02037>. Acesso em: 12 jun. 2024.

NINO, L. B. Multifuncionalidade e Desenvolvimento Rural: o caso do complexo eólico campos neutrais. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIA DO AGRONEGÓCIO. Porto Alegre: Cepan, 2018. p. 550-559. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cienagro/wp-content/uploads/2018/10/Multifuncionalidade-e-Desenvolvimento-Rural-O-caso-do-Complexo-E%C3%B3lico-Campos-Neutrais.-Let%C3%ADcia-Bauer-nino.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2020.

NOOR, T. *et al.* Chapter 14 - Types, sources and management of urban wastes. In: VERMA, P. *et al.* (Ed.). **Urban Ecology**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 239–263. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820730-7.00014-8>. Acesso em: 31 jan. 2023.

NUNES, J. P. C. e S. **Energia Eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima costa do Rio Grande do Norte**. 2020. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-26012015-141237/publico/Dissertacao_Renno_vfinal.pdf. Acesso em: 13 jun. 2024.

OVELHA, R. M. R. V. de. **Projeto, Dimensionamento e Instalação de Solução Fotovoltaica numa moradia offgrid**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017. Disponível em: https://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/31733/1/ulfc124090_tm_Rui_Ovelha.pdf. Acesso em: 09 jan. 2021.

OTTONELLI, J. P. *et al.* Retorno de investimento de usina fotovoltaica conectada à rede de distribuição: estudo de caso. **Revista Valore**, Volta Redonda, v. 5, e-5042, 2020. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/451/492>. Acesso em: 25 out. 2022.

OKIOGA, I. T. *et al.* Renewable energy policy formulation for electricity generation in the United States. **Energy Strategy Reviews**, v. 22, p. 365–384, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X18300762>. Acesso em: 12 set. 2022.

OZANSKI, A. C. **Viabilidade de implantação de fazendas fotovoltaicas rurais com relação a produção agropecuária**. 2021. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel - PR. Disponível em: https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/5381/5/Adrielle_Ozanski2021.pdf. Acesso em: 06 set. 2024.

PAVINATTO, E. F. **Ferramenta para Auxílio à Análise de Viabilidade Técnica da Conexão de Parques Eólicos à Rede Elétrica**. 2005. 165 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2005040102.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2024.

PICOLO, A. P. *et al.* Uma abordagem sobre a energia eólica como alternativa de ensino de tópicos de física clássica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 01-13, dez. 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v36n4/v36n4a07.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2021.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 08 jan. 2021.

PUCCINI, E. C. **Matemática Financeira e Análise de Investimentos**. 3. ed. rev. atual. – Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração / UFSC; [Brasília]: CAPES: UAB, 2021. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/643232/2/Matemática%20Financeira%20e%20Análise%20de%20Investimentos.pdf>. Acesso em: 25 out. 2022.

PVSYST. **Photovoltaic Software**. 2023. Disponível em: <https://www.pvsyst.com/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

RASOTO, A. *et al.* **Gestão Financeira: enfoque em inovação**. 1. ed. Curitiba: Aymar, 2012. v. 6. 140p. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/bitstream/1/2062/1/gestaofinanceirainovacao.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2021.

REHMAN, Anis Ur *et al.* Smart agriculture technology: an integrated framework of renewable energy resources, iot-based energy management, and precision robotics. **Cleaner Energy Systems**, [S.L.], v. 9, p. 100132, dez. 2024. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cles.2024.100132>. Acesso em: 28 ago. 2024.

REN 21. **Renewables 2022**: Global Status Report Collection: Global Overview. Paris: REN21 Secretariat, 2022. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf. Acesso em: 08 ago. 2021.

REN 21. **Renewables 2024**: Global Status Report Collection: Global Overview. Paris: REN21 Secretariat, 2024a. Disponível em: https://www.ren21.net/gsr2024_GO_report/. Acesso em: 15 out. 2024.

REN 21. **Renewables 2024**: Global Status Report Collection: Energy Supply. Paris: REN21 Secretariat, 2024b. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2024_Supply.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

RETSCREEN. **Software de Gestão de Energia Limpa RETScreen**®. 2023. Disponível em: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>. Acesso em: 10 abr. 2023.

RODRIGUES, M. V. S *et al.* Análise da eficiência na produção de energia eólica nos principais estados brasileiros produtores, por meio da aplicação de análise por envoltória de dados. **Revista Tecnologia**, [S. l.], v. 36, n. 1/2, p. 18–33, 2016. Disponível em: 10.5020/23180730.2015.V36.1/2.18-33. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/5447>. Acesso em: 11 jun. 2024.

SAMPAIO, J. A. *et al.* **Silício Grau Solar – Uma Revisão das Tecnologias de Produção**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2019. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2239>. Acesso em: 07 ago. 2022.

SANTOS, D. F. dos *et al.* Biodigestores como alternativa à sustentabilidade ambiental no campo brasileiro: um balanço bibliográfico acerca dos modelos indiano, chinês e batelada. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 15, p. 35-39, 21 dez. 2017. Universidade Federal de Alagoas. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/3769/2986>. Acesso em: 10 jan. 2021.

