

**UNIOESTE – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON - PR
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CCA
PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM DESENVOLVIMENTO RURAL
SUSTENTÁVEL**

DANILO HUNGARO MICHELETTI

**A CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O
DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PR

2023

DANILO HUNGARO MICHELETTI

**A CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O
DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Desenvolvimento Rural Sustentável.

Linha de pesquisa: Inovações Sócio Tecnológicas e Ação Extensionista.

Orientador: Prof. Dr. Arlindo Fabrício Corrêa

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PR

2023

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

Hungaro Micheletti, Danilo

A CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL / Danilo Hungaro Micheletti; orientador Arlindo Fabrício Corrêia. -- Marechal Cândido Rondon, 2023.

110 p.

Tese (Doutorado Campus de Marechal Cândido Rondon) -- Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável, 2023.

1. Energia na agricultura. 2. desenvolvimento sustentável. 3. energias renováveis. 4. geração distribuída. I. Corrêia, Arlindo Fabrício, orient. II. Título.



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46
Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>
Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000
Marechal Cândido Rondon - PR.



DANILO HUNGARO MICHELETTI

**“A CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA PARA O
DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural Sustentável – Mestrado e Doutorado, em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de DOUTOR em Desenvolvimento Rural Sustentável, área de concentração, Desenvolvimento Rural Sustentável, linha de pesquisa, Inovações Sócio tecnológicas e Ação Extensionista, APROVADO pela seguinte banca examinadora:



Arlindo Fabrício Corrêia - Orientador
Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)



Armin Feiden - Membro
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)



Irene Carniatto de Oliveira - Membro
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)



Nardel Luiz Soares da Silva - Membro
Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE)



Maurício Guy de Andrade - Membro
Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Marechal Cândido Rondon, PR, 14 de abril de 2023.

Dedico este estudo à busca constante
de um mundo mais justo e sustentável.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Mãe Natureza por permitir minha existência e por me proporcionar uma vida de experiências e evolução.

Agradeço à Universidade Estadual do Oeste do Paraná por dispor de ensino superior gratuito e de qualidade a mim e a tantas pessoas.

Agradeço ao professor orientador Dr. Arlindo Fabrício Corrêia pela dedicação e pela paciência com o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos professores da banca de qualificação e de defesa por se disporem a corrigir e avaliar a pesquisa por mim desenvolvida.

Agradeço aos professores da Unioeste por terem se dedicado a ensinar nas disciplinas que cursei durante o Doutorado.

Agradeço aos pesquisados por aceitar conceder informações e dados para o estudo.

Agradeço ao meu esposo que me incentivou a cursar essa Pós-Graduação.

Agradeço ao meu parceiro de trabalho Agnaldo, por compartilhar experiências na área de energias renováveis.

Agradeço à família e amigos que deram suporte à minha jornada.

RESUMO

MICHELETTI, Danilo Hungaro. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – 2023. A contribuição da energia solar fotovoltaica para o Desenvolvimento Rural Sustentável. Orientador: Arlindo Fabrício Corrêa.

A aplicação de novas tecnologias energéticas contribui para que as atividades agrícolas tenham melhora na produtividade, no rendimento econômico e na qualidade de vida. A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia capaz de fomentar o desenvolvimento rural sustentável, pois promove o acesso à energia limpa e proporciona desenvolvimento econômico, ambiental e social. O presente trabalho teve como objetivo principal analisar a contribuição da utilização de sistemas geradores por fonte solar fotovoltaica no desenvolvimento sustentável de imóveis rurais do município de Iporã-PR. A pesquisa foi disposta como um estudo de caso que analisou a viabilidade econômica, ambiental e social, com base em dados reais de produtividade coletados entre os anos de 2021 e 2022, em três sistemas fotovoltaicos de Geração Distribuída de energia em propriedades rurais do município condizentes com níveis distintos de potência instalada. A metodologia da pesquisa consistiu em analisar a aplicação da energia fotovoltaica em atividades rurais corroborando com consultas bibliográficas e contrastando com informações disponibilizadas por entidades governamentais. Como resultados, foram dispostas informações referentes à energia solar em Geração Distribuída no Brasil, destacando as vantagens e dificuldades enfrentadas da energia fotovoltaica no setor rural. O estudo de caso teve como resultado um comparativo de viabilidade econômica nos indicadores TIR, *Payback* Descontado, VPL e LCOE, de viabilidade ambiental com indicador de mitigação anual em toneladas de CO₂ equivalente e de número de árvores adultas em reflorestamento e de viabilidade social com a economia mensal média com valores aproximados de aquisição de bens e serviços para melhoria social. Concluiu-se que a redução com custos de energia elétrica favorece a gradual substituição dos equipamentos movidos a combustíveis não renováveis e que a redução dos custos operacionais também contribui com o investimento em melhores condições de trabalho ou outras áreas sociais das famílias envolvidas, como educação, saúde, transporte e lazer, promovendo o desenvolvimento rural sustentável.

Palavras-chave

Desenvolvimento sustentável; energia na agricultura; sustentabilidade energética; energias renováveis; geração distribuída.

ABSTRACT

MICHELETTI, Danilo Hungaro. Western Paraná State University – UNIOESTE – 2023. The contribution of photovoltaic solar energy to sustainable rural development. Advisor: Arlindo Fabrício Corrêia.

The application of new energy technologies contributes to improving agricultural activities in terms of productivity, economic performance and quality of life. Photovoltaic solar energy is a technology capable of promoting sustainable rural development, as it promotes access to clean energy and provides economic, environmental and social development. The main objective of this work was to analyze the contribution of the use of photovoltaic solar source generating systems in the sustainable development of rural properties in the municipality of Iporã-PR. The research was arranged as a case study that analyzed the economic, environmental and social viability, based on real productivity data collected between the years 2021 and 2022, in three photovoltaic systems of Distributed Generation of energy in rural properties of the municipality consistent with different levels of installed power. The research methodology consisted of analyzing the application of photovoltaic energy in rural activities corroborating with bibliographic consultations and contrasting with information provided by government entities. As a result, information regarding solar energy in Distributed Generation in Brazil was provided, highlighting the advantages and difficulties faced by photovoltaic energy in the rural sector. The case study resulted in a comparison of economic viability in the IRR, Discounted Payback, NPV and LCOE indicators, of environmental viability with an annual mitigation indicator in tons of CO₂ equivalent and of the number of adult trees in reforestation, and of social viability with the Average monthly savings with approximate purchase values for goods and services for social improvement. It was concluded that the reduction in electricity costs favors the gradual replacement of equipment powered by non-renewable fuels and that the reduction in operating costs also contributes to investment in better working conditions or other social areas of the families involved, such as education, health, transportation and leisure, promoting sustainable rural development.

Keywords

Sustainable development; energy in agriculture; energy sustainability; renewable energy; distributed generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tripé da sustentabilidade.	23
Figura 2.2 – Potencial fotovoltaico mundial	29
Figura 2.3 – Atividades rurais inicialmente estimuladas com energia solar fotovoltaica	30
Figura 2.4 – Impacto inicial dos sistemas fotovoltaicos na agricultura	30
Figura 2.5 – Potência instalada (MW) por fonte energética em Geração Distribuída no Brasil até 2022	32
Figura 2.6 – Quantidade anual de conexões do tipo radiação solar da classe de consumo rural no Brasil até 2022.....	33
Figura 2.7 – Potência instalada (MW) do tipo radiação solar no Brasil de acordo com a classe de consumo até 2022.....	33
Figura 3.1 – Posições relativas do sistema terra-sol durante uma revolução terrestre completa ao redor do Sol	43
Figura 3.2 – Posicionamento de um módulo de energia solar	44
Figura 3.3 – Mapa do potencial de energia fotovoltaica no Brasil.....	45
Figura 3.4 – Proporção da produção mundial por tecnologia fotovoltaica até 2021 ..	46
Figura 3.5 – Padrões de Entrada do tipo monofásico rural à esquerda e trifásico à direita em imóveis rurais de Iporã-PR	52
Figura 3.6 – Grupo gerador a diesel como backup elétrico emergencial de um imóvel rural de Iporã-PR.....	54
Figura 3.7 – Imóvel rural com piscicultura e restaurante com sistema fotovoltaico monocristalino conectado à rede em Iporã-PR.....	55
Figura 3.8 – Potência instalada e quantidade de conexões por setor de sistemas fotovoltaicos em GD no município de Iporã-PR	55
Figura 3.9 – Quantidade anual de conexões de sistemas fotovoltaicos em GD do setor rural no município de Iporã-PR.....	56
Figura 3.10 – Arranjo fotovoltaico policristalino com sombreamento em granja de aves em Iporã-PR	61
Figura 4.1 – Potência instalada em geração distribuída no Brasil por setor até janeiro de 2023.....	74
Figura 4.2 – Localização do município de Iporã-PR	79
Figura 4.3 - Vista do sistema fotovoltaico de pequeno porte do Caso 1	90
Figura 4.4 – Vista do sistema fotovoltaico de médio porte do Caso 2	91
Figura 4.5 – Vista do sistema fotovoltaico de grande porte do Caso 3	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resultados da simulação de produção de energia anual normalizada de sistema fotovoltaico com variação de ângulo de inclinação e de orientação no município de Iporã-PR.....	59
Tabela 4.1 – Indicadores e métodos de análise de sustentabilidade utilizados	72
Tabela 4.2 – Resultados da Análise Econômica dos três casos.....	94
Tabela 4.3 – Resultados da Análise Ambiental dos três casos	95
Tabela 4.4 – Média de economia do imóvel rural com energia elétrica	98
Tabela 4.5 – Valor da prestação ou mensalidade de bens e serviços para melhoria social.....	98
Tabela A.1 – Dados da Análise Econômica do Caso 1	109
Tabela A.2 – Dados da Análise Econômica do Caso 2	109
Tabela A.3 – Dados da Análise Econômica do Caso 3	110

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1	CONTEXTO	13
1.2	PROBLEMATIZAÇÃO	15
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.4	ESTRUTURA	15
2	O USO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO INCENTIVO AO DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL.....	18
2.1	INTRODUÇÃO	19
2.2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.2.1	Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável	20
2.2.2	Energia e Desenvolvimento Rural Sustentável.....	25
2.3	METODOLOGIA	28
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
2.4.1	Atividades rurais inicialmente estimuladas pela tecnologia fotovoltaica.....	29
2.4.2	A conexão à rede e o avanço da energia solar na área rural	31
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
	REFERÊNCIAS.....	36
3	DESAFIOS DO DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL EM IPORÃ-PR: INFLUÊNCIAS NA IMPLEMENTAÇÃO E PRODUTIVIDADE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE RURAL	40
3.1	INTRODUÇÃO	41
3.2	REFERENCIAL TEÓRICO	43
3.2.1	Irradiação solar e orientação dos módulos fotovoltaicos	43
3.2.2	Tecnologia fotovoltaica.....	45
3.2.3	Geração Distribuída	47
3.3	METODOLOGIA	49
3.3.1	Caracterização da pesquisa	49
3.3.2	Método da simulação de produtividade de energia anual normalizada de sistema fotovoltaico.....	50
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
3.4.1	A eletrificação e o desenvolvimento rural	50
3.4.2	Sistemas fotovoltaicos rurais em Geração Distribuída.....	54

3.4.3	Desafios de implementação e de produtividade	57
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
	REFERÊNCIAS.....	64
4	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL: ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA, AMBIENTAL E SOCIAL EM IPORÃ-PR	69
4.1	INTRODUÇÃO	70
4.2	REFERENCIAL TEÓRICO	72
4.2.1	Desenvolvimento Rural Sustentável com energias renováveis.....	72
4.2.2	Energia solar fotovoltaica e viabilidade nos três pilares da sustentabilidade .	75
4.3	METODOLOGIA	78
4.3.1	Caracterização do objeto de estudo	78
4.3.2	Caracterização da pesquisa	80
4.3.3	Coleta e conferência da produtividade energética	81
4.3.4	Método da análise econômica de sustentabilidade	82
4.3.5	Método da análise ambiental de sustentabilidade	86
4.3.6	Método da análise social de sustentabilidade	89
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	90
4.4.1	Descrição dos sistemas e conferência da produtividade energética.....	90
4.4.2	Análise econômica de sustentabilidade.....	92
4.4.3	Análise ambiental de sustentabilidade	95
4.4.4	Análise social de sustentabilidade.....	96
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
	REFERÊNCIAS.....	100
5	CONCLUSÕES GERAIS	106
	REFERÊNCIAS	108
	APÊNDICE A – ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	109

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 CONTEXTO

A energia é atualmente um dos elementos essenciais para diversos setores da sociedade. Entretanto, ela é responsável pela maior parte das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera (DONES; HECK; HIRSCHBERG, 2014). Contudo, a utilização de energia a partir de fontes renováveis auxilia na redução de emissão de gases poluentes e, desse modo, contribui com a preservação do meio ambiente por meio de uma transição energética eficiente (OLIVEIRA, 2021).

A eletrificação é a provisão de infraestrutura para o fornecimento de energia elétrica, a qual foi um dos avanços mais significativos que trouxe melhoria na qualidade de vida das pessoas, auxiliando nas atividades cotidianas e profissionais, aumentando o acesso a serviços básicos e melhorando os sistemas sociais (LOZANO; TABOADA, 2021). Logo, o acesso universal à eletricidade e à ampliação do uso de energias renováveis foram priorizados nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas e são de grande importância no desenvolvimento da sociedade (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

A inserção das energias renováveis na matriz energética nacional se faz necessária para proporcionar desenvolvimento socioeconômico e ambiental, visando, assim, diversificar a matriz energética e possibilitando evitar problemas com a falta de energia recorrente, a qual já foi comum no Brasil (VILLALVA, 2015). Além disso, evita-se que o país fique cativo dos combustíveis fósseis que, além de serem uma fonte energética custosa, possuem um grande impacto ambiental (ANEEL, 2023).

As fontes energéticas mais importantes na produção rural brasileira têm sido a lenha, o óleo diesel e a eletricidade, os quais são recursos essenciais para a realização das práticas e técnicas agrícolas e pecuárias exercidas no território (NOGUEIRA *et al.*, 2022). Logo, o consumo de energia elétrica na área rural tem crescido, assim como nos demais setores da sociedade (ANEEL, 2023). Esse incremento no consumo ocorre essencialmente devido à evolução das tecnologias aplicadas aos processos produtivos, iluminação e substituição de outras fontes energéticas.

O foco na sustentabilidade da agricultura deve ser uma premissa para buscar resolver problemas fundamentais relacionados à produção de alimentos e de produtos

agrícolas, de modo integrado a um conjunto de valores com maior consciência das realidades ecológicas e sociais. Desta maneira, os sistemas de agricultura sustentável visam aproveitar ao máximo os ciclos naturais existentes, evitando ou minimizando os danos ambientais e sociais. Assim, o desafio principal é o de levar energia limpa para o setor rural e reduzir a dependência de recursos não renováveis no consumo de energia, de combustíveis e outros recursos ambientais (CHEL; KAUSHIK, 2011).

Com a disseminação do uso da energia elétrica nos processos agropecuários, o setor, além de carecer da disponibilidade da energia elétrica para manter seus processos produtivos, também requer a qualidade mínima estipulada pelos indicadores propostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (NOGUEIRA *et al.*, 2022). Assim, o setor agrícola pode contribuir significativamente para reduzir o impacto ambiental do uso de energia, utilizando fontes de energia sustentáveis.

A energia solar, a energia eólica, os combustíveis renováveis e outras energias renováveis podem oferecer a solução para os problemas de energia e tornar o meio ambiente sustentável para as gerações futuras, reduzindo a poluição ambiental causada pelo uso de energia de combustíveis fósseis e de demais fontes poluidoras (NAÇÕES UNIDAS, 2015). Além disso, os impactos ambientais e sociais têm afetado diretamente a sociedade, elevando o incentivo à utilização de fontes energéticas ambientalmente conscientes (IPCC, 2022)

O constante incremento de eficiência dos equipamentos disponíveis no mercado beneficia o uso da energia solar fotovoltaica, a qual tem se mostrado economicamente viável em vários cenários e traz muitos benefícios aos usuários (DANTAS; POMPERMAYER, 2018). Logo, a energia solar fotovoltaica proporciona um menor impacto ambiental na geração de energia e possui uma grande facilidade de instalação, principalmente devido à sua versatilidade de aplicações e alta irradiação solar em todo território nacional (MICHELETTI; TELEKEN, 2022).

Dessa forma, houve grande avanço na implementação de sistemas fotovoltaicos no setor agrícola em todo o Brasil e, assim, é de grande relevância avaliar a real contribuição que a energia solar fotovoltaica teve para o Desenvolvimento Rural Sustentável. Para tanto, observou-se que são necessárias análises amplas e específicas, de forma a mostrar e comparar informações reais sobre o tema.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

Os sistemas de energia solar são considerados como energia renovável e carregam o título de sustentáveis. Entretanto, há situações no setor rural que podem impactar negativamente nos três pilares de sustentabilidade do empreendimento. Sendo assim, foi necessário realizar um estudo visando expor informações de modo amplo e mostrando as particularidades de um caso específico, a fim de demonstrar os pontos positivos e negativos que essa tecnologia traz para o desenvolvimento rural sustentável.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo principal: Avaliar a contribuição da utilização de sistemas geradores por fonte solar fotovoltaica no Desenvolvimento Sustentável de imóveis rurais do município de Iporã-PR.

A fim de alcançar o objetivo principal, a pesquisa também teve como objetivos específicos:

- a) Identificar a aplicação da tecnologia fotovoltaica como fomento ao Desenvolvimento Rural Sustentável no Brasil e no Estado do Paraná (Artigo 1);
- b) Elucidar os aspectos técnicos mais relevantes de implementação e de produtividade dos sistemas fotovoltaicos em Geração Distribuída que desafiam o setor rural do município de Iporã-PR (Artigo 2);
- c) Analisar a sustentabilidade econômica, ambiental e social de sistemas de energia solar fotovoltaica em três propriedades rurais em Iporã-PR (Artigo 3).

1.4 ESTRUTURA

A pesquisa foi dividida em três artigos científicos, que estão dispostos em capítulos. Cada artigo buscou cumprir cada um dos objetivos específicos, a fim de atingir a concretização do objetivo geral da pesquisa.

O Artigo 1 foi intitulado de **“O uso da energia solar fotovoltaica como incentivo ao Desenvolvimento Rural Sustentável”**. Inicialmente, os conceitos de sustentabilidade, desenvolvimento sustentável e desenvolvimento rural sustentável foram expostos e debatidos, elencando a trajetória dos eventos e documentações

mais importantes que embasaram sua evolução. Em seguida, foram trazidas informações referentes à energia solar em Geração Distribuída no Brasil, destacando as vantagens que o Brasil possui em irradiação solar. Assim, mostrou-se a relevância do uso da energia solar fotovoltaica em incentivar o desenvolvimento sustentável nas propriedades rurais, mostrando sua evolução no Brasil e evidenciando as atividades mais beneficiadas. Por fim, foram dispostas as referências bibliográficas do artigo.

O Artigo 2 foi intitulado de **“Desafios do Desenvolvimento Rural Sustentável em Iporã-PR: Influências na implementação e produtividade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede rural”**. O estudo iniciou mostrando a importância da energia elétrica para o desenvolvimento rural e expõe as dificuldades enfrentadas na eletrificação rural do Estado do Paraná. Na sequência, foi explicado sobre a produtividade fotovoltaica e radiação solar, mostrando as tecnologias mais utilizadas no Brasil. Também foi mostrada a viabilização da energia solar por meio da regulamentação da Geração Distribuída no Brasil, destacando dados relativos à sua utilização no meio rural. Assim, foram expostas as condições que mais influenciam negativamente a produtividade fotovoltaica, ressaltando alguns dos desafios e problemas enfrentados por empreendimentos rurais. Por fim, foram dispostas as referências bibliográficas do artigo.

O Artigo 3 é um estudo de caso e foi intitulado de **“Energia solar fotovoltaica e Desenvolvimento Rural Sustentável: Estudo de viabilidade econômica, ambiental e social em Iporã-PR”**. O estudo iniciou referenciando a importância da energia como propulsor de tecnologia e produtividade nas atividades rurais, mostrando também o quanto a energia solar traz estabilidade para a agricultura. Na sequência, o texto elencou a caracterização do objeto de estudo, apresentando as características do município e os critérios de seleção das propriedades rurais estudadas. Também foi registrado o método das análises de produtividade e de sustentabilidade e, em seguida, os resultados discutidos, de modo a confirmar as viabilidades econômica, ambiental e social da utilização dos sistemas fotovoltaicos para produção de energia no ambiente rural. Diante disso, o estudo de caso mostrou como resultado um comparativo de viabilidade econômica nos indicadores TIR, *Payback* Descontado, VPL e LCOE, de viabilidade ambiental com indicador de mitigação anual em toneladas de CO₂ equivalente e de número de árvores adultas em reflorestamento e de viabilidade social com a economia mensal média com valores

aproximados de aquisição de bens e serviços para melhoria social. Por fim, foram dispostas as referências bibliográficas do artigo.

Na sequência, as considerações finais, que trazem conclusões acerca do exposto e encerram o trabalho, levantando aspectos reflexivos sobre o tema abordado. Por fim, foram dispostas as referências bibliográficas que foram utilizadas na tese e não se encontram nos artigos.

2 O USO DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA COMO INCENTIVO AO DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL

RESUMO

O conceito de desenvolvimento rural sustentável tem evoluído na medida em que os sistemas agrícolas também mudam, abrangendo aspectos sociais e ambientais mais extensos, além da perspectiva econômica. Deste modo, é importante compreender a temática da sustentabilidade e do desenvolvimento sustentável, a fim de ampliar a eficácia da aplicação do desenvolvimento sustentável no âmbito rural. O presente estudo teve por objetivo analisar a aplicação da tecnologia solar fotovoltaica no fomento ao Desenvolvimento Rural Sustentável no Brasil. A metodologia do estudo consistiu em uma pesquisa bibliográfica de abordagem qualitativa e referencial teórico em livros, artigos e normativas, corroborado com dados secundários de órgãos governamentais e de pesquisas científicas. Como resultados deste estudo, os conceitos de sustentabilidade, desenvolvimento sustentável e desenvolvimento rural sustentável foram expostos e debatidos, elencando a trajetória dos eventos e documentações mais importantes que embasaram sua evolução. Também foram dispostas informações referentes à energia solar em Geração Distribuída no Brasil, destacando as vantagens que o Brasil possui em irradiação solar. Ainda se mostrou a relevância do uso da energia solar fotovoltaica em incentivar o desenvolvimento sustentável nas propriedades rurais, mostrando sua evolução no Brasil e evidenciando as atividades mais beneficiadas. Concluiu-se que as aplicações fotovoltaicas no setor produtivo agrícola têm um potencial considerável para atender às preocupações ambientais e contribuir para o desenvolvimento rural sustentável.

Palavras-Chave

Desenvolvimento sustentável; energia na agricultura, energias renováveis; geração distribuída; sustentabilidade energética.

THE USE OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AS INCENTIVE TO SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT

ABSTRACT

The concept of sustainable rural development has evolved as agricultural systems also change, encompassing broader social and environmental aspects beyond the economic perspective. In this way, it is important to understand the theme of sustainability and sustainable development, in order to increase the effectiveness of the application of sustainable development in rural areas. This study aimed to analyze the application of photovoltaic solar technology in promoting Sustainable Rural Development in Brazil. The study methodology consisted of a bibliographical research with a qualitative approach and theoretical reference in books, articles and regulations, corroborated with secondary data from government agencies and scientific research. As a result of this study, the concepts of sustainability, sustainable development and sustainable rural development were exposed and debated, listing the trajectory of the most important events and documents that supported their evolution. Information regarding solar energy in Distributed Generation in Brazil was also provided, highlighting the advantages that Brazil has in terms of solar irradiation. The relevance

of the use of photovoltaic solar energy in encouraging sustainable development in rural properties was also shown, showing its evolution in Brazil and highlighting the most benefited activities. It was concluded that photovoltaic applications in the agricultural productive sector have considerable potential to address environmental concerns and contribute to sustainable rural development.

Keywords

Sustainable development; energy in agriculture, renewable energy; distributed generation; energy sustainability.

2.1 INTRODUÇÃO

Perdurou por muito tempo a ideia de que as fontes de recursos seriam inesgotáveis e que a natureza serviria ao homem em todas as suas necessidades. Entretanto, esse conceito foi se desconstruindo à medida em que foi se percebendo o aumento na proporção dos impactos negativos causados ao meio ambiente pelas atividades humanas, principalmente em função do aumento populacional e dos avanços tecnológicos obtidos com a revolução industrial (ABRAMOVAY, 2010).

A atual sociedade capitalista tem se baseado na busca empresarial de resultados financeiros em meio a uma globalização da economia. Assim, a escala de produção tem aumentado, aliada da redução de custos, de modo que as empresas se mantenham dentro dessa competitiva sobrevivência mundial. Desta forma, o ciclo produtivo utilizado retira os insumos necessários do meio ambiente para a produção de bens de consumo e de alimentos. Entretanto, esse processo produtivo tem causado poluição ambiental, esgotamento dos recursos naturais, desgaste do meio ambiente, pobreza, fome e exclusão social (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

O Brasil é um dos países que mais consome energia no mundo, cerca de 497 TWh, e está investindo fortemente em fontes de energia alternativas para a diversificação da sua matriz energética (EPE, 2022). Cada uma das áreas de produção energética renovável pode desenvolver um papel substancial para a elevação da participação no volume total da crescente demanda energética mundial.

Dentre as formas de aproveitamento da luz solar, a conversão fotovoltaica tem se difundido devido ao avanço tecnológico na fabricação dos equipamentos e pela versatilidade na construção de sistemas integrados em unidades consumidoras ou de usinas de produção em larga escala, podendo ser um dos elementos essenciais para o futuro do uso energético sustentável (IPCC, 2022; PINHO; GALDINO, 2014).

Os sistemas de geração de energia elétrica utilizados em conexões de Geração Distribuída (GD) têm se popularizado no setor elétrico brasileiro. Ela viabiliza a implementação de diversas fontes de energia renovável para produção de energia elétrica e possibilita um melhor aproveitamento energético de sua utilização. Assim, o consumidor pode gerar sua própria energia através das tecnologias disponíveis (ANEEL, 2023).

Alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável se entrelaçam na temática do desenvolvimento rural sustentável. Observa-se que o ODS 2, “Fome Zero e Agricultura Sustentável”, ressalta a importância de garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos através de práticas agrícolas sustentáveis e acesso à tecnologia. Ainda, o ODS 7, “Energia Limpa e Acessível”, foca na importância da transição energética para fontes renováveis limpas, aumentando a participação das energias renováveis na matriz energética. Assim, busca-se compreender essa relação com a aplicação da tecnologia solar fotovoltaica e seus impactos no desenvolvimento rural sustentável (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Na busca pela sustentabilidade energética no âmbito rural, busca-se pela melhor compreensão dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, os quais dialogam sobre agricultura sustentável e energia limpa. A energia elétrica tem se tornado fundamental nas atividades agrícolas e, desta forma, a energia fotovoltaica está auxiliando na implantação de técnicas produtivas mais eficazes e na melhoria das condições de vida para a população do campo (LOZANO; TABOADA, 2021).

Nesse sentido, o presente estudo teve por objetivo identificar a aplicação da tecnologia fotovoltaica como fomento ao Desenvolvimento Rural Sustentável no Brasil e no Estado do Paraná.

2.2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.2.1 Sustentabilidade e Desenvolvimento Sustentável

A base principal do capitalismo é o consumo, o qual é fundamentado na movimentação do dinheiro e na influência de quem o tem. Assim, são impostos estilos de vida na sociedade baseados em uma crescente necessidade por novas aquisições, elevando a taxa de desperdício. Nesse sentido, a sociedade de consumo se fundamenta no consumismo de bens e serviços devido a fatores sociais e culturais,

associados à geração de lucro e riqueza das corporações capitalistas (BARBOSA, 2010).

A fim de manter a geração de lucro, há uma corrida com o objetivo de se desenvolver novas mercadorias ou novos métodos produtivos, os quais têm reduzido a durabilidade dos produtos e aumentado as novas aquisições. Desse modo, a imposição da mídia e a variedade de pagamentos disponíveis têm orientado na constituição de uma sociedade consumista que, conseqüentemente, causa poluição e devastação ao meio ambiente pelo uso desenfreado de recursos na fabricação desses produtos e no descarte irracional de resíduos (ABRAMOVAY, 2010; CALGARO, 2009).

Esse desejo por novos produtos é provocado pelas novidades de lançamentos e das tendências articuladas pela mídia, a qual é essencialmente sustentada pela ambição financeira das corporações capitalistas (GONÇALVES, 2011). Assim, há uma conexão entre o estilo de vida das pessoas e o consumismo exacerbado, ligado às ideologias capitalistas que prezam por um desenvolvimento econômico, esquecendo-se dos outros pilares do desenvolvimento sustentável (GIACOMINI FILHO, 2008).

Essa busca vertiginosa por inovação traz consigo a ideia do crescimento persistente da produção e consumo, a qual ultrapassa os limites suportáveis pelos ecossistemas naturais. Isso também corrobora com a divergência entre a conquista de bem-estar para os grupos populacionais e a incessante produção de bens e serviços. Assim, a partir de 1960, ocorreram debates em nível mundial acerca do consumo, crescimento econômico e preservação dos recursos naturais (ABRAMOVAY, 2010).

A ampla injustiça social, a destruição da biodiversidade ambiental e as evidentes mudanças climáticas têm sido fatores muito relevantes na discussão contra o ideal de prosperidade e progresso expressados no discurso capitalista. Além disso, as recorrentes crises econômico-financeiras têm fragmentado a soberania desse ideal desenvolvimentista (SACHS, 2000).

Contrastando a riqueza e prosperidade que o desenvolvimento industrial trouxe às nações nos últimos 200 anos, a degradação ecológica causada nesse período foi na mesma escala. Desse modo, a Terra passou por diversos problemas ambientais expressos nas alterações atmosféricas e climáticas, no desmatamento e na desertificação, no desgaste da biodiversidade, nos acidentes industriais e nos resíduos tóxicos incorretamente dispostos (SHRIVASTAVA, 1995).

A fim de se examinar a complexidade dos problemas que a humanidade enfrentava, discussões sobre o ecodesenvolvimento foram compiladas no relatório *The Limits to Growth* (Os Limites do Crescimento) que foi publicado em 1972. Esse estudo apresentou cenários catastróficos do futuro da Terra e defendia a importância do equilíbrio global, da reparação dos problemas ambientais, do desenvolvimento econômico dos países menos desenvolvidos e dos limites do crescimento populacional (MARGOLIN, 1998).

O Relatório *Our Common Future* (Nosso Futuro Comum), também conhecido como Relatório de *Brundtland*, foi produzido em 1987 pela Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento aliada à Organização das Nações Unidas (ONU). Esse relatório definiu o conceito de desenvolvimento sustentável como aquele que atende às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das gerações futuras atenderem também as suas necessidades (BODNAR; FREITAS; SILVA, 2016).

Na sequência, a conferência mundial Eco 92 sobre Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável foi um marco global das discussões desse assunto. Dentre seus resultados, a Agenda 21 é um documento que expõe vários compromissos assentidos pelos 170 países presentes na Eco 92, que assumiram o objetivo de englobar os princípios do desenvolvimento sustentável em suas políticas públicas (BODNAR; FREITAS; SILVA, 2016).

A conferência mundial Rio+10, em 2002, avaliou que países mais industrializados possuem uma maior utilização de recursos naturais e de emissão de resíduos poluentes. Lá foi elaborado o Protocolo de Kyoto, pelo qual foi firmado um compromisso em que esses países com maior nível de industrialização deveriam ser mais tributados e responsabilizados pela não preservação do planeta (OLIVEIRA FILHO, 2004). Ainda, a Rio+10 elucidou que o Desenvolvimento Sustentável se baseia nos três pilares econômico, social e ambiental, chamados de Triple-Bottom Line ou Tripé da Sustentabilidade, ilustrados na Figura 2.1.

No diálogo entre o ser humano e a natureza, é necessário que a humanidade esteja em conexão com o meio ambiente para que o trabalho humano possa ser entendido e executado. Sendo assim, para que a sociedade se torne altruísta, é essencial que sejam desenvolvidas atividades produtivas conscientes unindo as esferas humana e ambiental (SCHMIED-KOWARZIK, 2019).

Figura 2.1 – Tripé da sustentabilidade.



Fonte: Adaptado de Etzkowitz (2008).

Seguindo essa linha de pensamento, o entrelaçamento entre a humanidade e o meio ambiente é de grande relevância para alcançar o desenvolvimento sustentável, visando equilibrar a equidade social, o crescimento econômico e a correta utilização dos recursos naturais. Nesse sentido, para garantir essa relação saudável entre o ser humano e a natureza dentro do desenvolvimento sustentável, observa-se a relevância da sustentação dos alicerces produtivos e reprodutivos da humanidade em sua vasta gama de atividades e identidades (FIORILLO, 2009).

Dessa forma, torna-se substancial o gerenciamento adequado dos recursos naturais dentro desse universo econômico globalizado, devendo-se considerar que o padrão de produção e consumo tende a se modificar conforme evoluem as tendências de mercado. Portanto, o desenvolvimento precisa estar atrelado à conscientização da população, a fim de reduzir a emissão de poluentes e de minimizar os impactos ambientais. Assim, ao se tomar consciência da real situação e adotar-se estratégias de utilização dos recursos, é possível encontrar um modo equilibrado e sustentável, a fim de garantir um futuro amplamente próspero (GRANZIERA; REI, 2015).

Dentro do tema do desenvolvimento sustentável, é fundamental analisar a visão da Sustentabilidade. Esse termo compreende as ações fundamentais para o equilíbrio dos seres vivos e de sua manutenção, restaurando a capacidade do capital natural de se regenerar, reproduzir e coevoluir (BOFF, 2016). Assim, para que se encontre a sustentabilidade, é substancial se alcançar o desenvolvimento de forma que seja economicamente viável, socialmente justo e ambientalmente correto.

Portanto, o Desenvolvimento Sustentável é fundamental para alcançar a Sustentabilidade (FREITAS; FREITAS, 2016).

De toda forma, a sustentabilidade compõe a visão de um futuro ideal, no qual a civilização elabora projetos mantendo o foco na coletividade. Assim, a sustentabilidade seria o ideal a ser alcançado no período contemporâneo, ao lado dos ideais buscados no período moderno, que são liberdade, igualdade e fraternidade. Desse modo, a devida efetivação da Sustentabilidade em suas diversas esferas permite a construção de uma sociedade nova e melhor (MATIAS, 2014).

A sustentabilidade surge nas matrizes originárias da ecologia e da economia. Na esfera ecológica, a sustentabilidade de um ecossistema se conecta com seu próprio estado resiliente, de modo a enfrentar os distúrbios e impactos externos, mantendo suas funções e estruturas naturais (BOFF, 2016). Dessa forma, há diversos pontos de equilíbrio para um ecossistema ter resiliência e ter sustentabilidade (SILVA JUNIOR; FERREIRA, 2013). Entretanto, ainda não há um consenso para definir e explanar a questão da sustentabilidade da esfera econômica, a qual questiona o atual padrão de produção e consumo (NASCIMENTO, 2012; VEIGA, 2005).

Nesse sentido, com base na atual conscientização da população, na busca por um consumo mais consciente, as indústrias estão observando que os padrões de consumo estão se voltando para produtos e empresas que se importam com o meio ambiente e com a justiça social. Assim, as indústrias e o comércio estão lentamente despertando o modelo ambientalmente ecológico em seus produtos, além de mostrar suas campanhas ambientais e sociais (ABRAMOVAY, 2010).

Com essa busca pela sustentabilidade, as corporações objetivaram por melhores indicadores que convergiram no grupo de indicadores de Governança Ambiental, Social e Corporativa (ESG). Tem-se que os indicadores ESG são influenciados por uma gama de considerações instrumentais e normativas, originadas de várias fontes que, atualmente, são foco de estudo para melhor entendimento (CRACE; GEHMAN, 2023).

O ESG deriva de uma demanda geral por maior responsabilidade produtiva e visa mensurar o modelo no qual as organizações atuam em função da mitigação dos impactos ao meio ambiente e em função de uma administração transparente e igualitária. Assim, as premissas do ESG buscam desenvolver cadeias produtivas mais sustentáveis levando em conta os aspectos ambiental, social e econômico (COSTA; FERREZIN, 2021).

O termo desenvolvimento abrange o processo de evolução das ações fomentadas pela humanidade, buscando por um sentido positivo nesse processo. Da mesma forma, a palavra sustentabilidade busca por ações que tragam sustentação à vida no planeta Terra em consonância econômica, ambiental e social. Dessa forma, o termo sustentável complementa e traz um ponto de equilíbrio para o termo desenvolvimento. Assim, o Desenvolvimento Sustentável é uma estratégia que tende a manter os recursos naturais para as próximas gerações e a sustentabilidade é a condição final de estilo de vida que se busca alcançar (SILVA JUNIOR; FERREIRA, 2013).

A partir de toda a evolução do conceito de Desenvolvimento Sustentável, a ONU realizou uma reunião de chefes de estado e de governo no ano de 2015 em Nova York, além de representantes mundialmente importantes. Com isso, foi proposta a Agenda 2030, com ações para os próximos quinze anos, e expostos os ODS, compostos por 17 objetivos e 169 metas, direcionados a questões ambientais, econômicas, institucionais e sociais. Assim, esta foi considerada uma decisão histórica, reunindo metas universais e transformadoras, de forma abrangente, de longo alcance e voltada às pessoas (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Neste sentido, os 17 ODS e as 169 metas universais abrangem os países de modo integral e indivisível, equilibrando as três dimensões do Desenvolvimento Sustentável. Observa-se que esses objetivos e metas foram elaborados pela ONU com base em uma intensiva consulta pública, além de contribuições da sociedade civil, levando essencialmente em consideração a opinião dos mais vulneráveis (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

2.2.2 Energia e Desenvolvimento Rural Sustentável

Compreender os conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável se torna importante para remeter à aplicação de desenvolvimento sustentável no campo. Assim como ocorreu a evolução dos conceitos, a noção de desenvolvimento rural tem apresentado significados e compreensões distintas. Em suma, deve ser compreendido como um ramo distinto e um conceito em evolução, fruto de um conjunto de ideias que se altera ao longo do tempo, influenciado por diversas conjunturas (NAVARRO, 2001).

Segundo Melo (2017), o desenvolvimento rural seria um processo complexo e necessariamente multidimensional, no qual haveria uma diversidade de atividades, correlacionando as relações sociais com os diversos atores. Nesse contexto, é emergente a necessidade de gerir e minimizar o esgotamento de recursos não renováveis, criando mecanismos de reaproveitamento dos recursos renováveis e criando um ciclo de sustentabilidade com fundamento na relação da humanidade com a natureza, de modo a buscar pelo desenvolvimento equilibrado.

Dessa forma, é indispensável a mudança com relação aos hábitos de produção e consumo. O segmento agrícola tem sido objeto de análise, no que se refere à discussão em torno da sustentabilidade e suas condicionantes. Assim, os aspectos evolutivos têm sido discutidos em torno do conceito de desenvolvimento rural sustentável no qual os sistemas agrícolas têm passado por mudanças em nível mundial, abarcando aspectos mais extensos, além da perspectiva econômica e trazendo anseios dos aspectos sociais e ambientais. Assim, a implementação de novas tecnologias para o meio agrário também tem fomentado essas transformações nos padrões de produção e consumo (VAN ITTERSUM *et al.*, 2008).

Nesse sentido, o desenvolvimento rural sustentável pode ser entendido como a síntese de várias transformações quantitativas e qualitativas que se produzem no meio da população rural, e que visam produzir efeitos ao longo do tempo, trazendo mudanças significativas no nível de vida desses atores. Em suma, o desenvolvimento rural sustentável não está apenas ligado ao desenvolvimento econômico ou tecnológico, mas também social e ambiental, de modo a trazer progresso às pessoas, comunidades, regiões e para todo o território (SILVA, 2007).

As dimensões fundamentais do conceito de desenvolvimento rural sustentável estão intrinsicamente conectadas à dimensão ecológica, espacial ou geográfica, social, cultural e econômica. Sendo essas dimensões, o ponto de partida para se compreender a aplicação de práticas que visam melhorar as condições de vida da sociedade, respeitando os limites das capacidades dos ecossistemas, pensando o meio rural, não mais como um espaço isolado, mas conectado ao sistema (SACHS, 2000; VEIGA, 2005).

Delgado (2010) constrói o pensamento acerca do debate sobre o desenvolvimento rural no Brasil, o qual ele chama a atenção para dois projetos considerados excludentes para o desenvolvimento rural. O primeiro, sendo o projeto neoliberal, corresponde à produção de commodities para exportação em sistemas

extensivos de monoculturas, o qual credita o desenvolvimento ao pilar econômico, com uma visão ainda predominante, e prevê que o desenvolvimento vem pela modernização da agricultura. O segundo, é o projeto democratizante, que tem como base a melhoria da qualidade de vida do agricultor.

Dentro do contexto da democratização, em prol do desenvolvimento rural sustentável, Veiga (2001) afirma que se necessita dar valorização e fortalecer a agricultura familiar, fomentar a produção e comercialização local, a diversificação econômica, criando políticas públicas que incentivem esse desenvolvimento regionalizado. Além disso, quanto maior a diversificação produtiva maior são as oportunidades de se incrementar um desenvolvimento e gerir bons resultados no desenvolvimento rural sustentável.

Nesse sentido, compreender que a modernização rural é uma parte do desenvolvimento rural e remodelar as práticas de agricultura aproximam o rural dos anseios do desenvolvimento sustentável. Assim, Delgado (2010) diz que o desenvolvimento rural se apresenta como contribuinte para a ampliação da heterogeneidade do setor agrícola. Complementando esse pensamento, Ploeg (2011) revisa o desenvolvimento rural, o qual está conectado a vários problemas globais, desde falhas de mercado ou interterritorialidade, ou seja, as novas percepções sobre as práticas de desenvolvimento rural que se articulam mediante novos mercados aninhados que podem alavancar o desenvolvimento rural sustentável.

A energia é geralmente reconhecida como um elemento importante do desenvolvimento socioeconômico rural, contida nos serviços viabilizados por meio dos insumos energéticos como bombeamento de água e iluminação. Como tendência geral, uma demanda crescente de energia, tanto em quantidade quanto em qualidade, está altamente relacionada ao desenvolvimento socioeconômico. No entanto, as populações rurais de muitos países em desenvolvimento foram excluídas da maioria dos benefícios do desenvolvimento econômico e da transição para serviços de energia de melhor qualidade, afetando diretamente no bem-estar rural em áreas como saúde, segurança alimentar e produção agrícola (CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000).

Conforme a energia elétrica tem se inserido nas atividades agrícolas, seu uso tem crescido junto com sua importância na produtividade rural, atingindo 32 TWh de consumo de energia elétrica, cerca de 6,4% do total consumido no Brasil (EPE, 2022). Desse modo, a inserção de fontes de energia renovável no ambiente rural auxilia no

processo de tornar as atividades rurais mais sustentáveis e produtivas (PAZZINI *et al.*, 2002).

A Agenda 21, resultante da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992, clama por uma "transição energética rural". A Agência da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) aponta a necessidade de tal transição energética como um meio de melhorar efetivamente as condições socioeconômicas das populações rurais, especialmente como um requisito para a produtividade e a geração de renda (CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000; NAÇÕES UNIDAS, 2015).

Portanto, as energias renováveis podem promover o desenvolvimento rural sustentável, além de reduzir os diversos danos causados à Terra pelas emissões de gases de efeito estufa. No meio rural, a possibilidade de obtenção de energia limpa integra as novas tecnologias ao campo, promovendo uma revolução no modo de consumo e produção. Assim, as energias renováveis auxiliam trazendo liberdade aos agricultores, que passam a ter um menor custo no fator energia pela utilização desses sistemas geradores (SILVA, 2015).

2.3 METODOLOGIA

A pesquisa visou a caracterização da utilização de energia solar fotovoltaica no ambiente rural, buscando por informações que pudessem confirmar sua efetiva contribuição com o Desenvolvimento Rural Sustentável. Assim, a metodologia do presente estudo consistiu em uma pesquisa bibliográfica de abordagem qualitativa e quantitativa, com referencial teórico de livros, artigos e normativas, corroborado com dados secundários de órgãos governamentais e de pesquisas científicas.

Os dados secundários coletados foram dispostos em planilha eletrônica e foram criados gráficos, a fim de ilustrar os resultados com maior clareza. Dessa forma, as informações coletadas foram discutidas e contrastadas com o referencial teórico, buscando corroborar a proposição da pesquisa.

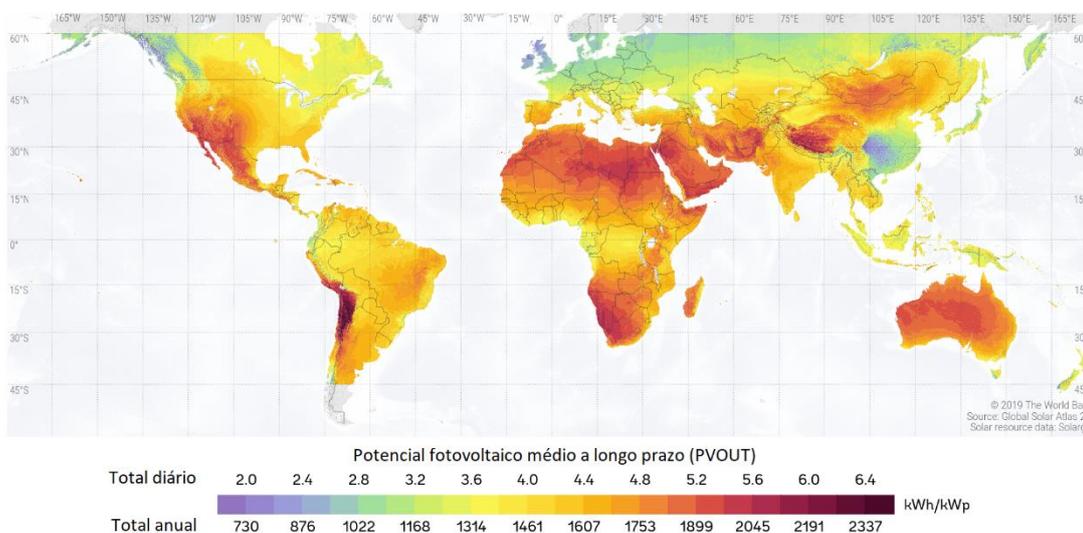
Inicialmente, a pesquisa expõe as atividades rurais mais estimuladas pela inserção dos sistemas fotovoltaicos autônomos. Em seguida, são mostrados os benefícios que a conexão à rede em GD proporciona para o desenvolvimento rural e o avanço na quantidade de novos sistemas nas propriedades rurais do município.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Atividades rurais inicialmente estimuladas pela tecnologia fotovoltaica

O aproveitamento da fonte energética solar para geração de energia elétrica vem evoluindo nas últimas décadas, principalmente devido à rápida expansão do consumo energético. O mapa da Figura 2.2 mostra a variedade de níveis de irradiação solar em cada região terrestre. Observa-se que as regiões áridas possuem um índice de irradiação médio maior que as regiões equatoriais chuvosas. Também é possível verificar que quase toda a extensão brasileira possui índices de luminosidade maiores que a maior parte dos países da Europa (FREIRE, 2015).

Figura 2.2 – Potencial fotovoltaico mundial



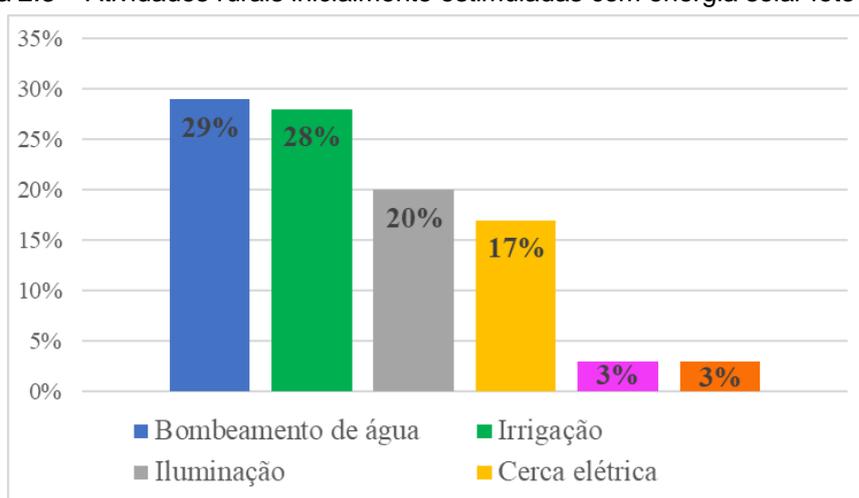
Uma das formas de conversão de energia solar em energia elétrica acontece através do efeito fotovoltaico sobre determinados materiais semicondutores. A energia solar fotovoltaica foi inicialmente empregada em pequenos sistemas autônomos, instalados principalmente em locais não atendidos pela rede elétrica (FREIRE, 2015). Esses sistemas fornecem energia para funções específicas de atividades rurais.

Nesse sentido, a Organização das Nações Unidas, para Alimentação e Agricultura – FAO, requisitou uma investigação sobre esse assunto, resultando na pesquisa de CAMPEN; GUIDI; BEST (2000) que, conforme observado na Figura 2.3, indicou que inicialmente as atividades rurais mais estimuladas pela utilização da

energia solar foram o bombeamento de água e a irrigação, as quais são atividades essenciais para uma melhor produtividade na agricultura.

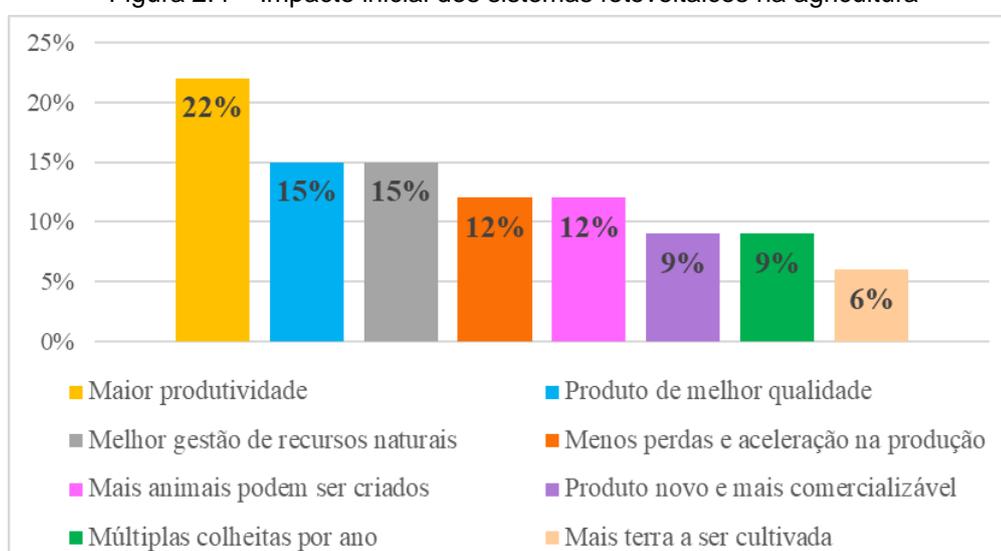
Ainda, conforme observado na Figura 2.4, a energia solar impactou na agricultura, trazendo maior produtividade, produtos de melhor qualidade e uma melhor gestão dos recursos naturais, mostrando que a maior disponibilidade de energia realmente promove as atividades agrícolas. Desse modo, diversas atividades rurais foram estimuladas por meio da utilização da energia produzida para utilização em aplicações isoladas (CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000).