SAM. **System Advisor Model**. 2023. Disponível em: <https://sam.nrel.gov/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SEADI, T. A. *et al.* **Biogas Handbook**. Esbjerg: University Of Southern Denmark Esbjerg, 2008. 126 p. Disponível em: <https://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2021.

SILVA, A. A. C. *et al.* Análise das atuais políticas de incentivo à mini e microgeração distribuída e da certificação de aerogeradores de pequeno porte no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p.52217-52235, jul. 2020. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/ojs/index.php/BRJD/article/view/14027/11730>. Acesso em: 05 ago. 2022.

SILVA, H. M. da; CARNEIRO, A. C. Análise da viabilidade econômico-financeira de um projeto de gerador solar fotovoltaico (on- Grid) em uma residência no interior de Minas Gerais. **Scientia Generalis** 2675-2999, v. 3, n. 1, p. 250–270, 2022. Disponível em: <https://scientiageneralis.com.br/index.php/SG/article/view/397/323>. Acesso em: 22 out. 2022.

SILVA, J. D. da; YADA, M. M. Viabilidade econômica de implantação de biodigestores. **SIMTEC - Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga**, v. 5, n. 1, p. 448-459, 22 dez. 2019. Disponível em: <https://simtec.fatectq.edu.br/index.php/simtec/article/view/420/274>. Acesso em: 31 jan. 2023.

SMITH, K. M. *et al.* Regulating net metering in the United States: A landscape overview of states' net metering policies and outcomes. **The Electricity Journal**, v. 34, n. 2, p. 106901, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1040619020301937>>. Acesso em: 31 jan. 2023.

SOARES, M. F. V. **Análise comparativa de políticas públicas e desenvolvimento regulatório da energia solar fotovoltaica no Brasil e na Alemanha**. 2019. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/32898/1/1625M.PDF.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2022.

TAZI, N. *et al.* Assessment of the levelized cost of energy using a stochastic model. **Energy**, v. 238, p. 121776, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221020247>. Acesso em: 29 mar. 2023.

TORRES, A. *et al.* Fundamentos de implantação de biodigestores em propriedades rurais. **Educação Ambiental em Ação**. Educação Ambiental em Ação, Novo Hamburgo, v IX, n. 40, jul. 2012. Disponível em: <http://www.revistaeea.org/artigo.php?idartigo=1248>. Acesso em: 10 jan. 2021.

TYAGI, V. V. *et al.* Progress in solar PV technology: Research and achievement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 20, p. 443–461, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.028>. Acesso em: 27 de jul. 2019.

VIANNA, R. de M. I. **Matemática financeira**. Salvador: UFBA, Faculdade de Ciências Contábeis; Superintendência de Educação a Distância, 2018. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/430116/2/eBook_Matemática_Financiera_UFBA.pdf. Acesso em: 24 out. 2022.

VILAR, R. de A. A. *et al.* Avaliação do Impacto de Secas Severas no Nordeste Brasileiro na Geração de Energia Elétrica Através do Modelo Newave: Projeção das Energias Afluentes e Armazenadas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 89-98, mar. 2020. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862020000100089&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 08 jan. 2021.

VIVENZA, S. D.; GOMES, M. F. Energia, geração distribuída e o princípio da segurança jurídica. **Research, Society and Development**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. e2111123417. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i1.23417>. Acesso em: 22 ago. 2022.

WAIS, P. A review of Weibull functions in wind sector. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 70, p. 1099-1107, abr. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.014>. Acesso em: 12 jun. 2024.

WINDPRO. **EMD International A/S. 2023**. Disponível em: <https://www.emd.dk/windpro/>. Acesso em: 10 abr. 2023.

WUKOVITS, W.; SCHNITZHOFER, W. FUELS – HYDROGEN PRODUCTION | Biomass: Fermentation. In: GARCHE, J. (Ed.). **Encyclopedia of Electrochemical Power Sources**. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 268–275. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00312-9>. Acesso em: 31 jan. 2023.

YAHYAOU, I. Chapter 1 - Renewable Energies and Irrigation. In: YAHYAOU, Imene (Org.). **Specif. Photovolt. Pump. Syst. Agric.** [S.l.]: Elsevier, 2017. p. 1–14. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128120392000016>. Acesso em: 10 jan. 2021.

YU-ZHUO, Z. *et al.* The development of the renewable energy power industry under feed-in tariff and renewable portfolio standard: A case study of China's wind power industry. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v. 168, p. 1262–1276, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617320929>. Acesso em: 05 ago. 2022.

ZAINALI, S. *et al.* LCOE distribution of PV for single-family dwellings in Sweden. **Energy Reports**, [S.L.], v. 10, p. 1951-1967, nov. 2023. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egyr.2023.08.042>. Acesso em: 10 jun. 2024.

ZANCHETTIN, M. G. **Análise da inserção de geração eólica com aerogeradores de indução**. 2012. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Foz do Iguaçu, 2012. Disponível em: http://tede.unioeste.br/bitstream/tede/1087/1/Marcos_Zanchettin_2012.pdf. Acesso em: 05 jan. 2021.

ANEXOS

ANEXO I



O QR Code acima fornece acesso direto à ferramenta de dimensionamento e análise econômica dos sistemas de geração de energia renovável.