Figura 2.3 – Atividades rurais inicialmente estimuladas com energia solar fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Campen; Guidi; Best (2000).

Figura 2.4 – Impacto inicial dos sistemas fotovoltaicos na agricultura



Fonte: Adaptado de Campen; Guidi; Best (2000).

Desse modo, a energia solar auxilia na implantação de técnicas produtivas mais eficazes, na ampliação das atividades geradoras de renda e na melhoria das condições de vida da população do campo (SEBRAE, 2018). Os valores de renda variam conforme a atividade agrícola e conforme o país ou região que o sistema fotovoltaico está sendo inserido. Todavia, há no Brasil grande potencial e competitividade econômica para o uso de dispositivos fotovoltaicos tanto em aplicações isoladas quanto em conexão à rede (CAMPEN; GUIDI; BEST, 2000). Assim, fica evidente o potencial dos sistemas solares fotovoltaicos para uso na agricultura e como base para um desenvolvimento rural mais sustentável.

2.4.2 A conexão à rede e o avanço da energia solar na área rural

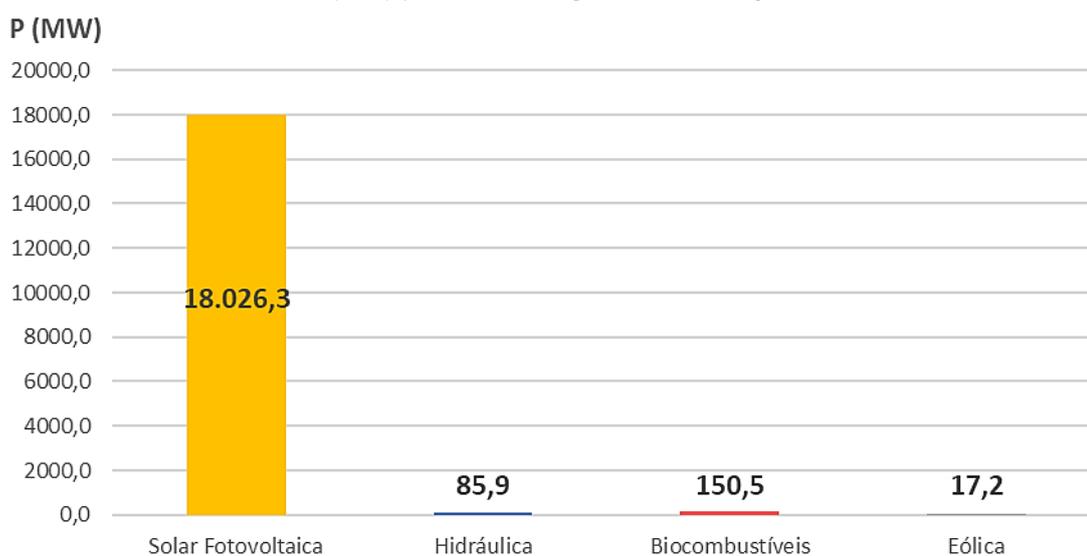
O advento da Resolução Normativa nº 482 de 2012 trouxe a possibilidade de que sistemas geradores possam ser conectados à rede elétrica de distribuição em baixa e média tensão, desde que alimentados por fontes renováveis de energia (ANEEL, 2012). Esses sistemas funcionam como compensadores de crédito e, para isso, um medidor bidirecional registra a quantidade de energia que entrou e que saiu da unidade consumidora para, no fim do mês, realizar uma compensação desses valores (VILLALVA, 2015).

A modalidade de conexão de fontes geradoras de energia elétrica com a rede de distribuição das companhias de energia acontece por meio da GD e se divide em duas categorias: microgeração e minigeração (ANEEL, 2012). Na GD a energia produzida é consumida primeiramente dentro do estabelecimento da unidade consumidora e, caso haja excedente, ele é injetado na rede de energia elétrica da distribuidora. Nos momentos em que não há produção ou que a potência gerada não é suficiente para as cargas, a energia é fornecida pela companhia integralmente ou em complemento (VILLALVA, 2015).

Dentre as fontes energéticas renováveis permitidas na modalidade de GD estão a energia hidráulica, a solar, a eólica e a de biocombustíveis (ANEEL, 2012). Dessa forma, a Figura 2.5 mostra que a energia elétrica produzida por meio da energia solar fotovoltaica teve destaque no Brasil com uma participação de 98,6% do total, mostrando uma grande diferença de potência instalada sobre as demais fontes energéticas (ANEEL, 2023). Observa-se que a participação das fontes renováveis em centrais de venda de energia não se enquadra nesse comparativo.

Desse modo, conforme Barbosa e Azevedo (2013), a GD possui vários pontos positivos, pois auxilia o sistema elétrico de modo a complementar a matriz energética nacional. A GD traz grandes benefícios técnicos à geração fotovoltaica, como o sistema de compensação de energia, que possibilita ao consumidor deixar de utilizar baterias que possuem vida útil curta e difícil descarte em áreas isoladas. Além disso, a possibilidade de instalação em locais que já possuem construções no local reduz ainda mais os impactos ambientais na produção de energia (AGUIAR JUNIOR; PINTO, 2017).

Figura 2.5 – Potência instalada (MW) por fonte energética em Geração Distribuída no Brasil até 2022



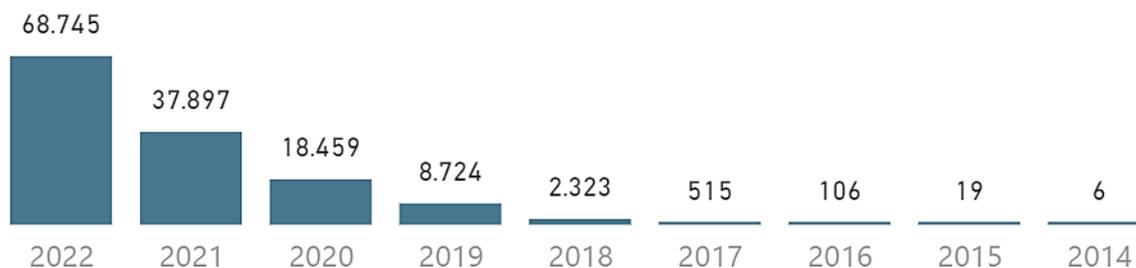
Fonte: Adaptado de ANEEL (2023).

A conexão à rede em GD dos sistemas fotovoltaicos foi permitida em 2012, mas somente teve expressividade após 2016 (ANEEL, 2023). Dessa forma, observa-se que a inserção da energia solar fotovoltaica ocorreu de maneira mais lenta no âmbito rural, conforme mostra a Figura 2.6, evoluindo significativamente somente após 2017, mas que com as recentes políticas públicas houve uma efetiva expansão no setor.

A geração de energia solar fotovoltaica no âmbito rural atingiu 14,7% do total de potência instalada de energia solar em GD, conforme Figura 2.7 ANEEL (2023). Assim, a conexão da energia fotovoltaica com a rede alimenta ou compensa o consumo de qualquer maquinário ou dispositivo que estiver conectado à energia elétrica fornecida pela companhia de energia e, dessa forma, essa energia consegue

auxiliar todas as atividades rurais desenvolvidas com energia elétrica em razão de estar conectada.

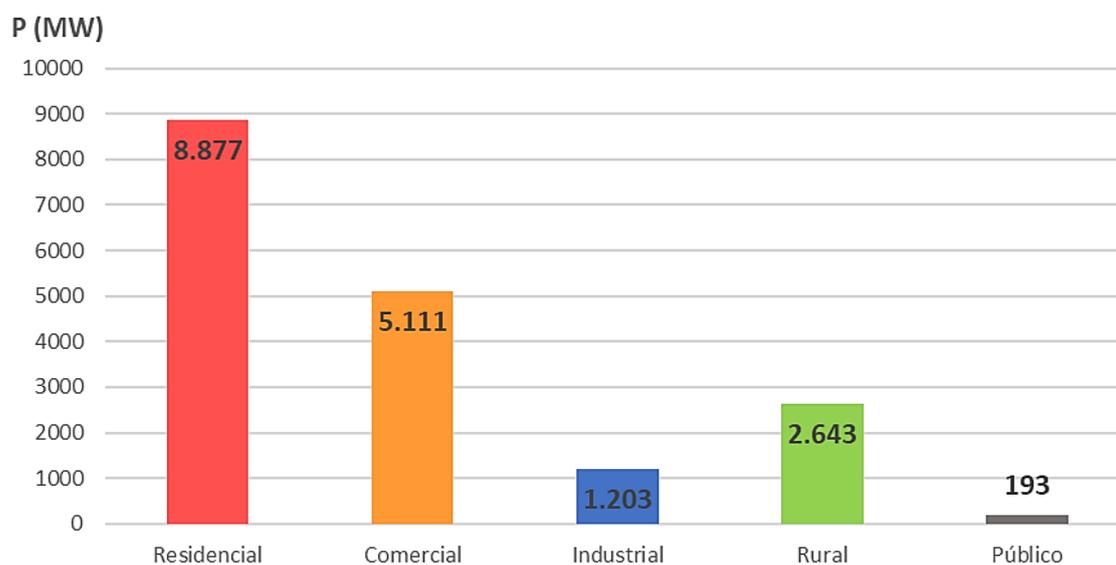
Figura 2.6 – Quantidade anual de conexões do tipo radiação solar da classe de consumo rural no Brasil até 2022



Fonte: ANEEL (2023).

As atividades beneficiadas de maior destaque em relação à compensação energética atualmente são bombeamento de poço artesiano, irrigação, agroindústrias, aeradores de piscicultura, criação confinada de aves, de suínos ou de gado leiteiro, além de auxiliar as diversas atividades de agricultura familiar. Desse modo, a energia solar fotovoltaica amplia a oferta de energia no meio rural pelo uso de fontes de energia renovável e incentiva à modernização das atividades agropecuárias (IDR-PARANÁ, 2021).

Figura 2.7 – Potência instalada (MW) do tipo radiação solar no Brasil de acordo com a classe de consumo até 2022



Fonte: Adaptado de ANEEL (2023).

A modularidade e a flexibilidade da tecnologia solar fotovoltaica são elementos que a tornam uma eficiente alternativa de matriz energética renovável, capaz de se adaptar às diferentes necessidades do campo (FERREIRA *et al.*, 2018). Além disso, ela é considerada uma fonte inesgotável, limpa e dissociada de consequências nocivas imediatas para o ambiente. Assim, ela se tornou uma poderosa ferramenta de redução de custos energéticos nos sistemas conectados à rede, quanto de autonomia com sistemas isolados em áreas longe das redes elétricas (TILMISINA; KURDGELASHVILI; NARBEL, 2011).

Assim, a tecnologia fotovoltaica além de ser uma fonte limpa que possibilita mitigar as mudanças climáticas, já que não emite gases poluentes, apresenta diversos benefícios sociais, ambientais e econômicos. Na esfera econômica gera receita para a administração pública através da arrecadação de tributos, como para a população onde possibilita a geração de emprego, além de toda a movimentação comercial e de serviços adjacentes que se instalam durante a construção dos empreendimentos (TOLMASQUIM, 2016).

Portanto, as aplicações fotovoltaicas, especialmente aquelas para atividades produtivas, têm um potencial considerável para atender às preocupações ambientais e contribuir para a realização da agricultura sustentável e do desenvolvimento rural. Todas as partes interessadas envolvidas na disseminação e uso desses aplicativos precisam desempenhar suas respectivas funções para atingir esse potencial. Espera-se que as agências de cooperação internacional se comprometam a ajudar os países em desenvolvimento a fazer uso desse potencial, particularmente no processo de promoção da agricultura sustentável e do desenvolvimento rural (LOZANO; TABOADA, 2021).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse contexto, observa-se que a transição energética do setor rural para tecnologias mais sustentáveis é muito importante, priorizando a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, principalmente a energia solar fotovoltaica. Assim, a tecnologia fotovoltaica, além de ser considerada uma energia limpa e renovável, vem sendo um instrumento de desenvolvimento sustentável em diversos setores, elencada como promissora fonte de geração de energia elétrica em muitos países do mundo. Com os governos e os agricultores tendo um olhar mais sustentável,

é evidente que a reparação e a preservação ambiental são indispensáveis para a manutenção da qualidade de vida das próximas gerações.

A inovação da tecnologia fotovoltaica no setor rural brasileiro mostrou que o desenvolvimento sustentável aliado à evolução tecnológica pode ser uma realidade, levando em consideração o grande potencial que o país tem para gerar energia através dessa tecnologia. Nesse sentido, a energia solar vem se tornando uma alternativa interessante para os produtores rurais que desejam reduzir custos nas faturas de energia, aliada às políticas públicas que estão fomentando o segmento através de novas linhas de crédito, facilitando a aquisição e a instalação de sistemas fotovoltaicos e ajudando a ampliar esse mercado.

Os sistemas geradores fotovoltaicos trazem benefícios ambientais, sociais e econômicos ao produtor rural, porém deve ser destacado que na modalidade de GD, o produtor ainda necessita garantir o fornecimento de energia elétrica, pois o sistema gerador fotovoltaico vai auxiliar a diminuir os custos com a energia elétrica, mas não garante o fornecimento. Por isso, mesmo investindo em um sistema fotovoltaico, é recomendável ter um sistema energético emergencial, o qual geralmente é movido a combustível.

Em suma, a flexibilidade e a modularidade dos sistemas geradores fotovoltaicos são elementos de destaque para a aplicação dessa tecnologia na área rural, conseguindo aliar uma alternativa energética renovável e limpa nesse segmento. Além disso, a tecnologia fotovoltaica na modalidade de GD pode trazer viabilidade econômica, social e ambiental, de forma a fomentar o desenvolvimento rural sustentável.

As políticas públicas têm incentivado a aquisição de sistemas fotovoltaicos tanto para grandes produtores rurais quanto para o agricultor familiar por meio de isenções fiscais e linhas de financiamento mais acessíveis. Dessa forma, o acesso à energia e sua redução de custos têm contribuído para a efetivação das tecnologias e têm impactado diretamente na produtividade das atividades rurais. Portanto, as aplicações fotovoltaicas no setor produtivo agrícola têm um potencial considerável para atender às preocupações ambientais e contribuir para o desenvolvimento rural sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R. **Desenvolvimento sustentável: qual a estratégia para o Brasil?** Novos estudos CEBRAP, n. 87, 2010. p. 97-113.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 482.** Brasília: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2023.
- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração: Unidades com Geração Distribuída.** MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 12 fev. 2023.
- AGUIAR JUNIOR, E. A.; PINTO, V. M. Breve avaliação do cenário regulamentar da geração distribuída no Brasil. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, 2017. Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos_17/28625363.pdf. Acesso em: 27 fev. 2023.
- BARBOSA, G. S.; DRACH, P. R. C.; CORBELL, O. D. **Sustentabilidade urbana e desenvolvimento sustentável: uma discussão em aberto.** XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Juiz de Fora, MG, 2012.
- BARBOSA, L. **Sociedade de consumo.** 3. ed. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2010. p. 7-8.
- BARBOSA, W. P. F.; AZEVEDO, A. C. S. **Discussão sobre a minuta de Resolução CONAMA sobre o licenciamento ambiental de usinas eólicas em superfície terrestre.** Belo Horizonte: FEAM, 2013.
- BODNAR, Z.; FREITAS, V. P.; SILVA, K. C. A epistemologia interdisciplinar da sustentabilidade: por uma ecologia integral para a sustentação da casa comum. **Revista Brasileira de Direito**, v. 12, n. 2, p. 59-70, 2016. DOI: <https://doi.org/10.18256/2238-0604/revistadedireito.v12n2p59-70>.
- BOFF, L. **Sustentabilidade: O que é - O que não é.** 5. ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2016.
- CALGARO, C. Desenvolvimento sustentável e consumismo: a busca do equilíbrio entre o homem e o meio ambiente. In: PEREIRA, A. O. K., HORN, L. F. R. **Relações de consumo: meio ambiente.** Caxias do Sul, RS: Educs, 2009. p. 45-72.
- CAMPEN, B.; GUIDI, D.; BEST, G. **Solar photovoltaics for sustainable agriculture and rural development.** Environment and Natural Resources Working Paper No. 2. Roma: FAO, 2000. Disponível em: <https://www.fao.org/uploads/media/Solar%20photovoltaic%20for%20SARD.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2023.
- COSTA, E.; FERREZIN, N. B. ESG (Environmental, Social and Corporate Governance) e a comunicação: o tripé da sustentabilidade aplicado às organizações globalizadas. **Revista Alterjor**, v. 24, n. 2, p. 79–95, 2 ago. 2021.

CRACE, L.; GEHMAN, J. What Really Explains ESG Performance? Disentangling the Asymmetrical Drivers of the Triple Bottom Line. **Organization & Environment**, v. 36, n. 1, p. 150–178, mar. 2023. DOI 10.1177/10860266221079408.

DELGADO, G. C. Especialização primária como limite ao desenvolvimento. **Desenvolvimento em Debate**, UFRJ, Rio de Janeiro, v. 1, n. 2, p. 111-125, 2010. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/dd/article/view/31914>. Acesso em: 27 fev. 2023.

DOVERS, S. R.; HANDMER, J. W. Uncertainty, sustainability and change. **Global Environmental Change**, v. 2, n. 4, p. 262-276, 1992.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Brasília: MME, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 26 fev. 2023.

ETZKOWITZ, H. **The Triple Helix: University-Industry-Government Innovation in Action**. Nova York: Routledge, 2008. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203929605>.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>.

FIORILLO, C. A. P. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro**. 10. ed. São Paulo: Saraiva, 2009.

FREIRE, L. Energias renováveis complementares: benefícios e desafios. **FGV Energia**, Rio de Janeiro, n. 4, p. 6-7, 2015.

FREITAS, M.; FREITAS, M. C. S. **A sustentabilidade como paradigma: cultura, ciência e cidadania**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2016. p. 16.

GIACOMINI FILHO, G. **Meio ambiente e consumismo**. São Paulo: SENAC, 2008. p. 118.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Solar Resource Map: Photovoltaic Power Potential**. 2019. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download/world>. Acesso em: 27 fev. 2023.

GONÇALVES, P. **A cultura do supérfluo: lixo e desperdício na sociedade de consumo**. Rio de Janeiro: Garamond, 2011. p. 59.

GRANZIERA, M. L. M.; REI, F. (Ed.). **Energia e meio ambiente: contribuições para o necessário diálogo**. Santos, SP: Editora Universitária Leopoldianum, 2015.

IDR-PARANÁ (Instituto De Desenvolvimento Rural Do Paraná IAPAR EMATER). **Chamada Pública Energia Solar**. Curitiba: SEAB-PR, 2021. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Chamada-Publica-Energia-Solar>. Acesso em: 03 mar. 2023.

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. WMO/UNEP, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 27 fev. 2023.

LOZANO, L.; TABOADA, E. B. The Power of Electricity: How Effective Is It in Promoting Sustainable Development in Rural Off-Grid Islands in the Philippines? **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2705, 9 maio 2021. DOI: 10.3390/en14092705.

MARGOLIN, V. O design e a situação mundial. **Revista Arcos**, UERJ/ESDI, Rio de Janeiro, v. 1, 1998.

MATIAS, E. F. P. **A humanidade contra as cordas**: a luta da sociedade global pela sustentabilidade. São Paulo: Paz e Terra, 2014. p. 55.

MELO, S. W. C. **Desenvolvimento rural no Cerrado, desenvolvimento e envolvimento das famílias agroextrativistas**. Guaju, Matinhos, PR, v. 3, n. 1, p. 111-131, 2017. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/guaju/article/view/51522/32965>. Acesso em: 27 fev. 2023.

NASCIMENTO, E. P. Trajetória da sustentabilidade: do social ao ambiental, do ambiental ao econômico. **Estudos Avançados**, USP, 26, p. 51-64, 2012.

NAVARRO, Z. Desenvolvimento rural no Brasil: os limites do passado e os caminhos do futuro. **Revista Estudos Avançados**, v. 16, n. 44, p. 83-100, 2001.

OLIVEIRA FILHO, J. E. Gestão ambiental e sustentabilidade: um novo paradigma eco-econômico para as organizações modernas. **Rev. Teor. Pol. Soc. Ciudad.**, Salvador, v. 1, n. 1, p. 103-125, jan./jun. 2004.

NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. UNIC Rio, set. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 10 fev. 2023.

PAZZINI, L. H. A.; RIBEIRO, F. S.; KURAHASSI, L. F.; GALVÃO, L. C. R.; PELEGRINI, M. A.; AFFONSO, O. F. Luz para todos no campo: a universalização do atendimento de energia elétrica na zona rural brasileira. **Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural**, UNICAMP/NIPE, Campinas, 2002.

PINHO, J. T., GALDINO, M. A. (Ed.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

PLOEG, J. D. van der. Trajetórias do desenvolvimento rural: pesquisa comparativa internacional. **Sociologias**, Porto Alegre, v. 13, n. 27, p. 114-140, 2011.

SACHS, W. **Meio Ambiente**. Dicionário do desenvolvimento: guia para o conhecimento como poder. Petrópolis: Vozes, 2000. p. 117-131.

SCHMIED-KOWARZIK, W. **A relação dialética do homem com a natureza**: Estudos histórico-filosóficos sobre o problema da natureza em Karl Marx. Cascavel, PR: EDUNIOESTE, 2019.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Brasília: Sebrae, 2018. Disponível em:

<https://m.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/Cadeia%20de%20Valor%20da%20Energia%20Solar%20Fotovoltaica%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2023.

SHRIVASTAVA, P. The role of corporations in achieving ecological sustainability. **Academy of Management Review**, v. 20, n. 4, p. 936-960, 1995.

SILVA, N. L. S. **Estudo da sustentabilidade e de indicadores de desenvolvimento rural**. 2007. 271 f. Tese (Doutorado) – Programa pós-graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2007.

SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado, 2015. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/textos-para-discussao/td166>. Acesso em: 27 fev. 2023.

SILVA JUNIOR, R. D.; FERREIRA, L. C. Sustentabilidade, entre Ecologia e Sociologia. **Estudos De Sociologia**, Araraquara, SP, v. 18, n. 35, p.421-439, 2013.

TILMISINA, G.; KURDGELASHVILI, L.; NARBEL, P. A review of solar energy: markets, economics and policies. **Policy Research Working Paper**, p. 1-49, 2011.

TOLMASQUIM, M. T. (Ed.). **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

VAN ITTERSUM, M. K.; EWERT, F.; HECKELEI, T.; WERY, J.; OLSSON, J. A.; ANDERSEN, E.; BEZLEPKINA, I.; BROUWER, F.; DONATELLI, M.; FLICHMAN, G.; OLSSON, L.; RIZZOLI, A. E.; VAN DER WAL, T.; WIEN, J. E.; WOLF, J. Integrated assessment of agricultural systems - a component-based framework for the European Union (SEAMLESS). **Agricultural Systems**, v. 96, n. 1-3, p. 150-165, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.07.009>.

VEIGA, J. E. **O Brasil rural precisa de uma estratégia de desenvolvimento**. Texto para Discussão nº 01. Brasília, 2001.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Editora Garamond, 2005.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015.

3 DESAFIOS DO DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL EM IPORÃ-PR: INFLUÊNCIAS NA IMPLEMENTAÇÃO E PRODUTIVIDADE DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE RURAL

RESUMO

O acesso à energia elétrica é um dos avanços mais importantes no desenvolvimento socioeconômico e contribui com a melhoria das condições de vida das populações rurais. Este estudo visou entender como os sistemas fotovoltaicos contribuem com os empreendimentos rurais e expor detalhes importantes de sua instalação e funcionamento no ambiente rural. O presente artigo teve por objetivo elucidar os aspectos técnicos mais relevantes de implementação e de produtividade dos sistemas fotovoltaicos em Geração Distribuída que desafiam o setor rural do município de Iporã-PR. Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa com dados secundários de órgãos governamentais, com observações feitas nos imóveis rurais do município e com o levantamento de dados primários, discutindo e corroborando essas informações com pesquisas bibliográficas de abordagem qualitativa e referencial teórico. Como resultados, evidenciou-se as dificuldades de utilização elétrica e conexão fotovoltaica nas redes monofásico rural, comparando-as com a rede trifásica. Também foi ilustrado o avanço das conexões fotovoltaicas no município estudado, evidenciando as características que mais influenciaram nesse desenvolvimento. Ainda, foram identificados alguns dos principais itens que influenciam a efetividade e produtividade dos sistemas fotovoltaicos, como: as características da rede elétrica rural, a previsão de irradiação solar, o posicionamento fotovoltaico, conexão em Geração Distribuída, existência de sombreamentos, rendimento pelo design de instalação, acúmulo de sujeira e compatibilidade dos dispositivos fotovoltaicos. Conclui-se ressaltando a importância de levar em consideração as condições específicas do ambiente rural para realizar não só o correto dimensionamento do projeto, mas também de realizar as adequações necessárias.

Palavras-Chave

Perdas fotovoltaicas; energia na agricultura; energias renováveis; energia solar; geração distribuída.

CHALLENGES OF SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT IN IPORÃ-PR (BRAZIL): INFLUENCES ON THE IMPLEMENTATION AND PRODUCTIVITY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

ABSTRACT

Access to electricity is one of the most important advances in socioeconomic development and contributes to improving the living conditions of rural populations. Photovoltaic systems contribute in several ways to rural enterprises and this study aimed to understand and expose important details of these systems installed in the rural environment. The objective of this study is to elucidate the technical aspects that challenge and influence the implementation and productivity of photovoltaic systems in Distributed Generation in the rural sector of the municipality of Iporã-PR. This work

was developed through a bibliographic research with a qualitative approach and theoretical framework, corroborated with secondary data from government agencies, with observations made in rural properties in the municipality and in the survey of primary data. As a result, some of the main items that influence the effectiveness and productivity of photovoltaic systems were identified, such as: the characteristics of the rural electrical network, the forecast of solar radiation, photovoltaic positioning, connection in Distributed Generation, existence of shading, yield by design installation, accumulation of dirt and compatibility of photovoltaic devices. It concludes by emphasizing the importance of taking into account the specific conditions of the rural environment to carry out not only the correct dimensioning of the project, but also to carry out the necessary adaptations.

Keywords

Photovoltaic losses; energy in agriculture; renewable energy; solar energy; distributed generation.

3.1 INTRODUÇÃO

O acesso à energia elétrica é um dos avanços mais importantes no desenvolvimento socioeconômico e tende a contribuir com a melhoria das condições de vida das populações rurais. Desse modo, os usos produtivos da eletricidade proporcionam elevação de produtividade agrícola e promoção de igualdade. Além disso, a disponibilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia são apontadas como parâmetros cruciais para incentivar o uso significativo e prolongado de energia elétrica entre os consumidores rurais (LOZANO; TABOADA, 2021).

A expansão elétrica no meio rural precisa ser realizada de modo que ela promova o Desenvolvimento Sustentável de forma eficiente. Assim, a importância da eletrificação se reflete nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, de modo a buscar por um mundo onde o meio ambiente humano seja seguro, resiliente e sustentável, e onde exista acesso universal à energia de custo razoável, confiável e sustentável, com maior uso de energias renováveis (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

A energia solar é uma das fontes disponíveis mais abundantes e sua transformação direta em energia elétrica hoje é possível através dos sistemas de energia solar fotovoltaicos, convertendo diretamente a radiação solar em corrente elétrica (TWIDELL; WEIR, 2015). Entretanto, sua disponibilidade é intermitente, ou seja, está disponível em um período do dia e varia de acordo com as condições climáticas (YIN; MOLINI; PORPORATO, 2020). Assim, a conexão à rede desses

sistemas proporciona que a unidade consumidora utilize tanto a energia produzida pelo sistema fotovoltaico quanto a energia já recebida pela companhia de energia.

Foi com a Resolução Normativa (RN) nº 482 (ANEEL, 2012) que os sistemas de geração com fontes renováveis de energia puderam se conectar à rede das companhias de energia, em uma modalidade de compensação de créditos energéticos chamada Geração Distribuída (GD). Desse modo, a energia solar fotovoltaica teve excelente compatibilidade com a GD brasileira, a qual permitiu sua instalação em diversos setores da economia, tornando-se a fonte renovável mais utilizada nessa modalidade e a fonte com maior potencial de aderência para os próximos anos devido à sua modularidade, confiabilidade e incentivos fiscais (ANEEL, 2022; EPE, 2022; INEE, 2017).

A energia solar fotovoltaica criou raízes sólidas no Brasil com empreendimentos tanto em usinas de grande porte quanto em GD e hoje está inserida em todos os setores da economia, com grande participação do setor rural (ANEEL, 2023a). Entretanto, o ritmo de adesão foi diferente em cada setor e em cada microrregião e, dessa forma, faz-se necessário compreender as situações específicas dos empreendimentos fotovoltaicos em áreas rurais.

Observa-se que os empreendimentos fotovoltaicos rurais do Estado do Paraná possuem algumas peculiaridades próprias. Dessa forma, o município de Iporã-PR foi colocado nesse estudo como um dos exemplos da realidade encontrada nos municípios paranaenses. Assim, esse trabalho estrutura-se em uma pesquisa exploratória baseada na análise bibliográfica sobre as influências na implementação e na produtividade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede rural, em conjunto com dados secundários coletados de órgãos governamentais, com observações e levantamento de dados primários nos imóveis rurais do município, além de experiências profissionais dos autores.

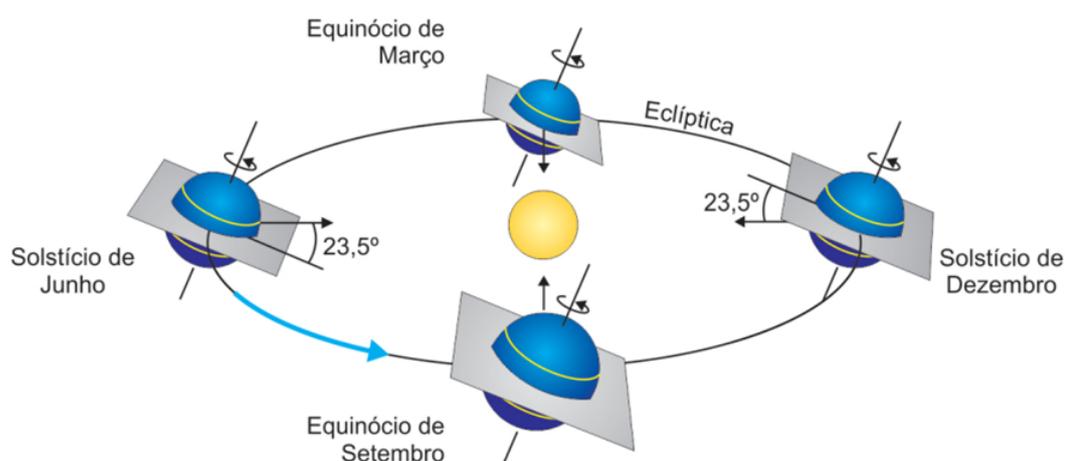
O estudo visou entender e expor os detalhes mais importantes sobre os sistemas fotovoltaicos instalados no ambiente rural. Assim, foram expostas e discutidas algumas das questões sobre eletrificação rural, tecnologia fotovoltaica, conexão em GD, além dos desafios de implementação e produtividade enfrentados na área rural. Sendo assim, o presente artigo teve por objetivo elucidar os aspectos técnicos mais relevantes de implementação e de produtividade dos sistemas fotovoltaicos em Geração Distribuída que desafiam o setor rural do município de Iporã-PR.

3.2 REFERENCIAL TEÓRICO

3.2.1 Irradiação solar e orientação dos módulos fotovoltaicos

A irradiação solar que atinge a superfície terrestre varia conforme fenômenos astronômicos e atmosféricos e é variável de acordo com a localização. Naturalmente, a luz solar aumenta de intensidade ao longo da manhã e se reduz ao longo da tarde em razão do movimento de rotação do planeta. Além disso, o movimento de translação da Terra, ilustrado na Figura 3.1, junto da variação da distância da Terra ao Sol e da inclinação do eixo da Terra de $23,5^\circ$, definindo o movimento aparente do sol e os equinócios e solstícios, criando as estações do ano terrestre (OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2017).

Figura 3.1 – Posições relativas do sistema terra-sol durante uma revolução terrestre completa ao redor do Sol



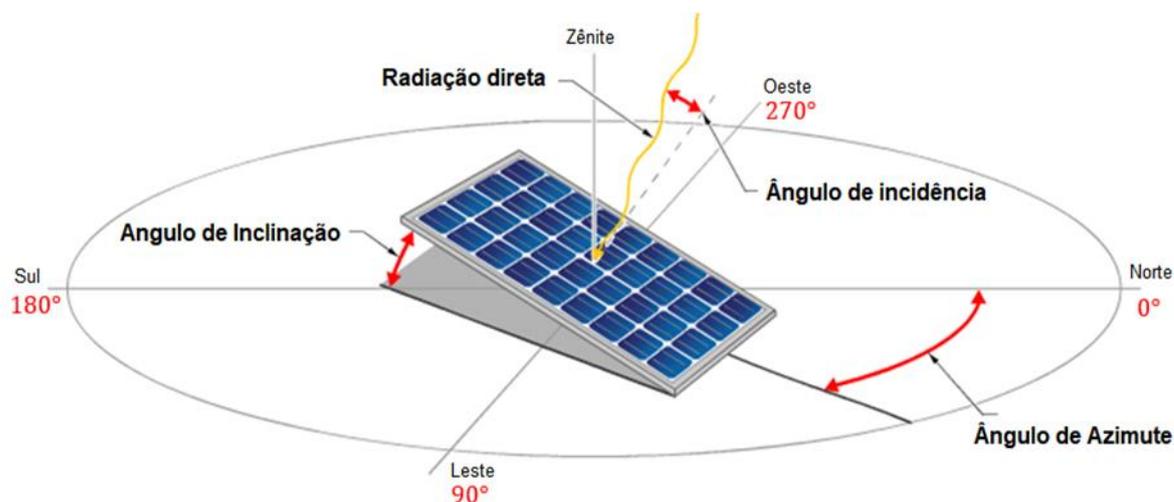
Fonte: OLIVEIRA FILHO; SARAIVA (2017).

Os movimentos em conjunto influenciam diretamente na intensidade de irradiação solar e na quantidade de horas de Sol de forma diferente em cada porção terrestre, impactando diretamente na produtividade fotovoltaica. Assim, os dias mais longos e com maior irradiação solar estão no período mais próximo ao solstício de verão de cada hemisfério, fornecendo uma maior quantidade de energia aproveitável (TWIDELL; WEIR, 2015; OLIVEIRA FILHO; SARAIVA, 2017).

Nos sistemas de geração de energia solar, o módulo fotovoltaico é orientado conforme um ângulo de inclinação e um ângulo azimutal, ilustrado na Figura 3.2. O ângulo de inclinação é o arco medido da placa sobre o plano terrestre, variando de 0°

(rente ao plano) até 90° (perpendicular ao plano). Já o ângulo azimutal é o arco medido sobre o horizonte, no sentido horário e com origem no ponto cardeal Norte, variando de 0° a 360° (TWIDELL; WEIR, 2015).

Figura 3.2 – Posicionamento de um módulo de energia solar



Fonte: SOLAR-ENERGIA (2016).

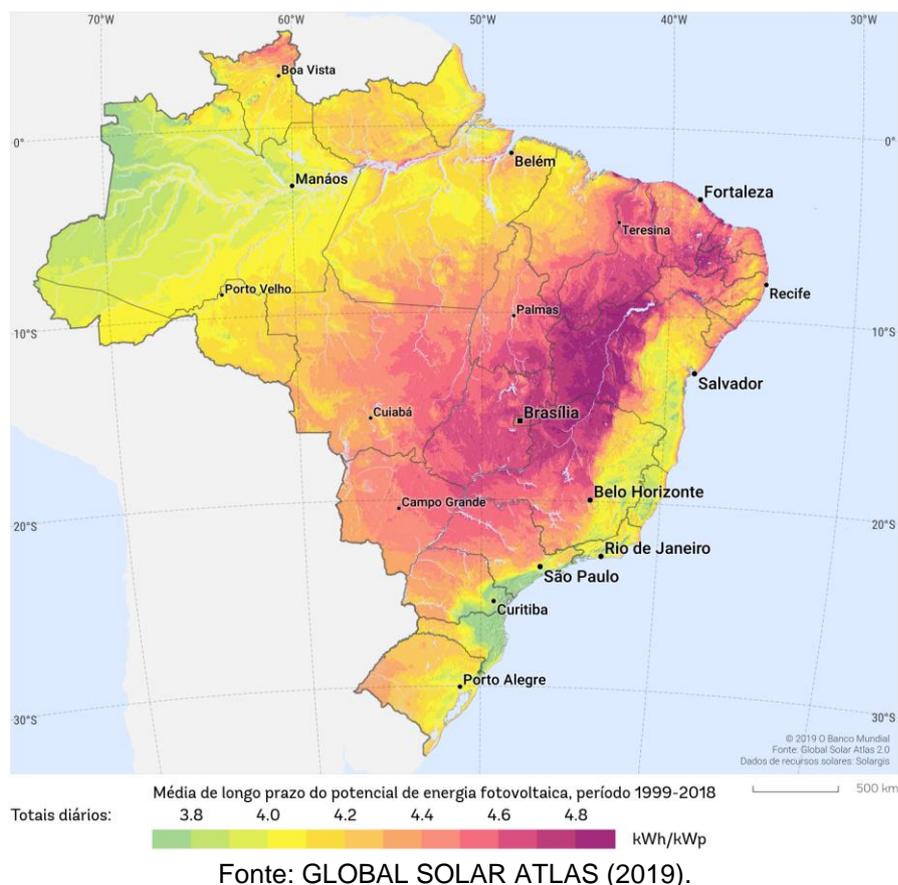
A radiação direta é a mais importante das componentes da irradiação solar. Quanto menor o ângulo de incidência que a radiação direta faz com o plano do módulo fotovoltaico, maior é o aproveitamento energético (PINHO; GALDINO, 2014). Além disso, a latitude do local de instalação influencia muito na produtividade e na escolha da melhor orientação dos módulos fotovoltaicos, visto que locais com maiores latitudes tendem a ter maior redução na produção nos meses de outono e inverno (VILLALVA, 2015).

A irradiação solar pode ser desviada ou absorvida por partículas suspensas de vapor de água, dióxido de carbono, ozônio e poeira, presentes na atmosfera. Desse modo, observa-se a evidente redução na irradiação solar em dias nublados ou chuvosos. Assim, a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos também depende das condições meteorológicas e de posicionamento geográfico, evidenciando a necessidade do estudo solarimétrico sobre o local de instalação (VILLALVA, 2015).

Sabe-se que quanto maior a latitude do local de instalação do sistema fotovoltaico, maior será a influência das estações do ano e maior a tendência a ter menos produtividade energética (NÓBREGA *et al.*, 2018). Mesmo o Paraná estando sua maioria entre as latitudes -23° e -26° , suas porções Norte, Noroeste e Oeste

possuem ótimos índices de produtividade fotovoltaica devido às suas condições climáticas, assim como pode ser observado na Figura 3.3.

Figura 3.3 – Mapa do potencial de energia fotovoltaica no Brasil



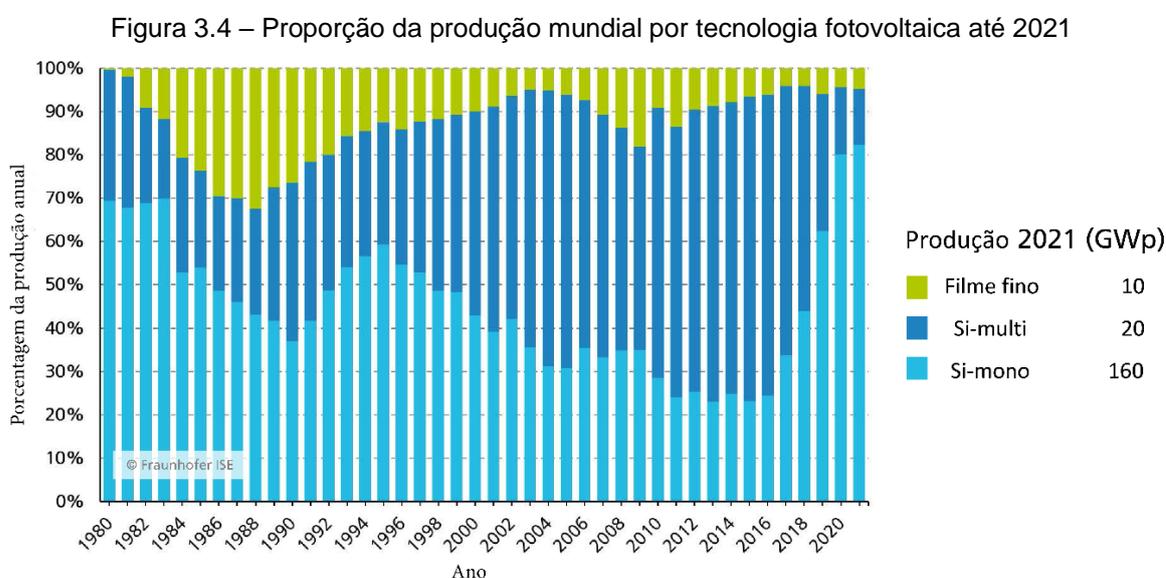
Mesmo com altas médias de irradiação solar no Brasil, é importante avaliar o caráter intermitente dessa fonte energética, no qual há previsões diárias de produção de energia. Entretanto, deve-se considerar as flutuações da radiação solar em razão do clima de cada região e as tendências das mudanças climáticas futuras de modo a ampliar a confiabilidade de produção de energia fotovoltaica (YIN; MOLINI; PORPORATO, 2020).

3.2.2 Tecnologia fotovoltaica

A conversão direta da energia da luz solar em energia elétrica ocorre por meio dos materiais semicondutores devido ao efeito fotovoltaico. Essa conversão da luz em energia elétrica é feita com base na construção das células solares, que geralmente

utilizam silício. Assim, a célula solar é um dispositivo utilizado para produção de eletricidade que converte os fótons de maneira silenciosa e sem emissão de gases (VILLALVA, 2015).

A primeira geração das tecnologias atualmente empregadas na fabricação dos módulos fotovoltaicos é composta pelos materiais silício monocristalino e silício policristalino. Com o avanço de estudos e investimentos ao longo dos anos, essas tecnologias encontram-se agora consolidadas, com longa vida útil, alta confiabilidade e ótimo custo-benefício, ocupando mais de 90% do mercado fotovoltaico e oferecendo garantia de rendimento de 25 anos (FRAUNHOFER ISE, 2022). A Figura 3.4 destaca a atual liderança mundial da fabricação do módulo de silício monocristalino em comparação com as demais tecnologias.



Fonte: FRAUNHOFER ISE (2022).

Logo, o uso crescente da geração fotovoltaica despertou o estudo de outros materiais e tecnologias. Contudo, as condições de fabricação, comercialização e utilização não tornaram essas outras tecnologias viáveis para o mercado e atualmente ainda não se encontram sob considerável utilização para geração de energia elétrica em relação às de primeira geração (FRAUNHOFER ISE, 2022; PINHO; GALDINO, 2014).

Os módulos fotovoltaicos cristalinos possuem quantidades e formatos de células adequados para cada finalidade. Para as utilizações conectadas à rede, os inversores possuem Rastreador de Ponto de Máxima Potência (MPPT) e, portanto, os

valores operacionais de tensão e corrente de cada módulo podem ser maximizados. Assim, os módulos para conexão com a rede são maiores e com tensão mais elevada, mas os inversores devem ser compatíveis com as configurações de tensão e corrente das strings utilizadas (JÄGER *et al.*, 2016).

Como os módulos fotovoltaicos geram energia em corrente contínua, eles são agrupados em *strings* e conectados a inversores fotovoltaicos para que se possa realizar a conexão com a rede de corrente alternada (JÄGER *et al.*, 2016). Essas *strings* são conectadas ao inversor por meio de um par de cabos especiais com proteção UV, um vermelho para o positivo e um preto para o negativo, com conectores MC4 para conexão entre os módulos e o inversor (ULIANA, 2018).

3.2.3 Geração Distribuída

A Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL foi o marco regulatório para que a utilização de energia solar fotovoltaica se desenvolvesse no Brasil, pois permitiu aos consumidores realizarem a troca da energia gerada com a da rede elétrica, criando as regras para sistema que compensa o consumidor pela energia elétrica injetada na rede (ANEEL, 2012; RÜTHER; MIGHELÃO; HAHN, 2018).

A RN nº 517 de 2012 participou na regulamentação do processo de injeção e consumo de energia elétrica, criando-se o sistema de compensação de energia elétrica. Desse modo, a compensação funcionou por meio de empréstimo gratuito da energia à distribuidora local, para compensação posterior do consumo de energia elétrica dentro das possibilidades vigentes regulamentadas (ANEEL, 2012).

Em 2015, o regulamento foi aprimorado pela RN nº 687, tornou o processo de conexão mais rápido, melhorou o sistema de créditos e flexibilizou a distribuição de créditos entre as unidades consumidoras através de novas modalidades de compensação energética. A RN nº 687 prolongou o prazo de validade dos créditos energéticos, podendo ser compensados em meses posteriores por um prazo de até 5 anos (ANEEL, 2012).

Todo esse processo auxiliou a tornar a matriz energética mais diversificada no país, incluindo novas formas de aproveitamento energético renovável (ANEEL, 2022; ANEEL, 2023a). Além disso, o Instituto Nacional de Eficiência Energética afirma

que a modalidade de GD é vantajosa, pois economiza investimentos em transmissão e reduz as perdas (INEE, 2017).

Ao longo do tempo foram realizadas modificações na RN nº 482, fomentando a utilização da GD no Brasil, até a criação da Lei 14.300/22 (BRASIL, 2022) que institui definitivamente a micro e minigeração de energia e, na sequência, a nova RN nº 1.059 (ANEEL, 2023b) foi criada com base na nova lei e revoga todo o conteúdo da antiga RN nº 482. A vigência da RN nº 482 até a criação da nova lei a quantidade de unidades consumidoras que realizaram conexões em GD cresceu em diversos setores e regiões do país.

A nova Lei e a nova normativa da energia solar instituíram novas regras e alicerça o uso de energias renováveis em GD no Brasil, principalmente a energia solar. Algumas dessas regras retrocedem fomentos já estabelecidos, tal qual foi a implementação da parcela que corresponde à Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) Fio B que, para os novos sistemas, agora fica retida antes da compensação dos créditos produzidos (SOLARIZE, 2022). Outra dificuldade está ocorrendo sobre o caso específico dos optantes de tarifação grupo B com transformadores de 112,5kVA, que foram impedidos de enviar e receber crédito.

Entretanto, a nova Lei e a nova normativa também trouxeram benefícios à GD. Uma dessas vantagens, é que a energia injetada não deve ser mais descontada da faixa do custo de disponibilidade e passa a ser válida também para os sistemas já existentes (SOLARIZE, 2022). Outra vantagem é a tarifa especial para Demanda Contratada para os casos de exclusiva geração compartilhada, com preço reduzido.

Como a geração de energia através de módulos solares fotovoltaicos funciona somente durante os horários de incidência solar, a conexão com a concessionária permite que a energia excedente de produção seja injetada na rede e, posteriormente, compensada da energia comumente recebida durante a noite ou em dias chuvosos. Assim, a conexão com a rede por meio da GD, com sistemas do tipo grid-tie, aprimora e otimiza a compensação energética e, na maioria dos casos, dispensa o uso de baterias no sistema (ANEEL, 2022, PINHO; GALDINO, 2014).

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 Caracterização da pesquisa

A pesquisa visou analisar os aspectos técnicos relacionados à implementação e à produtividade dos sistemas fotovoltaicos. O foco foi exemplificar alguns dos itens que mais influenciam ou desafiam essa tecnologia no âmbito rural. A análise foi delimitada aos sistemas fotovoltaicos que são oficialmente conectados à rede da companhia de energia local.

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa com dados secundários de órgãos governamentais, com observações feitas nos imóveis rurais do município e com o levantamento de dados primários, discutindo e corroborando essas informações com pesquisas bibliográficas de abordagem qualitativa e referencial teórico.

Buscou-se avaliar as influências na implementação e na produtividade dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede rural, em conjunto com observações e levantamento de dados nos imóveis rurais do município, além de experiências profissionais dos autores. O município de Iporã foi tratado nesse estudo como um dos exemplos da realidade encontrada nos municípios paranaenses e foi escolhido devido a ser um município agropecuário de destaque na região Noroeste do Paraná.

O início da pesquisa avaliou as situações encontradas nas redes de eletrificação rural, nas quais são conectados os sistemas fotovoltaicos. Foram descritas as dificuldades e melhorias que são observadas na maioria das situações em propriedades rurais. Em seguida, destaca-se o avanço na inserção de sistemas fotovoltaicos no município, apresentando dados em estatística descritiva e explicando as motivações das questões observadas.

Por fim, são expostas algumas das situações que mais desafiam a tecnologia fotovoltaica no âmbito rural. Os problemas mais comuns foram discutidos e relacionados à literatura, apontando sugestões de possíveis soluções e comentando sobre o tema. Assim, comentou-se sobre a possibilidade de problemas nos equipamentos, na instalação, na disposição e na manutenção, exemplificando também as perdas de produção de energia mais recorrentes nos empreendimentos rurais.

3.3.2 Método da simulação de produtividade de energia anual normalizada de sistema fotovoltaico

Um desses desafios enfrentados no caso estudado, relaciona-se com o posicionamento do arranjo fotovoltaico, tanto antes da implementação do sistema quando depois para averiguar sua efetividade. A fim de ter um parâmetro para auxiliar na análise do estudo proposto, elaborou-se uma tabela contendo valores em porcentagem de possíveis posicionamentos fotovoltaicos, de modo a corroborar as afirmações a respeito das melhores condições de disposição em telhados ou no solo.

O software utilizado foi o *System Advisor Model* – SAM (NREL, 2022), o qual é gratuito e de código aberto. Ele consegue realizar simulações de produção energética para sistemas fotovoltaicos, levando em consideração uma variedade de aspectos. A simulação de cada situação demora uma média de 15 minutos e expõe dados precisos como resultados, mas específicos para cada configuração escolhida.

O método de desenvolvimento dessa tabela foi elaborado por Nóbrega *et al.* (2018), no qual realizou-se simulações com um sistema de potência e demais características fixas, utilizando dados solarimétricos do município investigado. Desse modo, o ângulo de inclinação e o ângulo de orientação azimutal do arranjo fotovoltaico foram alterados para cada simulação, a fim de obter a produção anual de energia em cada caso.

O resultado de cada simulação foi normalizado com base na simulação com maior produção, ou seja, orientada nas melhores características, e foram dispostos em uma tabela. As simulações foram realizadas com um valor de potência de um sistema fotovoltaico de 10kWp, mas que, com a normalização, os resultados refletem perfeitamente para os demais casos com sistemas menores ou maiores em microgeração distribuída.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 A eletrificação e o desenvolvimento rural

Até o ano de 2002 existiam cerca de 2,5 milhões de domicílios no Brasil sem acesso à energia elétrica, dos quais 80% estavam localizados no meio rural (IBGE, 2002). A partir daí, o governo federal começou a estruturar um enfrentamento com a

exclusão elétrica no país com base na Lei Federal 10.438 de 2002 e no Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica de 2003.

Dessa maneira, o avanço na eletrificação rural nacional ocorreu com mais de 3,5 milhões de ligações, beneficiando aproximadamente 16,8 milhões de pessoas. Dessa maneira, o acesso à energia elétrica é capaz de ampliar as oportunidades de mudança social e econômica ao possibilitar o uso de dispositivos elétricos para iluminação, comunicação, serviços públicos, saúde, educação, informação e melhoria nos processos produtivos da população (FERREIRA; SILVA, 2021).

A distribuição de energia elétrica no Brasil acontece, em sua grande maioria, por meio de redes trifásicas de média tensão usando três condutores alimentando transformadores rebaixadores, para consumo em redes trifásicas de baixa tensão com neutro usando quatro condutores (COPEL, 2022a).

Todos os Estados do Brasil têm como padrão a distribuição de energia com frequência de 60 Hz, mas a entrega de energia ao consumidor tem sua tensão elétrica decidida entre 127 V ou 220 V fase-neutro, sob critério de cada Estado. Assim, hoje utilizam em baixa tensão de 127 V fase-neutro o Paraná e outros 13 Estados, além de diversas cidades em outros estados em condição de exceção (BORGES, 2019).

Entretanto, as dificuldades de se implementar novas linhas de distribuição nas zonas rurais brasileiras fizeram com que o atual modelo fosse repensado. Nesse embasamento, o governo nacional e, inclusive, o governo paranaense aprovaram uma alternativa, a fim de ampliar os índices de eletrificação rural no Brasil, a utilização de sistemas monofásicos utilizando distribuição via sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT) (BERTOLLO, 2008).

Observa-se que o sistema MRT é mais barato que o sistema trifásico por reduzir investimentos com estruturas e cabeamento ao utilizar apenas um ou dois fios na rede de distribuição em média tensão. Deste modo, mesmo os sistemas trifásicos sendo mais estáveis e permitirem a utilização de motores mais robustos e eficientes, a utilização do sistema MRT tornou-se comum e ampla no Paraná de modo a atender imóveis rurais mais distantes ou de menor consumo (BERTOLLO, 2008).

Conforme a própria COPEL (2020) expõe em sua Norma Técnica, o sistema MRT entrega tensão de 127 V fase-neutro e 254 V fase-fase aos clientes e é classificado como Monofásico Rural, diferente do sistema trifásico que entrega 127 V fase-neutro e 220 V fase-fase. Sendo assim, essa maior tensão traz conflitos na utilização de equipamentos elétricos do padrão nacional 220 V que, dependendo do

caso, pode ocorrer a queima destes dispositivos. Além disso, o sistema MRT necessita de um aterramento muito eficiente e seguro para conduzir corrente do circuito, elevando riscos em casos de instabilidade no sistema de distribuição, sob descargas atmosféricas ou sob a possibilidade de rompimento do condutor do aterramento (BERTOLLO, 2008).

Com intuito de sanar esse problema das entradas de energia do tipo Monofásico Rural, foram implementados os sistemas do tipo bifilar, utilizando dois fios da rede de média tensão até o transformador (COPEL, 2020). Na Figura 3.5 estão expostas uma entrada de energia utilizando o sistema Monofásico Rural com dois fios do lado esquerdo e do lado direito uma entrada de energia, utilizando o sistema Trifásico, ambos em rede de média tensão de 13,5 kV. Assim, as entradas MRT estão sendo substituídas e a eletrificação rural do Paraná está melhorando em termos de segurança, eficiência e capacidade.

Figura 3.5 – Padrões de Entrada do tipo monofásico rural à esquerda e trifásico à direita em imóveis rurais de Iporã-PR



Fonte: Os autores (2022).

Deste modo, o programa Paraná Trifásico foi implementado como política pública em 2020 e já construiu milhares de quilômetros de redes trifásicas no estado, mas que ainda não chegou a todos os imóveis rurais. O objetivo do programa é substituir a maior parte da rede monofásica existente por rede trifásica, utilizando cabos protegidos e com resistência reforçada. As novas redes de distribuição tendem

a possuir maior capacidade de transferência de energia e mais caminhos, de modo a promover segurança energética caso haja desligamento em alguma das redes. Ainda, as redes trifásicas devem permitir que tecnologias avançadas sejam instaladas e integradas ao restante das redes da companhia (COPEL, 2022).

Como a matriz energética brasileira é basicamente hidrelétrica, o país sofre muitos prejuízos econômicos e ambientais em períodos de seca, tendo que ativar usinas termoelétricas movidas a combustíveis fósseis que, além de ter custos elevados, tem maior grau poluente. Nesse caso, o custo com energia elétrica tem incremento de valor e leva o governo a adotar cobrança de taxas extras nas contas de energia elétrica intituladas de bandeiras tarifárias (verde, amarela, vermelha patamar 1, vermelha patamar 2 e escassez hídrica), trazendo mais prejuízos econômicos aos consumidores de todos os setores, inclusive o rural (ANEEL, 2023a; ULIANA, 2018).

Além do custo com utilização, os produtores rurais sofrem com as instabilidades do fornecimento de energia, principalmente em condições climáticas adversas. Assim, a alternativa atualmente mais viável e acessível aos produtores rurais é a utilização de um grupo gerador a óleo diesel, como demonstrado na Figura 3.6, servindo assim de *backup* elétrico emergencial (NOGUEIRA *et al.*, 2022). Entretanto, o funcionamento desse tipo de geração de energia produz alto ruído e utiliza combustível fóssil com alto índice de emissões, em especial CO₂. Além disso, o custo com a aquisição e manutenção do equipamento e o aumento no custo do diesel têm reduzido a rentabilidade produtiva.

A COPEL (2023) registrou reajuste de 9,89% no custo de energia para começar a valer no início do ano de 2023. O custo mais elevado da eletricidade, somado à presença de instabilidade do sistema elétrico nacional impõem um problema aos produtores rurais. Sendo assim, observa-se a necessidade dos produtores rurais em reduzir os custos de produção com o consumo energético que hoje é indispensável e em encontrar soluções para a perda de produção nos casos de falta de energia da concessionária (IPCC, 2022).

Figura 3.6 – Grupo gerador a diesel como backup elétrico emergencial de um imóvel rural de Iporã-PR



Fonte: Os autores (2022).

Portanto, a energia elétrica foi associada desde o início às questões relacionadas ao desenvolvimento e atualmente ela é utilizada como indicador de desenvolvimento, servindo de parâmetro para avaliar o desenvolvimento sustentável. Mas, apesar da dificuldade de se eletrificar as zonas rurais, a adoção de medidas governamentais e a mudança na forma como as concessionárias atuam auxiliaram na melhora dos índices de eletrificação rural no Brasil e no Paraná (GUTIERREZ; GONÇALVES; LUQUETTI, 2016).

3.4.2 Sistemas fotovoltaicos rurais em Geração Distribuída

O suprimento adequado de energia proporciona a melhoria da qualidade de vida e, desse modo, a produção distribuída de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos contribui com um modo de vida mais sustentável nas áreas rurais (VILLALVA, 2015). A Figura 3.7 apresenta um imóvel rural em Iporã-PR com criação e comércio de peixes, o qual consome muita energia com aeradores da piscicultura, com os equipamentos do restaurante, com as residências e com iluminação. Atualmente, esse consumo é compensado em grande parte pelo sistema de geração de energia solar fotovoltaica.

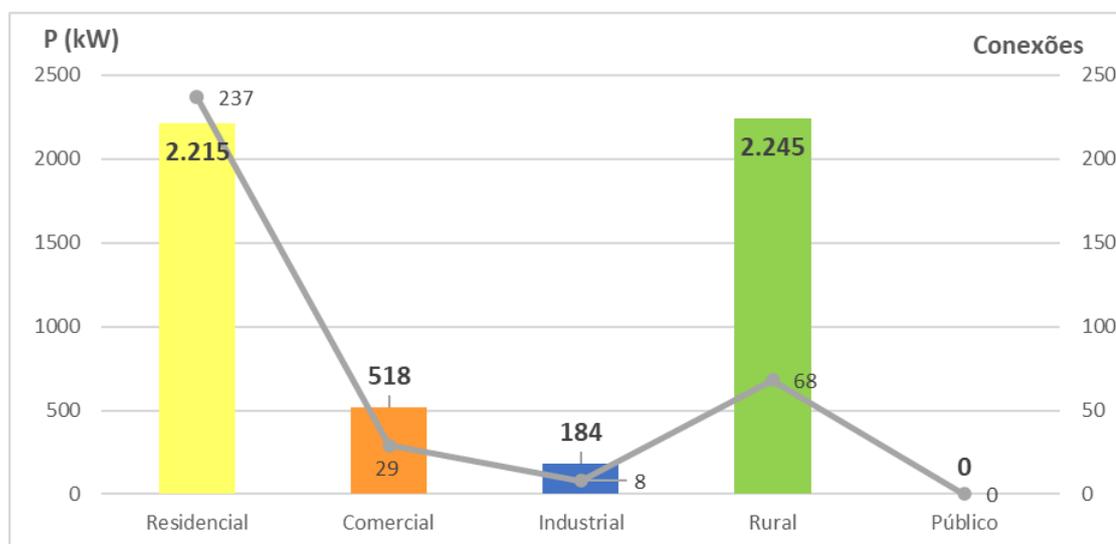
Figura 3.7 – Imóvel rural com piscicultura e restaurante com sistema fotovoltaico monocristalino conectado à rede em Iporã-PR



Fonte: Os autores (2022).

A Figura 3.8 demonstra a capacidade produtiva da energia solar fotovoltaica no setor rural do município de Iporã-PR em comparação com os demais setores, evidenciando a viabilidade e a aceitação desse tipo de empreendimento nas propriedades rurais do município. Observa-se que a quantidade de conexões na área rural é menor do que a da área residencial, mostrando que as instalações fotovoltaicas na área rural são de maior potência.

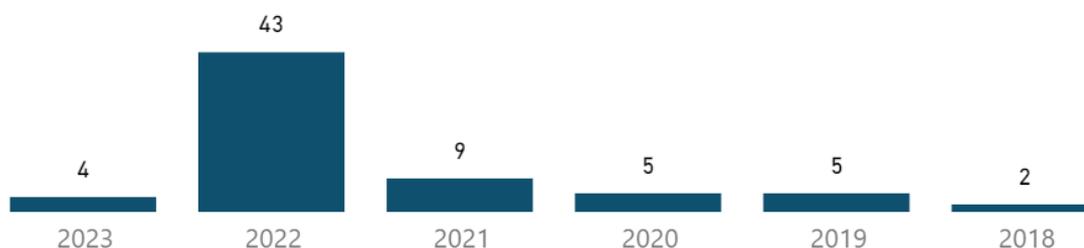
Figura 3.8 – Potência instalada e quantidade de conexões por setor de sistemas fotovoltaicos em GD no município de Iporã-PR



Fonte: Os autores (2023); elaborado com dados da ANEEL (2023a).

A implementação de sistemas fotovoltaicos demorou um pouco mais para se efetivar na área rural, inclusive em municípios menores como Iporã-PR. Muitas conexões se deram no ano de 2022, conforme o gráfico da Figura 3.9. O principal motivo foi efetividade e vigência do Programa Paraná Energia Rural Renovável – RenovaPR com isenções de impostos e de taxas de juros para produtores rurais (PARANÁ, 2021). Já o segundo motivador foi a Lei 14.300/22 que determinou até 6 de janeiro de 2023 o término do direito adquirido, ou seja, quem instalasse antes dessa data teria direito as vantagens existentes antes da criação da Lei (BRASIL, 2022).

Figura 3.9 – Quantidade anual de conexões de sistemas fotovoltaicos em GD do setor rural no município de Iporã-PR



Fonte: ANEEL (2023a).

Todas as conexões de sistemas fotovoltaicos em GD no setor rural de Iporã-PR são do grupo B de faturamento, ou seja, ainda não há sistemas de minigeração no setor rural do município. Além disso, das 68 unidades com geração, 11 enviam créditos para outras unidades, mostrando que a maioria da produção rural do município de energia solar fotovoltaica é consumida ou compensada no próprio local da instalação (ANEEL, 2023a).

Os sistemas fotovoltaicos em ambientes residenciais urbanos enviam quase toda a produção para a rede elétrica durante o dia, mas observa-se que eles estão próximos dos centros comerciais e industriais de maior consumo nesse período (TONIN; URBANETZ JUNIOR, 2018). Entretanto, a maior parte dos sistemas fotovoltaicos rurais consomem grande parte de sua produção durante o dia, mas essa sobra precisa percorrer maiores distâncias para ser consumida. Mesmo assim, a utilização dos sistemas fotovoltaicos na área rural é importante, pois libera demanda energética para os grandes centros urbanos.

Portanto, as redes rurais podem ficar sobrecarregadas dependendo da potência exportada durante o dia, principalmente nas estações de verão e primavera,

podendo até requisitar ampliação da potência das redes rurais por parte da companhia de energia. Todavia, é de responsabilidade da companhia de energia manter as tensões em conformidade com os limites estabelecidos no módulo 8 do PRODIST da ANEEL (2017) e manter a rede isenta de desligamentos frequentes, devendo promover melhora da linha nos casos de sobrecarga tanto de consumo quanto de geração já aprovada e instalada.

Nesse contexto, evidencia-se a importância da matriz elétrica estável e diversificada para que o desenvolvimento do setor agrícola aconteça da melhor forma possível. Ainda, o uso em larga escala de sistemas distribuídos pode reduzir a demanda por investimentos em linhas de transmissão e adiar a construção de usinas baseadas em fontes convencionais de energia (VILLALVA, 2015). Desse modo, a aplicação de produção elétrica por meio de fontes renováveis tem sido vantajosa em todos os setores, inclusive no setor rural, contribuindo para se alcançar um desenvolvimento nacional mais sustentável (DIAS *et al.*, 2019).

3.4.3 Desafios de implementação e de produtividade

Os módulos fotovoltaicos são projetados e fabricados para acomodar as células solares e suas conexões elétricas, a fim de oferecer estrutura para fixação e proteção contra danos mecânicos e ambientais (RÜTHER; MIGHELÃO; HAHN, 2018). Entretanto, esses módulos não são inquebráveis e estão sujeitos às condições climáticas extremas, como vendavais e granizo, ou condições externas como pedras, maquinários passando próximo, reparos no telhado ou animais sob ou sobre os módulos.

Ainda, observa-se a necessidade de avaliar o uso da terra do local em que o arranjo fotovoltaico será instalado. Nos casos em que os módulos são dispostos sobre telhados já existentes ou de novas instalações, promove-se a sinergia de aproveitamento da terra. Entretanto, nos casos de disposição diretamente sobre o solo, gera-se preocupações relacionadas à competição de geração de energia com o uso do solo para a agricultura (DIAS *et al.*, 2019).

Existem várias possibilidades para dispor e conectar os módulos, cabendo ao engenheiro projetar adequadamente e verificar a compatibilidade entre os dispositivos. Também é necessário que tanto os cabos quanto os inversores e dispositivos elétricos estejam corretamente dispostos e protegidos, visto que, mesmo

tendo um bom encapsulante, podem ser danificados por condições externas como desgaste, trabalho humano, animais e intempéries.

Os componentes da instalação fotovoltaica ficam vulneráveis às condições características de ambientes rurais, podendo se danificar ao longo do tempo. Os itens que mais oferecem risco são os gases com amônia na produção de animais, umidade de reservatórios e encanamentos de água, chaminés e exaustores contendo fumaça e poeira, além da presença de pássaros, ratos e outros animais e insetos que podem sujar ou danificar os equipamentos (TRZMIEL; GŁUCHY; KURZ, 2020).

Assim, é importante ressaltar a relevância de o projetista encontrar compatibilidade tanto entre os módulos e o inversor, quanto do inversor com a rede elétrica. Nem todos os inversores podem operar nas redes Monofásicas Rurais ou requerem ajustes mais complexos para poderem operar com tensões de 254V ou mais elevadas, dificultando a efetividade e a manutenção do sistema fotovoltaico. Ainda, nos casos trifásicos, a utilização do transformador trifásico 220/380V no Panará induz a perdas nessa conversão, além de possíveis problemas com falta de fase (TONIN; URBANETZ JUNIOR, 2018).

A fim de otimizar a performance dos sistemas fotovoltaicos, é necessário minimizar três tipos de perdas de produtividade: as perdas óticas, as perdas elétricas e as perdas térmicas (VAILLON *et al.*, 2018). As perdas óticas incluem a variação da radiação em função do clima, de sombreamentos e de sujeira nos módulos. As perdas elétricas incluem compatibilidade do sistema elétrico, eficiência de conversão de energia e de transmissão pelos cabos e dispositivos. As perdas térmicas incluem a redução na eficiência dos módulos, dos cabos e do inversor pelo aquecimento, influenciados pelo modo como foram instalados ou por excesso de sujeira (TONOLO, 2019).

Os resultados dispostos na Tabela 3.1 expõem o percentual de produção atingido sob diferentes características de posicionamento fotovoltaico, variando os ângulos de inclinação e de orientação azimutal. Esses valores são específicos para o município de Iporã-PR e podem responder também para os municípios vizinhos, pois levam em consideração os índices de irradiação do local e as variações climáticas. Os ângulos dos sistemas fotovoltaicos nas propriedades rurais podem corresponder aos valores mencionados ou estarem próximos deles (NÓBREGA *et al.*, 2018).

Nem sempre é possível instalar o sistema fotovoltaico no solo na condição ideal Norte com 24° de inclinação. Muitas vezes o terreno disponível não possui o

formato adequado para orientar todos os módulos para o Norte. Ainda, levar em consideração telhados já existentes auxilia na redução de custos com estrutura e do uso do solo (NÓBREGA *et al.*, 2018). Observa-se também que no caso de Iporã-PR, conforme Tabela 3.1, os telhados orientados a Leste têm maior produtividade que os telhados orientados a Oeste, sob a mesma diferença angular, possivelmente devido às condições de clima e irradiação melhores no período da manhã.

Tabela 3.1 – Resultados da simulação de produção de energia anual normalizada de sistema fotovoltaico com variação de ângulo de inclinação e de orientação no município de Iporã-PR

	Ângulo de Azimute							
	SO	O	NO	N	NE	L	SE	S
	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°
0°	92,5%	92,5%	92,5%	92,5%	92,5%	92,5%	92,5%	92,5%
5°	90,5%	92,3%	94,3%	95,2%	94,6%	92,7%	90,8%	89,8%
10°	87,8%	91,6%	95,5%	97,3%	96,1%	92,4%	88,5%	86,5%
15°	84,8%	90,4%	96,1%	98,8%	97,0%	91,7%	85,7%	82,5%
20°	81,3%	88,9%	96,3%	99,7%	97,4%	90,6%	82,5%	78,0%
25°	77,5%	87,1%	95,9%	100,0%	97,3%	89,1%	79,0%	72,9%
30°	73,4%	85,1%	95,1%	99,6%	96,6%	87,4%	75,3%	67,4%
45°	60,9%	77,9%	89,9%	95,0%	92,0%	80,9%	63,4%	51,2%
90°	33,4%	50,7%	56,5%	54,4%	58,5%	53,4%	35,1%	21,5%

Fonte: Os autores (2023); elaborado com o software SAM (NREL, 2022).

Legenda: Melhor situação  pior situação.

A Tabela 3.1 também expõe que arranjos fotovoltaicos em telhados menos inclinados, entre 0° e 5° possuem menos perdas relacionadas à orientação azimutal, com orientação mais ao Sul, por exemplo. Entretanto, a inclinação dos módulos auxilia na limpeza automática realizada pelas chuvas, a qual é essencial para combater a quantidade de poeira da área rural que se acumula sobre os módulos e causa redução na produtividade (BARBOSA; FARIA; GONJITO, 2018). Assim, quanto mais inclinados os módulos, mais a produtividade aumenta e até pode-se reduzir as limpezas anuais, as quais geralmente são duas nos períodos mais secos.

Além disso, a Tabela 3.1 confirma a baixa produtividade das sugestões de disposição dos módulos na vertical como cercas na área rural ou como fachadas de prédios no meio urbano, atingindo imediatamente mais de 40% de perdas. Assim,

esses resultados auxiliam na compreensão das decisões de escolha da disposição do arranjo fotovoltaico (NÓBREGA *et al.*, 2018).

A maioria dos telhados encontrados na área rural de Iporã-PR são do tipo colonial com 20°, fibrocimento com 10° ou metálico com 5° de inclinação. Observa-se que a maior parte das estruturas possui telhado com duas águas. Dessa forma, conforme resultados da Tabela 3.1, quando o telhado está mais orientado Norte/Sul, ele possui uma água com boa orientação e o tipo colonial se sobressai. Entretanto, quando o telhado está mais orientado Leste/Oeste, a água mais a norte tem vantagem e os tipos fibrocimento e metálico se sobressaem.

Há também os sistemas tracker de 1 eixo e de 2 eixos que trabalham movendo o posicionamento do arranjo fotovoltaico de modo a obter o máximo de aproveitamento ao longo dos dias do ano. Entretanto, além do custo mais elevado, essa tecnologia requer mais espaço e manutenção mais frequente, tornando sua utilização mais inviável principalmente em propriedades rurais mais afastadas dos grandes centros. Diferente das usinas de grande porte que possuem manutenção planejada, um defeito mecânico no tracker inviabilizaria a produção por um tempo e sua solução dependeria de assistência especializada (BLASZCZAK, 2017).

A escolha do tipo de instalação dos módulos fotovoltaicos influencia na eficiência de produtividade. Instalações com os módulos muito encostados nos telhados ou em telhados que esquentam muito dificultam a dissipação natural dos módulos, com ou sem vento (VAILLON *et al.*, 2018). Entretanto, módulos muito afastados oferecem maior risco diante de vendavais. Além disso, é importante posicionar os módulos de modo a minimizar os possíveis sombreamentos ao longo dos dias do ano.

Os elementos de sombreamento mais comuns no ambiente rural são árvores, chaminés, reservatórios, ramais elétricos e sujeira acumulada nos módulos. É importante ressaltar que o sombreamento não afeta a produção proporcionalmente com a área sem luz, ele bloqueia a condução de energia no módulo fotovoltaico e requer o acionamento do diodo de by-pass, bloqueando parcialmente ou integralmente o funcionamento daquele módulo sombreado (TRZMIEL, G.; GŁUCHY, D.; KURZ, 2020). Observa-se que na Figura 3.10, buscou-se afastar os módulos das palmeiras, reduzindo o sombreamento.

Figura 3.10 – Arranjo fotovoltaico policristalino com sombreamento em granja de aves em Iporã–PR



Fonte: Os autores (2022).

A disposição e o local de instalação do inversor, das stringboxes e demais dispositivos também influenciam na eficiência de produtividade (ULIANA, 2018). É importante que o inversor tenha as distâncias mínimas de outros objetos e que seja instalado em um local arejado para que ocorra a dissipação de sua temperatura interna. Alguns casos há o transformador 220/380V que também libera calor e agrava a situação. Entretanto, se o ambiente for fechado demais, há excesso de calor, ou dispor o inversor em área externa aberta, há incidência direta de sol que eleva a temperatura e há risco diante de vendavais (TONOLO, 2019).

Strings mal dimensionadas em inversores ou instalações malfeitas podem causar baixo rendimento, inversor inoperante ou até a queima do inversor. Strings com quantidades diferentes de módulos em paralelo em um mesmo MPPT, seja por má instalação ou por defeito nos módulos, produzem corrente reversa que, com o tempo, podem causar danos maiores. Ainda, em casos de sombreamento, o inversor precisa buscar o melhor MPPT com valores de tensão e corrente daquele conjunto de módulos, reduzindo ainda mais a produtividade do que somente a área afetada (TONOLO, 2019).

Ainda, a escolha e disposição dos cabamentos é importante para a eficiência de produtividade. O funcionamento dos sistemas fotovoltaicos se mantém em exportação de corrente nominal por um longo período no momento de maior incidência solar. Assim, a escolha de cabamentos com maior seção que o tabelado pela norma é importante, pois oferece uma margem de segurança para condução da energia com menor sobreaquecimento, principalmente na área rural (ULIANA, 2018). Vale lembrar

que a escolha dos dutos de condução dos cabos também é relevante, visto que eletrocalhas ventiladas retêm menos calor que eletrodutos, por exemplo (VAILLON *et al.*, 2018).

O inversor fotovoltaico pode ser conectado à internet por meio de um coletor de dados tipo *data logger*, a fim de registrar a produção e notificar possíveis falhas no sistema. Assim, o inversor é capaz de se conectar a um servidor central que redireciona as informações aos usuários, podendo ser acessada de qualquer local. O monitoramento online é eficiente e auxilia na prevenção de perdas de produção e na manutenção do sistema. Entretanto, nem todo imóvel rural possui conexão à internet ou ela é bastante instável ou é muito longe do sistema (TONOLO, 2019).

Por fim, é importante citar a dificuldade enfrentada pelos produtores rurais em limpar os módulos dispostos em telhados. Quando a instalação é feita no solo é viável para o próprio produtor rural realizar o serviço, visto que é de difícil acesso ter essa limpeza realizada por empresas do setor. Ainda, manutenções no tempo certo podem evitar afrouxamento dos conectores e fixações ou a identificação prévia de futuros problemas. Entretanto, a distância dos empreendimentos rurais também dificulta a assiduidade das manutenções. Além disso, o descarte ou reciclagem dos materiais no final da vida útil é ainda mais complicado no meio rural devido à distância dos centros de distribuição.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados expostos no presente estudo deixaram evidentes os desafios da energia solar nos imóveis rurais do município de Iporã-PR e, desse modo, a intenção do trabalho foi a de sanar possíveis dificuldades que os produtores rurais possam já ter encontrado ou possam vir a encontrar, podendo servir de exemplo para outros municípios com características similares.

Nesse sentido, foram elucidados alguns dos principais itens que influenciam a efetividade e produtividade dos sistemas fotovoltaicos, como: as características da rede elétrica rural, a previsão de irradiação solar, o posicionamento fotovoltaico, conexão em GD, existência de sombreamentos, rendimento pelo design de instalação, acúmulo de sujeira e compatibilidade dos dispositivos fotovoltaicos.

A questão de que há 20 anos não havia energia em grande parte da área rural do Paraná foi resolvida de maneira mais ágil e ampla com os sistemas monofásicos

rurais. Esse é um tipo de sistema de eletrificação instável e menos seguro, mas que beneficiou uma quantidade bem maior de produtores rurais no Estado. Com o avanço da implementação das redes trifásicas, esse estudo explicou a melhora significativa dos aspectos econômicos e sociais dos empreendimentos rurais, resultando em um bom desempenho na busca pela sustentabilidade.

A eletrificação trouxe ao produtor rural maior produtividade e maior qualidade de vida, assim como a energia solar. Entretanto, com a inserção de novas tecnologias, os produtores rurais precisam compreender um mínimo a respeito do assunto, de modo que eles possam ter capacidade de gerir o funcionamento desses sistemas. Todavia, nem todos os produtores rurais têm interesse ou disposição para se dedicar em aprender novas habilidades, visto que alguns deles são de cultura mais simples ou já são avançados em idade.

As condições para implementação e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos no meio rural podem ser diferentes das encontradas no meio urbano. Assim, mostrou-se a importância de levar em consideração as condições específicas do ambiente rural para realizar não só o correto dimensionamento do projeto, mas também de realizar as adequações necessárias. Desse modo, o produtor rural muitas vezes precisa se atentar a esses detalhes de instalação, além de verificar e acompanhar periodicamente a produtividade do sistema, a qual não é tarefa viável para alguns deles.

No caso específico da avicultura, observa-se que os barracões não têm um padrão de orientação e cada aviário pode ter águas de telhado com orientações diferentes. Desse modo, é importante avaliar se compensa dispor os módulos fotovoltaicos em uma água do telhado, nas duas ou no solo. Ainda, observa-se que há uma redução do número de árvores ao redor das granjas, não só com relação à instalação do sistema fotovoltaico, mas devido aos novos critérios sanitários. Entretanto, a retirada dessas árvores causa aumento na temperatura interna do barracão e, conseqüentemente, aumentando o consumo de energia elétrica para refrigerá-lo.

Outro ponto relevante a ser considerado é a utilização dos inversores monofásicos nas propriedades rurais que ainda não receberam a rede trifásica de energia. Existem empreendimentos rurais que consomem uma grande quantidade de energia e que, nos casos de redes monofásicas, necessitam de vários inversores monofásicos para produzir toda essa energia. O que acontece é que o funcionamento

em conjunto dos inversores eleva a tensão, a qual, nas redes monofásicas sobe além do esperado, causando falhas inesperadas e perdas de produção.

Outra questão bastante relevante aos produtores rurais é a limpeza dos módulos e dos demais equipamentos fotovoltaicos. Essa ainda é uma questão de segurança, pois envolve lidar com risco de queda e com módulos sobre telhados e risco de choque elétrico devido à possibilidade de cabos ou dispositivos danificados e expostos. Observa-se que a disposição dos módulos em solo facilita a limpeza e tem sido um ponto decisivo no projeto. Assim, existe a possibilidade de o produtor rural contratar esse serviço de limpeza com equipe qualificada, mas de ramos de trabalho como limpeza de vidro, ou de buscar qualificação para que possa realizar essa limpeza com segurança.

Desse modo, esse trabalho elucidou assuntos importantes para que os produtores rurais, os que já implementaram sistemas fotovoltaicos ou os que ainda vão aderir à GD, possam ter maior compreensão dos pontos mais importantes a se observar sobre a tecnologia e possam se resguardar de possíveis problemas técnicos de instalação ou de utilização.

REFERÊNCIAS

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração Distribuída**: Saiba mais sobre micro e minigeração distribuída. MME, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 17 fev. 2023.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração**: Unidades com Geração Distribuída. MME, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 12 fev. 2023.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: SRD/ANEEL, 2017. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 15 fev. 2023.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa nº 482**, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída [...] e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2023.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Resolução Normativa ANEEL nº 1.059**, de 7 de fevereiro de 2023. Aprimora as regras para a conexão e o

faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída [...] e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2023b. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2023.

BARBOSA, E. R.; FARIA, M. S. F.; GONJITO, F. B. **Influência da sujeira na geração fotovoltaica**. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado, 2018.

BERTOLLO, H. C. **Contribuições ao Estudo dos Aterramentos de Sistemas Monofilares com Retorno pelo Terra**. Orientador: Delly Oliveira Filho. 2008. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade de Viçosa. Viçosa, 2008.

BLASZCZAK, V. **Análise de eficiência de painel fotovoltaico com sistema tracker seguidor solar**. Orientador: Franciele Stail Bordin. 2017. 39 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal da Fronteira Sul. Erechim, 2017.

BORGES, R. C. M. **Tensão nominal (fase-neutro) nas cidades brasileiras, por estado**. Porto Alegre: UFRGS, 2019. Disponível em: <https://www.inf.ufrgs.br/~cabral/Tensao.nominal.estados.Brasil.html>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRASIL. **Lei nº 14.300**, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída [...] e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 12 fev. 2023.

COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **Programa Paraná Trifásico - Informativo Técnico**: Orientações Gerais para Elaboração de Projetos (versão 11). Curitiba, 2022. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/7C1CE7E922A5D63B03258844005DC69D/\\$FILE/Procedimentos%20de%20projetos_Paran%C3%A1%20Trif%C3%A1sico_v11.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/7C1CE7E922A5D63B03258844005DC69D/$FILE/Procedimentos%20de%20projetos_Paran%C3%A1%20Trif%C3%A1sico_v11.pdf). Acesso em: 12 fev. 2023.

COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **Tarifas de energia elétrica**: Resolução Homologatória 3.049/2022. Curitiba, 2023. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 12 fev. 2023.

COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **NTC 901100**: Normas Técnicas Copel - Fornecimento em Tensão Secundária se Distribuição. Curitiba: SCD/DMED, 2020. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/4F0C269A3EBCF33B03257F800070D966/\\$FILE/NTC%20901100%20Fornecimento%20em%20Tens%C3%A3o%20Secund%C3%A1ria.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/4F0C269A3EBCF33B03257F800070D966/$FILE/NTC%20901100%20Fornecimento%20em%20Tens%C3%A3o%20Secund%C3%A1ria.pdf). Acesso em: 12 fev. 2023.

DIAS, L.; GOUVEIA, J. P.; LOURENÇO, P.; SEIXAS, J. Interplay between the potential of photovoltaic systems and agricultural land use. **Land Use Policy**, v. 81, p. 725–735, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.landusepol.2018.11.036.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco Energético Nacional 2022**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes->

dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022. Acesso em: 12 fev. 2023.

FERREIRA, A. L.; SILVA, F. B. Universalização do acesso ao serviço público de energia elétrica no Brasil: evolução recente e desafios para a Amazônia Legal. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 3, 17 ago. 2021. DOI: 10.47168/rbe.v27i3.645.

FRAUNHOFER ISE (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems). **Photovoltaics report**. Freiburg, 2022. Disponível em: <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2023.

GLOBAL SOLAR ATLAS. **Map and data downloads**. The World Bank Group: [S. L.], 2019. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/downloads/world>. Acesso em: 03 fev. 2023.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Documentação do Censo 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. WMO/UNEP, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 27 fev. 2023.

JÄGER, K.; ISABELLA, O.; SMETS, A. H. M.; VAN SWAAIJ, R. A. C. M. M.; ZEMAN, M. **Solar energy: fundamentals, technology, and systems**. Cambridge, UK: UIT Cambridge, 2016. 488 p.

LOZANO, L.; TABOADA, E. B. The Power of Electricity: How Effective Is It in Promoting Sustainable Development in Rural Off-Grid Islands in the Philippines? **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2705, 9 maio 2021. DOI: 10.3390/en14092705.

NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. UNIC Rio, set. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 10 fev. 2023.

NÓBREGA, B. S.; LIMA, W. G.; MELO, R. H. F.; GONÇALVES, M. C. P.; WANDERLEY NETO, A. C. Desempenho de um sistema solar fotovoltaico com diferentes inclinações e orientações azimutais em cidades da Paraíba. **Revista Principia: Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, João Pessoa, n. 43, p. 175-188, dez. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n43p175-188>.

NOGUEIRA, G. B.; SALES, F. E.; BOSCHI, L. S.; AZEVEDO, C. G. Viabilidade técnica econômica de implementação de um sistema de backup de energia em uma pequena propriedade rural. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e35211528210, 9 abr. 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.28210.

NREL (Laboratório Nacional de Energias Renováveis, EUA). **System Advisor Model (SAM)**. Washington D. C., EUA: U.S. Department of Energy, 2022. Disponível em: <https://sam.nrel.gov/>. Acesso em: 11 fev. 2023.

OLIVEIRA FILHO, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 4 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2017.

PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Paraná Energia Rural Renovável**. Curitiba, PR: SEAB-PR/CELEPAR, 2021. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Parana-Energia-Rural-Renovavel>. Acesso em: 19 fev. 2023.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESESB, 2014.

RÜTHER, R.; MIGHELÃO, T. R.; HAHN, P. Mercado de geração distribuída fotovoltaica no Brasil. **Fotovolt**, São Paulo, v. 3, n. 17, p. 20-29, jul./ago., 2018.

SOLAR-ENERGIA. **Localização de painéis solares**. 2016. Disponível em: <https://solar-energia.net/energia-solar-fotovoltaica/elementos/panel-fotovoltaico/ubicacion-de-los-paneles-solares>. Acesso em: 05 fev. 2023.

SOLARIZE, Treinamentos profissionais LTDA. **Vantagens da taxa mínima com a nova lei 14.300** - entenda o cálculo do Custo de Disponibilidade. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.solarize.com.br/site-content/11-blog/520-vantagens-da-taxa-minima-com-a-nova-lei-14-300-entenda-o-calculo-do-custo-de-disponibilidade>. Acesso em: 15 jun. 2023.

TONIN, F. S.; URBANETZ JUNIOR, J. Characterization of grid-connected photovoltaic systems in Curitiba, Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, n. esp., 29 out. 2018. DOI 10.1590/1678-4324-smart-2018000250.

TONOLO, É. A. **Análise dos fatores de perdas nos sistemas fotovoltaicos da UTFPR campus Curitiba**. Orientador: Jair Urbanetz Junior. 2019. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

TRZMIEL, G.; GŁUCHY, D.; KURZ, D. The impact of shading on the exploitation of photovoltaic installations. **Renewable Energy**, v. 153, p. 480–498, jun. 2020. DOI 10.1016/j.renene.2020.02.010.

TWIDELL, J.; WEIR, T. **Renewable Energy Resources**. 3 ed. Abingdon, UK: Routledge, 2015. DOI 10.4324/9781315766416.

ULIANA, I. A. Cabeamento de sistemas solares fotovoltaicos. **Fotovolt**, São Paulo, v. 3, n. 17, p. 50-55, jul./ago., 2018. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/fotovolt/edicao/2018/agosto>. Acesso em: 15 fev. 2023.

VAILLON, R.; DUPRÉ, O.; CAL, R. B.; CALAF, M. Pathways for mitigating thermal losses in solar photovoltaics. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 13163, 3 set. 2018. DOI 10.1038/s41598-018-31257-0.

VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015.

YIN, J.; MOLINI, A.; PORPORATO, A. Impacts of solar intermittency on future photovoltaic reliability. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 4781, 22 set. 2020. DOI 10.1038/s41467-020-18602-6.

4 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DESENVOLVIMENTO RURAL SUSTENTÁVEL: ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA, AMBIENTAL E SOCIAL EM IPORÃ-PR

RESUMO

A energia solar fotovoltaica tem apresentado vantagens econômicas, ambientais e sociais associadas ao seu uso, em razão de se tratar de uma fonte inesgotável, limpa e dissociada de consequências nocivas imediatas ao meio ambiente. O presente trabalho teve como objetivo analisar a sustentabilidade econômica, ambiental e social dos sistemas de energia solar fotovoltaica em três propriedades rurais em Iporã-PR. A presente pesquisa se estrutura como um estudo de caso de abordagem exploratória e qualitativa, na qual analisou-se a viabilidade econômica, social e ambiental de sistemas fotovoltaicos aplicados na área rural, contrastando com os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS) do IBGE. O estudo foi realizado com base em dados reais de produtividade coletados entre os anos de 2021 e 2022, em três sistemas fotovoltaicos de Geração Distribuída de energia em propriedades rurais do município condizentes com níveis distintos de potência instalada. O município de Iporã foi tratado nesse estudo como um dos exemplos da realidade encontrada nos municípios paranaenses e foi escolhido devido a ser um município agropecuário de destaque na região Noroeste do Paraná. Como resultados, a produção anual coletada foi de 11.184 kWh no Caso 1, 60.888 kWh no Caso 2 e 257.760 kWh no Caso 3, com menos de 5% de diferença do valor anual calculado. A viabilidade econômica dos três casos resultou em TIR de 19,81%, 27,02% e 24,06%, além de *Payback* Descontado de 8,2 anos, 6,0 anos e 6,3 anos, respectivamente. O LCOE encontrado foi de 233,10 R\$/MWh, 214,76 R\$/MWh e 187,64 R\$/MWh, respectivamente. A viabilidade ambiental dos três casos resultou em mitigação anual de carbono de 3,75 tCO₂e, 20,46 tCO₂e e 86,63 tCO₂e, respectivamente, e comparou com a mitigação de 23, 123 e 520 árvores adultas em reflorestamento, respectivamente. A viabilidade social comparou a economia mensal média dos três casos de R\$ 521,92, R\$ 3.653,28 e R\$ 12.028,80, respectivamente, com valores aproximados de aquisição de bens e serviços para melhoria social. O estudo conclui expondo a importância da energia como propulsor de tecnologia e produtividade nas atividades rurais, mostrando também que a energia solar traz estabilidade para a agricultura e o setor rural.

Palavras-chave

Energia na agricultura, energias renováveis; geração distribuída; sustentabilidade energética.

PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY AND SUSTAINABLE RURAL DEVELOPMENT: ECONOMIC, SOCIAL AND ENVIRONMENTAL FEASIBILITY STUDY IN IPORÃ-PR (BRAZIL)

ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has shown economic, environmental and social advantages associated with its use, because it is an inexhaustible, clean source, dissociated from immediate harmful consequences to the environment. This work aimed to analyze the

energy productivity and economic, environmental and social sustainability of photovoltaic solar energy systems in three rural properties in Iporã-PR. This research is structured as a case study with an exploratory and qualitative approach, in which the economic, social and environmental viability of photovoltaic systems applied in rural areas was analyzed, contrasting with the IBGE's Sustainable Development Indicators (IDS). The study was carried out based on real productivity data collected between the years 2021 and 2022, in three photovoltaic systems of Distributed Generation of energy in rural properties in the municipality, consistent with different levels of installed power. The municipality of Iporã was treated in this study as one of the examples of the reality found in the municipalities of Paraná and was chosen because it is a prominent agricultural municipality in the Northwest region of Paraná. As a result, the annual production collected was 11,184 kWh in Case 1, 60,888 kWh in Case 2 and 257,760 kWh in Case 3, with less than 5% difference from the calculated annual value. The economic viability of the three cases resulted in an IRR of 19.81%, 27.02% and 24.06%, in addition to a Discounted Payback of 8.2 years, 6.0 years and 6.3 years, respectively. The LCOE found was 233.10 R\$/MWh, 214.76 R\$/MWh and 187.64 R\$/MWh, respectively. The environmental viability of the three cases resulted in annual carbon mitigation of 3.75 tCO_{2e}, 20.46 tCO_{2e} and 86.63 tCO_{2e}, respectively, and compared with the mitigation of 23, 123 and 520 mature trees in reforestation, respectively. Social viability compared the average monthly savings of the three cases of R\$ 521.92, R\$ 3,653.28 and R\$ 12,028.80, respectively, with approximate values for the acquisition of goods and services for social improvement. The study concludes by exposing the importance of energy as a driver of technology and productivity in rural activities, also showing that solar energy brings stability to agriculture and the rural sector.

Keywords

Energy in agriculture, renewable energies; distributed generation; energy sustainability.

4.1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a qualidade de vida melhorou e a produtividade, mas o mundo está cada vez mais dependente da energia elétrica. Observando que os recursos naturais são finitos, a humanidade precisa se posicionar em sua relação com a natureza de modo a conciliar o desenvolvimento com a sustentabilidade. Sendo assim, as atividades desenvolvidas por todo o planeta precisam de uma relação de sinergia e de cooperação voltada à preservação, a fim de ser suficiente à nossa e às futuras gerações (BOFF, 2015; IPCC, 2022a).

Os agricultores têm buscado por técnicas produtivas mais modernas e eficientes com redução dos custos de produção (ALVES; SOUZA, 2015). Entretanto, mesmo com a melhora na eficiência energética, a utilização de novas tecnologias tende a requisitar mais energia conforme se desenvolvem, visto que a quantidade de equipamentos e dispositivos utilizados tem aumentado. Desse modo, há diversos

esforços em andamento, a fim de estender o acesso à eletricidade às comunidades rurais seja por meio de sistemas autônomos ou por aumento da extensão da rede elétrica (LOZANO; TABOADA, 2021).

O Brasil permite a conexão dos sistemas fotovoltaicos à rede por meio da modalidade Geração Distribuída (GD), na qual a energia solar dispensa o uso de baterias e a companhia de energia gerencia a energia enviada à rede como compensação de créditos. Por meio da GD, a energia fotovoltaica está presente em todos os setores da economia nacional, com ampla participação rural (ANEEL, 2022; ANEEL, 2023).

O incremento de mais equipamentos tecnológicos, a fim de garantir uma maior produtividade nas atividades rurais tem aumentado os custos com energia elétrica (LOZANO; TABOADA, 2021). Assim, a energia solar fotovoltaica está auxiliando esse processo de modo a compensar esse consumo e auxilia o desenvolvimento das atividades rurais em diversos aspectos (PASCARIS *et al.*, 2021). Assim, observa-se a relevância de avaliar a contribuição da energia fotovoltaica no âmbito rural de maneira mais ampla e profunda.

Nesse sentido, a presente pesquisa se estrutura como um estudo de caso com abordagem quali-quantitativa, na qual analisou-se a viabilidade econômica, social e ambiental dos sistemas fotovoltaicos aplicados na área rural. O município de Iporã foi tratado nesse estudo como um dos exemplos da realidade encontrada nos municípios paranaenses e foi escolhido devido a ser um município agropecuário de destaque na região Noroeste do Paraná.

A metodologia das análises de sustentabilidade foi sustentada com indicadores e métodos de análise conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Indicadores e métodos de análise de sustentabilidade utilizados

Análise de Sustentabilidade	Caso 1
Pilar Econômico	<ul style="list-style-type: none"> • Payback Descontado • Valor Presente Líquido (VPL) • Taxa Interna de Retorno (TIR) • Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE)
Pilar Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • IDS ambiental nº 1 • IDS ambiental nº 6 • Mitigação de Emissão de CO2 Equivalente • Compensação de CO2 em Reflorestamento • Valor Monetário em Créditos de Carbono
Pilar Social	<ul style="list-style-type: none"> • IDS socioeconômico nº 45 • IDS social nº 23 • IDS social nº 26 • Proposição de análise: melhoria na qualidade de vida na propriedade rural

Fonte: Os autores (2023).

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo analisar a sustentabilidade econômica, ambiental e social dos sistemas de energia solar fotovoltaica em três propriedades rurais em Iporã-PR.

4.2 REFERENCIAL TEÓRICO

4.2.1 Desenvolvimento Rural Sustentável com energias renováveis

Historicamente, é possível se observar a predominância do uso de combustíveis fósseis ou minerais nas matrizes energéticas do Brasil e do mundo, sendo recente a alteração na consciência coletiva sobre a finitude dos recursos naturais e dos efeitos negativos ao meio ambiente. Dessa forma, passou-se a questionar a necessidade de uma transição nos padrões de produção e consumo, de modo a não colocar em risco a sustentabilidade e o suprimento de longo prazo do planeta (NASCIMENTO; MENDONÇA; CUNHA, 2012).

As questões relacionadas à produção e consumo de bens e serviços cresceu proporcionalmente ao crescimento da população, sendo que essa evolução econômica e tecnológica da sociedade está diretamente relacionada ao aumento da

demanda de energia e a observância da sustentabilidade no seu ciclo produtivo e de consumo (PANAROTTO, 2008).

A relação de energia e desenvolvimento sustentável foi debatida em diversos encontros pelo mundo, se tornando um indicador para demonstrar o desenvolvimento dos países, e, por esse motivo, demonstra a importância dos investimentos, planejamento e desenvolvimento desse setor, que está incentivando a geração por fontes renováveis, tendo destaque para a geração por biogás, eólica e solar fotovoltaica.

A aplicação de novas tecnologias energéticas contribui para que as atividades agrícolas tivessem melhora na produtividade, no rendimento econômico e na qualidade de vida (BOFF, 2015). Nesse sentido, a melhora da renda traz mais estabilidade ao produtor rural e, com mais dinheiro, ele tem liberdade (SEN, 2010). Assim, a aplicação de tecnologias cada vez mais avançadas vai trazendo um valor agregado à vida dos agricultores, composto por fatores que impulsionam o desenvolvimento sustentável firmado no tripé da sustentabilidade.

A eletrificação rural é considerada por lei um serviço essencial e deve ser disponibilizada pelo Poder Público ao homem do campo, a fim de dar plena capacitação para seu desenvolvimento e bem-estar (MESQUITA, 2014). Desse modo, a aplicação de sistemas de energias renováveis colabora com a redução de custos com a utilização de energia e com a mitigação dos impactos ambientais e sociais, auxiliando a efetividade da eletrificação rural.

Como um dos exemplos brasileiros, o governo do Estado do Paraná criou o Projeto Smart Energy Paraná por meio do Decreto 11.538 de 2018, com a finalidade de ampliar a disseminação de novas tecnologias, concentrar esforços no setor emergente da geração distribuída e fomentar o uso de energias renováveis. Assim, dentre as ações implementadas, o foco foi na formulação de políticas públicas e na isenção de impostos na energia elétrica, de modo a complementar a matriz energética paranaense com energias renováveis (PARANÁ, 2018).

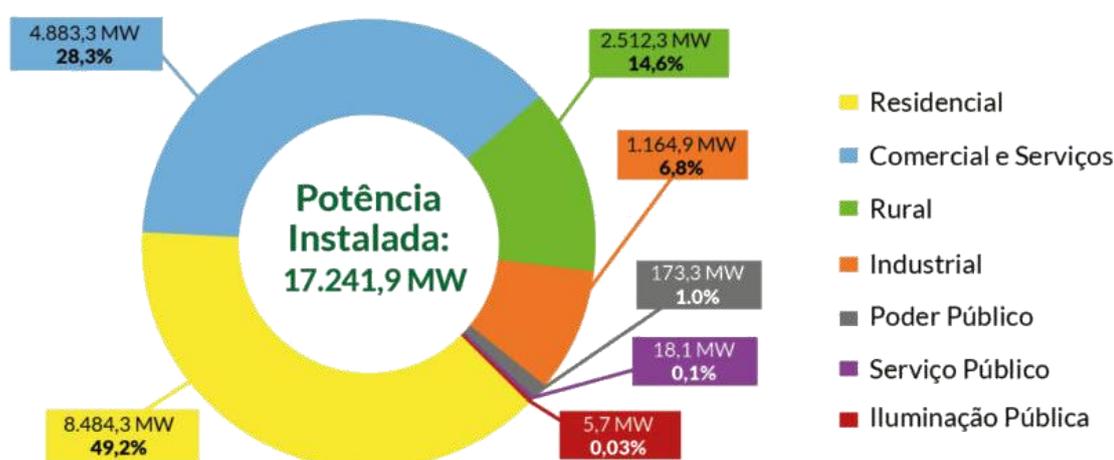
A energia solar se trata de uma fonte inesgotável, limpa e dissociada de consequências nocivas imediatas para o meio ambiente. Comparada às fontes tradicionalmente utilizadas, ela apresenta vantagens que demonstram uma viabilidade econômica, social e ambiental bastante expressiva (FERREIRA *et al.*, 2018).

Entretanto, o processo de fabricação utiliza 95% de energia de fontes não renováveis e o material utilizado no processo de fabricação possui toxicidade humana

e ambiental, mas que são impactos menores que de outras fontes energéticas (BEZERRA; LIRA; SILVA, 2018). Mesmo assim, comparando com as demais fontes permitidas na modalidade de GD, essa é a tecnologia que teve a melhor aceitação no mercado brasileiro em função dos baixos impactos ambientais de produção energética (JORDÃO *et al.*, 2020).

A Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2023) já registrou mais de 17 GW de potência instalada em energia solar fotovoltaica no país na modalidade de geração distribuída, um valor bem maior que a previsão para o ano de 2026, de 3,3 GW de potência instalada (EPE, 2022b). A geração distribuída com sistemas fotovoltaicos no âmbito rural abrange uma boa participação na potência total instalada, conforme observado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Potência instalada em geração distribuída no Brasil por setor até janeiro de 2023



Fonte: ABSOLAR (2023).

Essa tecnologia é considerada uma eficiente alternativa de matriz energética renovável, por ter flexibilidade e modularidade é elencada como uma tecnologia viável e adaptável às necessidades do campo. Isso se deve ao fato de os sistemas de geração fotovoltaicos permitirem a instalação em praticamente qualquer lugar, promovendo autonomia produtiva aos imóveis rurais (SILVA, 2015).

Assim, a aplicação de tecnologias no campo possibilita a realização de processos de maneira mais rápida e eficiente, resultando num aumento de produtividade. A energia solar fotovoltaica é uma tecnologia apontada como capaz de fomentar o desenvolvimento rural sustentável, pois promove o acesso à energia limpa e proporciona desenvolvimento econômico, ambiental e social, integrando a dinâmica

do campo com os mercados e promovendo segurança energética aos imóveis rurais (JORDÃO *et al.*, 2020).

Ressalta-se que a utilização do solo para produção de energia solar fotovoltaica pode criar uma disputa do uso da terra, gerando dúvidas quanto ao seu impacto na produção de alimentos. Entretanto, há alternativas que integram a produção fotovoltaica em estruturas já existentes no ambiente rural ou criam ambientes úteis. Além disso, a produção de energia elétrica favorece seu uso e, conseqüentemente, contribui para uma maior produtividade desde a irrigação até granjas, amparando a competição entre energia e alimento (PASCARIS *et al.*, 2021).

Dessa forma, promover a inserção da tecnologia fotovoltaica nos imóveis rurais fomenta o desenvolvimento rural sustentável, trazendo maior estabilidade energética aos imóveis e promovendo a redução dos impactos econômicos e ambientais. Inclusive, o acesso à energia e redução de custos promove significativamente o acesso a outros serviços e produtos que tornam a qualidade de vida melhor, impactando positivamente no Desenvolvimento Humano (SOUZA, 2020).

4.2.2 Energia solar fotovoltaica e viabilidade nos três pilares da sustentabilidade

O uso de fontes não renováveis vem causando sérios danos ao meio ambiente, sendo que atualmente a maior parte da energia utilizada no mundo provém de fontes não renováveis, como carvão, gás natural ou petróleo. Conseqüentemente, esta fonte de energia causa estragos no meio ambiente, aumentando a concentração de dióxido de carbono na atmosfera, aumentando a poluição, contribuindo para o aquecimento global do planeta e esgotando os recursos naturais disponíveis (UCZAI, 2012).

Dessa forma, a utilização de energias limpas e renováveis tem sido fomentado no mundo todo, em especial, na utilização da energia solar fotovoltaica que está gradativamente aumentando sua participação na matriz elétrica mundial, tendo avanços em todos os seguimentos, como no setor rural que vem crescendo no mundo e no Brasil, a qual é elencada na promoção de desenvolvimento sustentável para o meio rural com experiências que utilizam o sol tanto como fonte térmica como gerador de eletricidade (LEFF, 2009).

Portanto, existe uma necessidade de se observar sobre a energia renovável, visando mitigar os impactos negativos ao meio ambiente, como a poluição atmosférica

e auxiliando na manutenção dos recursos naturais, já que a utilização dessas tecnologias está relacionada com a renovabilidade do meio combustível, ou seja, a capacidade de um sistema de utilizar a matéria prima e está retornar ao ponto original após sofrer perturbação durante o processo produtivo (VIKHOREV; GREENOUGH; BROWN, 2013).

A adoção de energias renováveis vem ganhando destaque ambiental na redução das emissões de carbono nas áreas rurais e no auxílio ao desenvolvimento econômico e social das famílias rurais (WANG; GUAN; WU, 2017). Desse modo, a energia renovável descentralizada tem se expandido para atender às necessidades de energia rural, incluindo várias opções como biomassa tradicional, pequenas hidrelétricas, energia fotovoltaica e eólica (IPCC, 2022a).

Nesse sentido, foram criados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são um apelo global estabelecido pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 2015. São 17 objetivos interconectados que fazem parte da Agenda 2030 e abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no mundo (NAÇÕES UNIDAS, 2015).

A utilização da energia elétrica está intrinsicamente ligada com o desenvolvimento da ciência, inovação e tecnologia. Dentre os ODS, o ODS7 busca garantir que todos tenham acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia (NAÇÕES UNIDAS, 2015). Apesar de ter um cunho de desenvolvimento econômico, também traz equilíbrio ambiental e social, sendo a utilização de tecnologias geradoras por fontes limpas e renováveis fomentadora de crescimento nas dimensões de desenvolvimento sustentável (ENGIE, 2021).

Baseado nos ODS, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) desenvolveu os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS), que visam trazer os dados e panorama da realidade brasileira em relação aos IDS. A construção dos IDS no Brasil integra-se ao conjunto de esforços internacionais para concretização das ideias e princípios formulados na Conferência das Nações Unidas. Os IDS, assim como os ODS, colocam a questão energética como indicador de sustentabilidade (IBGE, 2015).

As novas fontes de energia renováveis buscam um equilíbrio entre a sociedade e o meio ambiente, elas se preocupam em reduzir a emissão dos gases poluentes como CO₂, NO_x e SO₂, já que estes são responsáveis pelo aquecimento global e prejudicam diretamente o futuro do planeta e das próximas gerações;

Conscientes desses impactos, o Brasil é signatário e ratificou o Acordo de Paris em 2016 passando a se comprometer na redução das emissões de gases de efeito estufa em 37% em relação aos níveis de 2005 até 2025 e em 43% até 2030 (MMA, 2017); além disso, o Brasil se comprometeu em triplicar a utilização de fonte de energia sem ou com baixa emissão de carbono (BRASIL, 2015).

A elevação de CO₂ na atmosfera é a maior responsável pela intensificação do efeito estufa, o qual causa elevação na temperatura global e leva a graves transtornos climáticos e ambientais. Isso ocorre principalmente devido à destruição das florestas e a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia. Assim, está havendo monitoramento dos gases de efeito estufa e a quantificação de sua emissão para a atmosfera das atividades desenvolvidas pela sociedade (IBGE, 2015).

A energia solar fotovoltaica é uma importante alternativa na diminuição da geração de energia por meio de combustíveis fósseis e, portanto, na redução da emissão de gases de efeito estufa. Para medir a mitigação da emissão de gases de efeito estufa, utiliza-se a comparação em termos de toneladas de gás carbônico equivalente (tCO₂e) (DONES; HECK; HIRSCHBERG, 2014).

Meio ambiente equilibrado é um princípio almejado por todos e essa necessidade de manutenção e equilíbrio do meio ambiente faz com que os recursos sejam mais bem pensados, fazendo com que surjam novas soluções consideradas mais sustentáveis, não apenas objetivando os pilares econômicos e ambientais, mas trazendo a parte social para o centro de discussão, afinal as pessoas fazem parte desse todo, e devem ser colocadas como sujeitos de direito e deveres (CHAVES, 2013).

Para Chaves (2013), a utilização de energias renováveis está em consonância com o desenvolvimento sustentável, pois é uma solução que visa garantir o desenvolvimento social da sociedade atual e das futuras gerações. Em especial, a energia solar fotovoltaica, pois a luz do Sol é um bem livre, ilimitado e não excludente, isso traz essa tecnologia a um patamar de disponibilidade para todos, onde o seu uso por uns não impede o acesso ou a disponibilidade para outros. O que ocorre de forma diferente em outras fontes geradoras como a água doce e os combustíveis fósseis (IPCC, 2014b).

Nesse sentido, observa-se que a energia elétrica pode promover o bem-estar social e econômico dos cidadãos. Conforme relata Dias e Carvalho (2017), os governos mundiais devem nortear as inovações baseadas no uso sustentável de

recursos renováveis, de modo que as inovações tecnológicas de produção de energia possam diminuir as desigualdades sociais.

Essas novas fontes de energia renováveis propõem um equilíbrio entre a sociedade e o meio ambiente. Dentre os principais tipos de energia renovável, a energia solar fotovoltaica vem se destacando no país pela sua modularidade e eficiência, sendo considerada a fonte geradora renovável mais promissora nos próximos anos, capaz de alcançar áreas de difícil acesso e promover um impacto positivo em todos os pilares da sustentabilidade (LÊDO, 2015; SOUZA, 2020).

Portanto, as análises de viabilidade dos empreendimentos que levam consigo o viés da sustentabilidade devem ser avaliados nos três pilares econômico, ambiental e social. Dessa forma, as análises de viabilidade financeira podem ser feitas por meio de indicadores de retorno financeiro do investimento, como o *Payback* (OLIVEIRA, 2021; SILVA et al., 2020).

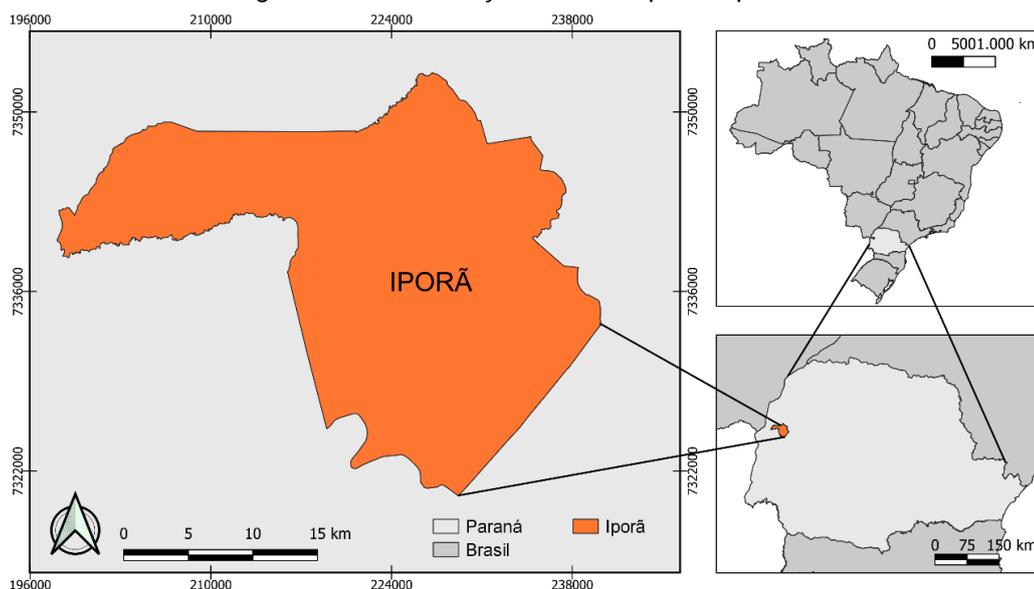
Da mesma forma, as análises de viabilidade ambiental podem ser feitas por meio de cálculos de levantamento de evitação de emissão de gases do efeito estufa, dados em quilogramas ou toneladas de CO₂. Já as análises de viabilidade social são mais complexas de serem quantificadas, mas podem ser realizadas por meio de análises dos impactos direcionados à comunidade em análise ou em um contexto mais abrangente (OLIVEIRA, 2021).

4.3 METODOLOGIA

4.3.1 Caracterização do objeto de estudo

O local de estudo foi o município de Iporã, situado na região noroeste do Estado do Paraná, com Latitude 24°00'10" S e Longitude 53°42'14" O, com altitude média próxima a 400 m. O município possui uma área territorial de 647.894 km², e registrou uma população estimada em 13.926 habitantes em 2019. Em relação a dados socioeconômicos de Iporã, tem-se o salário médio mensal de 1,9 salários-mínimos e o PIB per capita de R\$ 26.062,01, estando na média do Estado (IBGE, 2021). Na Figura 4.2 é apresentado um mapa com a localização geográfica do município de Iporã-PR e sua região de entorno.

Figura 4.2 – Localização do município de Iporã-PR



Fonte: Os autores (2022) com base em IBGE (2021).

A área rural do município de Iporã possui 61.349 hectares de terras e há 2.307 pessoas que possuem ocupação nos estabelecimentos rurais. A agricultura do município se destaca principalmente com a produção de milho e soja, mas também conta com a produção de banana, café, coco, limão, palmito, abacaxi, abóbora, cana-de-açúcar e sorgo. Da mesma forma, a pecuária de Iporã se destaca no rebanho de equinos, bovinos e galináceos, mas também conta com suínos, caprinos, ovinos, patos e similares, além de produção de leite e ovos (IBGE, 2017).

Dentre as características climáticas e geográficas a serem destacadas, o município de Iporã localiza-se no domínio da Floresta Estacional Semidecidual, que constituía a vegetação típica da Mata Atlântica. Possui altitude média de 400m e seu clima geral é subtropical úmido, de clima temperado úmido com verão quente. Nas características geológicas, os solos são classificados como do tipo Arenito Caiuá, um tipo de solo arenoso que necessita de técnicas de correção para o aumento da produtividade agrícola. Em razão do desmatamento da floresta nativa, a região teve impactos nesse tipo de solo, causando assoreamento dos rios e erosões (IPARDES, 2021).

O início desta investigação consiste na identificação e seleção das propriedades rurais da região. A escolha amostral das propriedades foi feita sob a técnica amostral por conveniência que é não probabilística, não aleatória, prioriza a facilidade do acesso, a equivalência da situação do local com o propósito do estudo, o maior acesso a monitoramento, a aceitação da investigação e o acesso a

informações, de modo a selecionar casos que representem a realidade da maioria (YIN, 2010).

Inicialmente, os tamanhos dos empreendimentos fotovoltaicos eram divididos em três grupos e tinham formulários de Solicitação de Acesso diferentes: de pequeno porte até 10kW em microgeração; de médio porte entre 10kW e 75kW em microgeração; de grande porte acima de 75kW em minigeração. Essa divisão da microgeração aconteceu devido à certificação do Inmetro para inversores de até 10kW. Atualmente, a noção de tamanho do sistema fotovoltaico se manteve nessas medidas mesmo estando dividido em diferentes unidades e, geralmente, sistemas com tamanhos acima de 300kW são chamados de usinas, mesmo estando em minigeração (ANEEL, 2022).

Desse modo, foram selecionadas três propriedades, uma de pequeno porte, uma de médio porte e uma de grande porte, visto que não há usinas no município. As análises foram feitas sobre cada propriedade individualmente e suas características são detalhadas nos resultados.

4.3.2 Caracterização da pesquisa

Como parâmetro para esse estudo adotou-se a divisão conceituada no Triple Bottom Line (TBL), que é definida como uma estrutura que incorpora as três dimensões de desempenho de sustentabilidade: social, ambiental e econômica (CORREIA, 2019). O interesse em análises com o TBL tem crescido em grandes corporações com fins lucrativos, em organizações não-governamentais e em órgãos governamentais, mas poucos são os estudos aplicados sobre os empreendimentos rurais ou de menor porte (SLAPER; HALL, 2011).

Ainda não existe um método padrão para calcular o TBL ou para as medidas de cada uma das três categorias do TBL. Entretanto, essa característica permite que uma maior flexibilidade e adaptação da estrutura de análise às necessidades dos diferentes empreendimentos, projetos, políticas e localidades. Assim, os três pilares do TBL não possuem uma unidade de medida em comum. Claramente o pilar econômico é contabilizado em valores monetários, mas os pilares social e ambiental não são tão simples de serem contabilizados. Em alguns casos, valores monetários são atribuídos aos pilares social e ambiental, mas na maioria das vezes são atribuídos

em uma indexação em comparação a outras entidades e localidades (SLAPER; HALL, 2011).

Sendo assim, a pesquisa é um estudo de caso que realizou uma análise sob a perspectiva do TBL, mas sem indexar ou monetizar diretamente os resultados dos pilares social e ambiental, visto que ambos os métodos ainda sugerem subjetividade na análise e peso das medidas. Dessa forma, observa-se que determinar como os sistemas de eletrificação promovem o Desenvolvimento Sustentável é um desafio para os pesquisadores, considerando as dimensões multidisciplinares que influenciam esse desenvolvimento (LOZANO; TABOADA, 2021).

A análise de viabilidade econômica utilizou dados reais de produtividade dos projetos já implementados, visando avaliar a capacidade de retorno financeiro que a produção de energia fotovoltaica está trazendo ao imóvel rural. Desse modo, foram utilizados os seguintes indicadores econômicos em cada caso: o *Payback* Descontado, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE).

A análise de viabilidade ambiental buscou levantar a estimativa da quantidade de emissão de gases do efeito estufa que o sistema solar fotovoltaico anualmente mitigou em termos de emissão de gás carbônico equivalente (CO₂e) e a comparação com árvores adultas. Já a análise de viabilidade social comparou a economia mensal média com valores aproximados de aquisição de bens e serviços para melhoria social.

As análises de sustentabilidade econômica, ambiental e social foram amparadas por alguns dos IDS elaborados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), os quais vem ao encontro dos movimentos internacionais da Comissão das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (UN-CSD) para formulação de indicadores de acompanhamento do progresso dos países na direção do desenvolvimento sustentável (IBGE, 2015).

4.3.3 Coleta e conferência da produtividade energética

Os inversores possuem sensores utilizados para monitorar a produção energética, dos quais são coletados, armazenados e disponibilizados no painel digital do inversor ou disponibilizados por meio do monitoramento do sistema fotovoltaico. Desse modo, os dados de produção anual de cada caso foram coletados no local ou

remotamente e foram utilizados para realizar os cálculos das análises propostas nesse estudo.

A fim de confirmar a correta produtividade de energia, foi feita uma análise com base no dimensionamento de cada sistema fotovoltaico. A estimativa de geração de energia foi realizada por meio do banco de dados solarimétricos e de produtividade do Atlas Solar Paraná (TIEPOLO *et al.*, 2017). A Produtividade Média (Y_d) do município de Iporã-PR utilizada foi de 3,81 kWh/kWp/dia e é uma média histórica que leva em consideração diversos anos de análises.

O cálculo foi feito usando a Equação (1) com base na potência de módulos fotovoltaicos instalada, levando em consideração a defasagem da geração de acordo com o plano de instalação dos módulos fotovoltaicos e com os possíveis sombreamentos, a fim de se encontrar resultados mais precisos. Como o sistema já está instalado, foi utilizada a potência do atual sistema e não foi feito um novo dimensionamento fotovoltaico (MICHELETTI; TELEKEN, 2022; TIEPOLO *et al.*, 2017).

$$Geração_{FV_t} = P_{FV} \cdot Y_d \cdot n_d \cdot TD \quad (1)$$

Onde: $Geração_{FV_t}$ [kWh] é a energia gerada pelo sistema no período avaliado (ano); P_{FV} [kWp] é a potência nominal fotovoltaica instalada; Y_d [kWh/kWp/dia] é a produtividade fotovoltaica diária média com base na irradiação solar local; n_d [dia] é a quantidade de dias do período avaliado (ano); TD [%] é a taxa de desempenho da geração de acordo com o plano de instalação do painel fotovoltaico e com os possíveis sombreamentos.

4.3.4 Método da análise econômica de sustentabilidade

A pesquisa buscou estimar a viabilidade econômica do projeto já implementado, visando avaliar a capacidade de retorno financeiro que a produção de energia fotovoltaica está trazendo ao imóvel rural. Deste modo, foram utilizados quatro indicadores econômicos em cada caso: o *Payback* Descontado, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE).

Um dos primeiros princípios a ser observado em uma análise financeira é o prazo de recuperação de um investimento. Assim, o *Payback* Simples verifica quanto tempo leva para o saldo do investimento seja igual a zero, ou seja, a partir de qual momento o investimento passa a dar lucro. Esse indicador é uma forma fácil e direta para estimar o prazo de retorno de um projeto de investimento, no qual somente leva em consideração o valor do investimento e a economia anual do sistema. Entretanto, o resultado não é muito preciso, pois é importante considerar nos cálculos outras variáveis que influenciam nos valores monetários (FAMÁ; BRUNI, 2003).

Sendo assim, a análise utilizou o *Payback* Descontado para observar o tempo de retorno do investimento, que é uma versão mais completa do que o *Payback* Simples, pois considera o valor do dinheiro no tempo utilizando uma taxa de desconto e pode levar em consideração nos cálculos a inflação energética com os aumentos tarifários de energia, a taxa de depreciação do sistema fotovoltaico ou taxas de inflação. Nesse sentido, uma planilha pode ser calculada, a fim de se obter os fluxos de caixa de cada ano do período considerado (CHEROBIM; LEMES; RIGO, 2017; NASCIMENTO; SILVA, 2019; OLIVEIRA, 2021).

Para realizar os cálculos matemáticos da análise do *Payback*, a fim de encontrar as informações no período atual t , que é o primeiro item da planilha e é dado em anos, são utilizadas as fórmulas que levam em consideração os dados existentes ou já calculados no período atual t ou do período anterior $t-1$, realizando sucessivos cálculos até encontrar os resultados de todos os períodos. A funcionalidade de cálculos em planilha do programa Excel auxilia nesse processo e foi utilizada nessa pesquisa.

O segundo item da planilha é o cálculo da geração de energia fotovoltaica em cada período t anos. Esse cálculo levou em consideração a taxa de Depreciação [%] da produtividade anual dos módulos fotovoltaicos. Na maioria dos casos, a garantia é de pelo menos 80% de rendimento em 25 anos, a qual resulta em uma Depreciação máxima de 0,8% ao ano (SANTOS; POSSER; GARCIA, 2020). A análise envolvendo depreciação deve manter o primeiro ano de produção igual ao da estimativa anual e proceder com o desconto progressivo nos anos seguintes. A análise levou em consideração a produção de energia anual referente aos 12 meses dos dados coletados.

$$GeraçãoFV_t = GeraçãoAnual_{média} \cdot (1 - Depreciação)^{t-1} \quad (2)$$

O terceiro item da planilha é o valor do Rendimento que o sistema fotovoltaico oferece anualmente. Ele baseia-se no valor monetário que a produtividade fotovoltaica traz de economia, levando em consideração o reajuste anual de energia elétrica, o qual somente acontece no ano seguinte ao ano da tarifa de energia analisada. A Tarifa de energia vigente varia conforme o enquadramento de cada imóvel rural e seus benefícios. O reajuste da tarifa de energia tem histórico de aumento de 9,4% ao ano em média (COPEL, 2022).

$$Rendimento_t = GeraçãoFV_t \times Tarifa \times (1 + Reajuste)^{t-1} \quad (3)$$

O quarto item da planilha é o Investimento. O valor do Investimento Inicial, também chamado de CAPEX, é o total gasto na implementação do sistema fotovoltaico. Nos anos seguintes, o valor do Investimento é o valor da Manutenção que é calculada com base no valor total do Investimento Inicial. Os custos operacionais, também chamado de OPEX, levam em consideração uma substituição do inversor, limpezas dos equipamentos, manutenção de cabos e outros itens, na qual a Taxa de Manutenção é de aproximadamente 0,5% do Investimento Inicial ao ano (SANTOS; POSSER; GARCIA, 2020).

$$Investimento_0 = InvestimentoInicial \quad (4)$$

$$Investimento_t = Manutenção + Financiamento \quad (5)$$

A parcela do financiamento utiliza a função *PGTO* (*taxa; nper; vp*), que leva em consideração a incidência de taxa de juros (*taxa*) sobre o valor devedor (*vp*) dentro do período de vigência do financiamento (*nper*) de cada caso. O quinto item da planilha é o Fluxo de Caixa, que é a soma do valor do Rendimento com o valor do Investimento, sendo este negativo.

$$FluxoCaixa_t = Rendimento_t + Investimento_t \quad (6)$$

O sexto item da planilha é Valor Presente, que considera a aplicação da inflação no Fluxo de Caixa ao longo dos anos. O valor da Inflação considerada foi o IPCA de 2022 com 5,78% (BRASIL INDICADORES, 2023).

$$ValorPresente_t = FluxoCaixa_t \times (1 + Inflação)^{-t} \quad (7)$$

E, por fim, o sétimo item da planilha é o VPL de cada ano t, que é a soma líquida dos Valores Presentes do ano atual e dos anos anteriores. Sendo assim, o VPL analisado é o VPL do último ano considerado. O VPL indica o valor de retorno do investimento ao final do período proposto.

$$VPL_t = VPL_{t-1} + ValorPresente_t \quad (8)$$

Desse modo, o Payback Descontado é o período em que o VPL é igual a zero, ou seja, o momento no qual o investimento se paga e passa a dar lucro. O Excel auxilia a procurar um valor mais preciso do Payback Descontado dentro da planilha com os valores anuais.

$$PaybackDescontado = t \rightarrow VPL_t = 0 \quad (9)$$

A análise também utilizou a TIR do investimento, a qual representa uma taxa para a qual o valor presente das entradas de caixa do projeto se iguala ao valor presente dos desembolsos, sendo uma referência bastante utilizada nas análises financeiras. Essa taxa é interna no sentido de levar em consideração somente os fluxos de caixa do investimento e não taxas oferecidas no mercado, devendo, dessa forma, conhecer os desembolsos e os fluxos de caixa líquidos. Assim, o cálculo da TIR pode ser realizado utilizando-se a Equação (10) (CHEROBIM; LEMES; RIGO, 2017; NASCIMENTO; SILVA, 2019; OLIVEIRA, 2021).

$$\sum_{t=1}^n \frac{FluxoCaixa_t}{(1 + TIR)^t} = 0 \quad (10)$$

Onde Σ é o somatório da data 1 até a data n; $FluxoCaixa_t$ é o fluxo de caixa no período t (ano); $TIR [\%]$ é a Taxa Interna de Retorno. Observa-se que o Fluxo de Caixa deve levar em consideração o valor do investimento. Também é possível encontrar o TIR através da função específica no próprio Excel. Dessa maneira, a TIR encontrada pode ser comparada à Taxa Mínima de Atratividade (TMA), onde: se TIR maior que TMA, o investimento é economicamente viável; se TIR é igual TMA, o resultado não oferece ganho ou prejuízo; se TIR menor que TMA, o investimento não é economicamente atrativo. Para realizar a comparação, utilizou-se uma TMA igual a taxa Selic de 2022, que foi de 13,75% (BRASIL INDICADORES, 2023).

Conforme evolui a compreensão dos sistemas fotovoltaicos, está cada vez mais se utilizando o LCOE como parâmetro de viabilidade econômica nos projetos. Assim, calculou-se o LCOE com base nos valores de Investimento Inicial e financiamento (CAPEX) e nos valores de manutenção e operação (OPEX). Considerou-se um período de vida útil do sistema igual à garantia potência de 25 anos dos módulos fotovoltaicos (ALDERSEY-WILLIAMS; RUBERT, 2019).

$$LCOE = \frac{Investimento + Juros + Manutenção - ValorFinal}{GeraçãoTotal} \quad (11)$$

Desse modo, o LCOE fornece uma indicação do custo unitário de energia ao longo toda a vida de um projeto, incluindo custos de capital, operação e financiamento. Ao final da vida útil, o sistema pode ainda produzir energia por mais tempo e, além disso, não se espera que tenha valor comercial (Valor Final igual a R\$0,00) em função do surgimento de novas tecnologias ainda mais eficientes.

4.3.5 Método da análise ambiental de sustentabilidade

A produção de energia elétrica por fontes convencionais não renováveis, pode emitir gases poluentes como óxidos de nitrogênio (NOx), dióxido de enxofre (SO₂) e dióxido de carbono (CO₂). Nesse sentido, a pesquisa sugere uma proposição de análise de modo a estimar a contribuição do sistema solar fotovoltaico com o pilar ambiental de sustentabilidade com os seguintes indicadores numéricos: Mitigação de Emissão de CO₂ Equivalente (CO₂e), Compensação de CO₂ em Reflorestamento (número de árvores) e Valor Monetário em Créditos de Carbono (R\$).

A massa de emissão de CO₂ equivalente mitigada na geração de energia solar pode ser encontrada subtraindo a massa de emissão de CO₂ equivalente na geração de energia convencional da massa de emissão de CO₂ equivalente da geração de energia solar fotovoltaica, a qual leva em consideração as emissões do processo produtivo dos equipamentos fotovoltaicos (OLIVEIRA, 2021; DONES; HECK; HIRSCHBERG, 2014).

Assim, conforme Pereira *et al.* (2014), a massa de emissão pode ser encontrada multiplicando a quantidade de energia produzida no período em questão pelo fator de emissão energético da fonte geradora que, colocando em evidência, resulta na Equação (12).

$$M_{CO_2e} = E_{fv} \times (k_{CO_2e} - k_{CO_2e,fv}) \quad (12)$$

Onde M_{CO_2e} [tCO₂e/ano] é a massa CO₂ equivalente mitigada, ou seja, o total de emissões que foram deixadas de emitir para a atmosfera pela utilização do sistema solar fotovoltaico convertidos em massa de CO₂ equivalente; E_{fv} [kWh/ano] é a energia produzida por meio do sistema fotovoltaico em questão por ano; k_{CO_2} [tCO₂e/kWh] é o fator energético de emissão equivalente da fonte geradora convencional em cada caso; $k_{CO_2e,fv}$ [tCO₂e/kWh] é o fator energético de emissão equivalente da fonte de energia solar fotovoltaica, que é igual a $66 \cdot 10^{-6}$ tCO₂e/kWh, média entre as tecnologias de silício monocristalina e policristalina. Observa-se que todos os valores de fator energético de emissão equivalente levam em consideração o processo de construção ou fabricação, além do processo de operação (DONES; HECK; HIRSCHBERG, 2014).

Deste modo, as proporções entre as fontes geradoras foram coletadas da ANEEL (2023) e o parâmetro fator energético de emissão equivalente foram coletadas de Dones, Heck e Hirschberg (2014). Nesse sentido, foram avaliadas três situações:

1. A situação em que a geração vem praticamente totalitária de fonte hidrelétrica, com fator energético de emissão equivalente igual a $340 \cdot 10^{-6}$ tCO₂e/kWh;
2. A situação em que a geração vem por fonte hidrelétrica (70% do total), mas é mantida por todas as fontes térmicas (30% do total) durante os períodos de estiagem chamados de períodos de Escassez Hídrica, do qual 60% são de gás natural, 30% de petróleo e 10% de carvão mineral, com fator energético de emissão equivalente igual a $430 \cdot 10^{-6}$ tCO₂e/kWh.

3. A situação em que a energia é gerada por meio de gerador a diesel (petróleo), utilizada nos momentos emergenciais ou em locais sem acesso à rede de energia com fator energético de emissão equivalente igual a $880.10^{-6} \text{ tCO}_2\text{e/kWh}$.

Por fim, foi realizada uma média anual da utilização dessas fontes energéticas, com base no período em que elas estão atuando. A Escassez Hídrica e demais bandeiras tarifárias perduram por 63% do ano em média desde 2015 (SOLSTICIO ENERGIA, 2023). Estima-se que o Gerador à Diesel atue uma média de 80 horas mensais durante as quedas de energia no local dos três casos, ou seja, 1% do ano. Assim, a média foi calculada com base em 36% do período na situação 1 com hidrelétricas, 63% do período na situação 2 em escassez hídrica e 1% do período na situação 3 com geração própria à diesel.

O resultado desta análise expõe uma equivalência de emissões que são discutidos em relação ao quanto esse valor representa na esfera de preservação ambiental. Assim, também foi realizada uma comparação desse total de mitigação de emissões com o a captação de CO_2 do reflorestamento, no qual sugere-se que são necessárias 6 árvores adultas para compensar a emissão de 1 tCO_2e . Nem todas as árvores captam carbono da mesma maneira, assim a análise considera árvores de florestas mistas com grande variedade de espécies (SELECTRA, 2022).

Como forma de incentivar a redução das emissões de gases poluentes na atmosfera, o governo adotou uma medida chamada de crédito de carbono, o qual é um importante instrumento na luta contra as mudanças climáticas, também foi realizada uma análise ambiental calculando o valor monetário do crédito de carbono referente à compensação de CO_2 que o sistema fotovoltaico mitigou ao longo do ano. Levou-se em consideração que 1 crédito de carbono possui valor de R\$ 22,00 para cada 1 tCO_2e (CREDCARBO, 2022).

Assim, a análise contrastou a pesquisa com o IDS do seguimento ambiental nº 1, que versam sobre as emissões dos gases associados ao efeito estufa de origem nas ações humanas, e com o IDS ambiental nº 6, que versam sobre as terras em uso agrossilvipastoril, os quais objetivam o desenvolvimento sustentável, buscando reduzir as consequências das mudanças climáticas (IBGE, 2015).

4.3.6 Método da análise social de sustentabilidade

Com base nos dados da análise energética e da análise econômica, oportunizou-se compreender os aspectos de influência no âmbito social da inserção do sistema fotovoltaico na propriedade rural de cada caso. Dessa forma, a pesquisa buscou elencar e analisar as mudanças na qualidade de vida das pessoas, observando os impactos que a energia solar fotovoltaica proporcionou nas atividades agrícolas. Ressalta-se que não há uma análise padrão para o pilar social e que a quantificação dos benefícios em valores monetários é relativa a diversos fatores (OLIVEIRA, 2021).

Ao se tratar de indicador social, é relevante compreender que a visão do crescimento econômico de um país não pode ser medida apenas pelo Produto Interno Bruto – PIB, mas também na repartição da riqueza gerada e na transformação desse crescimento em melhoria da qualidade de vida e bem-estar comum. Portanto, optou-se por relacionar os dados encontrados com os IDS do IBGE (IBGE, 2015).

Assim, a análise contrastou a pesquisa com o IDS socioeconômico nº 45, que versa sobre o consumo de energia per capita, e com os IDS sociais nº 23 e nº 26, que versam sobre a distribuição do rendimento e o rendimento médio mensal, os quais objetivam o desenvolvimento sustentável, buscando reduzir desigualdades e melhoria da qualidade de vida (IBGE, 2015).

Esse aumento no trabalho e rendimento elencado no IDS nº 23 traz impactos sociais e fomentam a chamada qualidade de vida que pode ser conceituada como um parâmetro amplo e diversificado, que passa por áreas como lazer, gastronomia, entretenimento, capacidade de consumo, socialização, saúde, educação e segurança pública (IBGE, 2015).

Desse modo, a pesquisa sugeriu uma proposição de análise, na qual foi elaborada uma tabela contendo os valores mensais de serviços ou de prestações de bens materiais que poderiam ser adquiridos por meio dos valores economizados com energia elétrica. Os itens elencados na tabela foram sugeridos pelos próprios proprietários dos imóveis rurais estudados como exemplos de anseio por melhoria. Assim, comparou-se o valor evitado com a produção de energia com os benefícios que auxiliariam na qualidade de vida das pessoas que vivem na propriedade rural ou que dependem dos rendimentos dela.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Descrição dos sistemas e conferência da produtividade energética

O Caso 1 analisou um imóvel rural com um sistema fotovoltaico de pequeno porte, mostrado na Figura 4.3, o qual é considerado ser de agricultura familiar que produz hortaliças e bovinos de leite em pequena quantidade. O sistema fotovoltaico do Caso 1 contém 24 módulos BYD de 330 Wp, totalizando 7,92 kWp, conectados a 1 inversor Fronius de 6kW. O painel fotovoltaico está orientado a 22° com uma inclinação de aproximadamente 16°. O sistema está localizado com coordenadas geográficas -24,001999; -53,663781.

O conjunto de módulos possui ótima orientação e posicionamento, resultando em um TD aproximado de 98%. Assim, calculou-se a produtividade mensal média de 900 kWh por mês. Conforme os dados de geração coletados no inversor Fronius, a média mensal de produção entre outubro de 2021 e setembro de 2022 foi de 932 kWh, corroborado pela estimativa com menos de 5% de diferença.

Figura 4.3 - Vista do sistema fotovoltaico de pequeno porte do Caso 1



Fonte: Os autores (2023).

Na sequência, o segundo estudo de caso analisou um imóvel rural com um sistema fotovoltaico de médio porte, mostrado na Figura 4.4, contendo um pesqueiro com aeradores, irrigação de hortas e pomares, um restaurante e um poço artesiano.

O sistema fotovoltaico do Caso 2 contém 140 módulos Jinko de 340 Wp, totalizando 47,6 kWp, conectados a 5 inversores Fronius de 8kW, um total de 40kW. O painel fotovoltaico está orientado a 123° com uma inclinação de aproximadamente 10°. O sistema está localizado com coordenadas geográficas -24,014405; -53,688768.

O conjunto de módulos possui boa orientação e posicionamento, não há sombreamento, mas há excesso de calor em razão dos tanques de peixes, resultando em um TD aproximado de 95%. Assim, calculou-se a produtividade mensal média de 5.236 kWh por mês. Conforme os dados de geração coletados no inversor Fronius, a média mensal de produção entre setembro de 2021 e outubro de 2022 foi de 5.074 kWh, corroborado pela estimativa com menos de 5% de diferença.

Figura 4.4 – Vista do sistema fotovoltaico de médio porte do Caso 2



Fonte: Os autores (2023).

Já o Caso 3 analisou um imóvel rural com um sistema fotovoltaico de grande porte, mostrado na Figura 4.5, com quatro barracões de granjas de aves, duas residências e um poço artesiano. O sistema fotovoltaico do Caso 3 contém 540 módulos Globo Brasil de 330 Wp, totalizando 178,2 kWp, conectados a 4 inversores Growatt, dois de 33kW e dois de 40kW, um total de 146kW. Observa-se que esse sistema está dividido igualmente entre duas unidades consumidoras na mesma propriedade. O painel fotovoltaico está orientado a 32° com uma inclinação de

aproximadamente 7°. O sistema está localizado com coordenadas geográficas - 23.990767, -53.619757.

O conjunto de módulos possui boa orientação e posicionamento com baixa inclinação, não há sombreamento, mas há acúmulo de poeira, resultando em um TD aproximado de 98%. Assim, calculou-se a produtividade mensal média de 20.620 kWh. Conforme os dados de geração coletados no inversor Growatt, a média mensal de produção entre setembro de 2021 e outubro de 2022 foi de 21.480 kWh, corroborado pela estimativa com menos de 5% de diferença.

Figura 4.5 – Vista do sistema fotovoltaico de grande porte do Caso 3



Fonte: Os autores (2023).

Nesse fluxo, os valores de produtividade encontrados estão muito próximos do valor realmente produzido nos 12 meses de produção. Assim, confirma-se a veracidade dos valores de geração coletados, disponibilizando-os para o desenvolvimento das análises de sustentabilidade econômica, ambiental e social.

4.4.2 Análise econômica de sustentabilidade

Com base nos dados já mencionados de depreciação de 0,8% ao ano, na inflação de 5,8% ao ano, no reajuste da tarifa de energia de 9,4% ao ano, foram

calculadas as planilhas da Análise Econômica de cada um dos três casos. Os valores de produtividade mensal são a média dos valores coletados em 12 meses de produção dos sistemas fotovoltaicos de cada caso.

No Caso 1, o valor do investimento inicial foi de R\$ 46.000,00. A tarifa de energia é de 0,56 R\$/kWh por se enquadrar na categoria Rural. O projeto foi financiado por meio do Programa de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf), na linha de financiamento Pronaf Eco com juros de 3,5% ao ano, com duração de 8 anos.

No Caso 2, o valor do investimento inicial foi de R\$ 180.000,00. A tarifa de energia é de 0,72 R\$/kWh, pois foi enquadrado na categoria Comercial em função do restaurante que há no local. O projeto foi financiado por meio de uma linha de financiamento própria do Banco Sicredi com juros de 7,3% ao ano mais CDI, com duração de 5 anos. A CDI utilizada na análise foi a média anual dos últimos 10 anos de 8,7% (BRASIL INDICADORES, 2023).

No Caso 3, o valor do investimento inicial foi de R\$ 810.000,00. A tarifa de energia é de 0,56 R\$/kWh por se enquadrar na categoria Rural (COPEL, 2022). O projeto foi financiado por meio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), na linha de financiamento Fundo Clima com juros de 4% ao ano, com duração de 10 anos.

Sendo assim, a Tabela 4.2 apresenta um agrupamento dos resultados dos cálculos realizados com base nas planilhas de Análise Econômica, dispostos de forma completa no Apêndice A, elucidando os indicadores econômicos de cada caso.

Analisa-se melhor a viabilidade dos três casos ao comparar o resultado do TIR de cada um deles com uma TMA que, nesse caso, foi igual a taxa Selic de 2022 com 13,75% (BRASIL INDICADORES, 2023). Assim, confirma-se a boa viabilidade econômica em razão dos valores positivos do VPL e dos valores TIR serem maiores que a TMA utilizada na comparação.

Tabela 4.2 – Resultados da Análise Econômica dos três casos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Produtividade mensal	932 kWh	5.074 kWh	21.480 kWh
Investimento Inicial	R\$ 46.000,00	R\$ 180.000,00	R\$ 810.000,00
LCOE	233,10 R\$/MWh	214,76 R\$/MWh	187,64 R\$/MWh
VPL	R\$ 149.591,99	R\$ 1.159.248,64	R\$ 3.709.856,48
TIR	19,81%	27,02%	24,06%
Payback Descontado	8,2 anos	6,0 anos	6,3 anos

Fonte: Os autores (2023).

Do mesmo modo, o *Payback* Descontado aponta o momento em que o empreendimento de cada um dos três casos está liquidado. Assim, o tempo de liquidez calculado do Caso 1 foi de 8,2 anos, do Caso 2 foi de 6,0 anos e do Caso 3 de 6,3 anos.

Observa-se que o Caso 1 e o Caso 3 adquiriram equipamento nacional, que é requisito para financiamentos com menores taxas de juros e, assim, eles têm um valor de Investimento Inicial proporcionalmente maior. Já o Caso 2, destaca-se que a fatura de energia tem custo maior e, portanto, o prazo de retorno do Investimento Inicial é mais curto com a compensação dessa energia.

Desse modo, a energia solar aplicada nas atividades agrícolas é considerada uma aliada na redução de custos, que normalmente são elevados nos seguimentos rurais, chegando a ser o segundo ou terceiro maior custo da produção, mas a energia solar promove mais do que a redução de custos operacionais do setor, mas também para a eficiência dos processos realizados por agricultores. Isso porque diversas culturas, como criação de ovinos, avicultura e laticínios, demandam práticas intensivas em energia (PORTAL SOLAR, 2019).

Comparando os valores de LCOE de cada sistema, observa-se que o custo do kWh é mais caro em sistemas menores e isso acaba sendo um padrão para sistemas em uma mesma categoria em uma mesma região. Entretanto, o tipo de financiamento, a tarifa de outros fatores influencia essa análise de viabilidade. Observa-se que os valores dos três casos estão bem abaixo da tarifa média de consumo elétrico do setor rural de 2021 que foi de 505 R\$/MWh (EPE, 2022a)

4.4.3 Análise ambiental de sustentabilidade

Com base nos dados já mencionados de emissão por tipo de produção de energia elétrica, calculou-se a média de mitigação de emissão dos três casos. Também foi calculada sua compensação em reflorestamento de árvores de espécies mistas e o valor monetário em crédito de carbono, dispostos na Tabela 4.3, lembrando que essa análise leva em consideração os valores de emissões equivalentes do processo de fabricação e descarte dos sistemas fotovoltaicos.

Tabela 4.3 – Resultados da Análise Ambiental dos três casos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Energia anual compensada	11.184 kWh	60.888 kWh	257.760 kWh
Mitigação anual média de carbono equivalente	3,76 tCO ₂ e	20,46 tCO ₂ e	86,63 tCO ₂ e
Compensação de CO₂ anual em reflorestamento	23 árvores	123 árvores	520 árvores
Valor monetário anual em crédito de carbono	R\$ 82,72	R\$ 450,12	R\$ 1.905,86

Fonte: Os autores (2023).

Observa-se que a mitigação de emissão de gases é proporcional à potência do sistema fotovoltaico instalado e segue em consonância com o IDS nº 1 do IBGE. Assim, a propriedade rural de cada caso contribui com a redução de emissões de gases de efeito estufa em 3,76 tCO₂e no Caso 1, em 20,46 tCO₂e no Caso 2 e em 86,63 tCO₂e no Caso 3 com a geração de energia solar fotovoltaica. Conseqüentemente, elas contribuem com a mitigação dos impactos ambientais e auxiliam no enfrentamento das mudanças climáticas de modo equivalente à captura de CO₂ de 23 árvores no Caso 1, 123 árvores no Caso 2 e 520 árvores no Caso 3.

Além disso, observa-se que o valor monetário anual em crédito de carbono foi R\$ 82,72 no Caso 1, R\$ 450,12 no Caso 2 e R\$ 1.905,86 no Caso 3. Esse não parece ser um valor anualmente expressivo, mas que pode contribuir com as demais mitigações de CO₂ das atividades rurais de cada um dos locais como plantio de florestas e com a implementação de novas tecnologias. Contudo, observa-se que a

venda dos créditos de carbono requer um procedimento administrativo e que pode ser negociada apenas em mercados específicos (CREDCARBO, 2022).

Nota-se relevância também em citar a questão da disposição dos módulos fotovoltaicos no solo, contrapondo o desempenho do IDS nº 6 sobre as terras em uso agrossilvipastoril com manejo de árvores (IBGE, 2015). Nesse caso, a competição de produtividade agrícola contra a produtividade energética torna-se uma questão relativa ao tema.

Entretanto, essa situação pode ser aliviada assim como ocorre no Caso 2, no qual o sistema fotovoltaico iria ser disposto no solo por falta de telhado compatível, mas ao invés disso foi criada uma estrutura útil para outras atividades rurais. Por fim, sugere-se que os arranjos fotovoltaicos não devem ser comparados integralmente com os benefícios de uma área de reflorestamento, mas sim como uma forma de mitigar os impactos ambientais.

4.4.4 Análise social de sustentabilidade

Um dos fatores elencados como indicador de desenvolvimento por muitas agências nacionais e internacionais é a energia. Assim, o consumo de eletricidade associado a informações populacionais auxilia na análise de acesso à energia per capita e a intensidade de uso de energia por pessoa em cada região geográfica. Apesar do Estado do Paraná ser o quarto maior produtor de energia do país em 2020 e o quinto do Brasil em IDH e PIB, ainda há algumas áreas rurais do Estado que estão em defasagem na eletrificação e modernização rural (IBGE, 2020; ANEEL, 2020).

Além disso, o consumo de energia per capita é apontado pelo IDS socioeconômico nº 45 que versa sobre o consumo de energia *per capita*, onde parte dessa energia é utilizada na manutenção do bem-estar da população. O nível de desenvolvimento do país está relacionado com o consumo de energia per capita e, portanto, o desenvolvimento sustentável deve atender às demandas energéticas da população principalmente por meio de fontes de energia renováveis e limpas (IBGE, 2015).

Assim, o município de Iporã possui uma média de consumo de energia elétrica por habitante de 2.500 kWh/habitante que, comparado aos outros municípios do Estado do Paraná, possui significância em relação ao PIB, mas não possui significância com relação à quantidade de trabalhadores na área rural (PENTEADO;

SILVA; MIECOANSKI (2022). Entretanto, esse valor está um pouco abaixo da média da região Sul brasileira de 2.900 kWh/habitante (EPE, 2021), mostrando que a modernização das atividades econômicas do município ainda está em desenvolvimento e, conseqüentemente, as melhorias sociais também.

Dessa forma, os dados de produtividade e de redução de custos com o consumo de energia elétrica de cada um dos casos estudados estão dispostos na Tabela 4.4 e variam conforme a produtividade dos kits fotovoltaicos instalados. Essa economia pode ser um fator de aumento no rendimento médio do agricultor, fazendo com que esse tenha mais acesso a produtos e serviços, aumentando a sua qualidade de vida.

Para elucidar a possível melhora na qualidade de vida dos casos estudados e com base no IDS nº 23, a Tabela 4.5 expõe o levantamento monetário de custos mensais de serviços ou de prestações de bens materiais que podem ser parcialmente ou integralmente acessíveis aos valores economizados com energia elétrica pelos imóveis rurais estudados e que auxiliariam na qualidade de vida das pessoas que vivem na propriedade rural ou que dependem dos rendimentos dela.

Portanto, pode-se exemplificar essa melhora social realizando comparações entre os valores economizados com os valores mensais dos bens e serviços adquiridos. O Caso 1 com economia mensal de R\$ 521,92 seria suficiente para a aquisição de um plano de saúde individual ou contribuiria em grande parte com a prestação de uma viagem familiar ou com a mensalidade de escola particular infantil. O Caso 2 com economia mensal de R\$ 3.653,28 seria suficiente para um ou mais de um dos três itens já citados, ou viabilizar o financiamento de uma picape utilitária ou de um maquinário agrícola de pequeno porte como um trator. Já o Caso 3 com economia mensal de R\$ 12.028,80 viabilizaria a aquisição de qualquer um desses itens ou até de um financiamento de um maquinário agrícola de grande porte como uma colheitadeira.

Da mesma forma, é relevante relacionar os resultados encontrados na análise econômica com o IDS social nº 26, que trata sobre o rendimento médio mensal da população, e com o IDS nº 23 que expressa a distribuição desse rendimento, de forma a avaliar se o crescimento econômico promove melhora da qualidade de vida, além de contribuir para o bem-estar comum e para a redução de desigualdades sociais dos indivíduos, famílias e grupos sociais (IBGE, 2015).

Tabela 4.4 – Média de economia do imóvel rural com energia elétrica

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Produtividade anual	11.184 kWh	60.888 kWh	257.760 kWh
Economia anual	R\$ 6.263,04	R\$ 43.839,36	R\$ 144.345,60
Economia mensal	R\$ 521,92	R\$ 3.653,28	R\$ 12.028,80

Fonte: Os autores (2023).

Tabela 4.5 – Valor da prestação ou mensalidade de bens e serviços para melhoria social

Categoria	Bens/Serviços	Prestação/Mensalidade
LAZER	Viagem Familiar 2023 ¹	R\$ 637,71
EDUCAÇÃO	Escola particular infantil ²	R\$ 826,25
SAÚDE	Plano de saúde Individual ³	R\$ 300,03
VEÍCULO	Picape Leve 2022 ⁴	R\$ 1.386,97 ⁵
MAQUINÁRIO	Trator 2015 ⁶	R\$ 1.908,74 ⁵
MAQUINÁRIO	Colheitadeira 2016 ⁷	R\$ 10.492,01 ⁵

Fonte: Os autores (2023).

¹ Viagem CVC Familiar de Maringá para Porto Seguro (2 adultos e 2 crianças) em setembro de 2023, inclui ida e volta aérea, hospedagem, *transfer* e *city tour*. Valor R\$ 7.652,52 parcelado em 12x sem juros, orçamento feito em novembro de 2022. Disponível em: <https://www.cvc.com.br/>

² Média de valor da mensalidade de escolas particulares no estado do Paraná. Disponível em: <https://www.melhorescola.com.br/escola/por-mensalidade/parana#:~:text=A%20m%C3%A9dia%20de%20valor%20da%20mensalidade%20no%20estado,%C3%A9%20R%24%20826%2C25>

³ Média de preços plano de saúde UNIMED PR individual. Disponível em: <https://exame.com/invest/minhas-financas/os-precos-medios-dos-planos-de-saude-particulares-no-brasil/>

⁴ Valor tabela FIPE R\$ 102.788,00. Disponível em: <https://www.icarros.com.br/tabela-fipe/fiat/strada/2022/strada-1.3-cabine-dupla-freedom/meucarro>

⁵ Cálculo de financiamento de 120 meses disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/calculadorFinanciamentoPrestacoesFixas.do>; com juros de 10,50% a. a. referente ao plano safra 2022/2023 na linha de financiamento INOVAGRO disponível em: <https://globorural.globo.com/Noticias/Economia/noticia/2022/06/plano-safra-20222023-soma-r-3408-bilhoes-e-traz-juros-maiores.html>

⁶ Valor tabela FIPE R\$ 141.456,00. Disponível em: <https://tpt.fipe.org.br/TabelaMA.aspx>

⁷ Valor tabela FIPE R\$ 777.560,00. Disponível em: <https://tpt.fipe.org.br/TabelaMA.aspx>

O rendimento mensal médio é proveniente de todas as fontes (trabalho, capital e transferências) e é expresso em reais (R\$). No Paraná, rendimento mensal médio é de R\$1.640, um valor acima da média nacional (IBGE, 2015). Observa-se o rendimento médio dos agricultores teve um crescimento expressivo desde os anos 2000, com aumento de 51% nesse período (MAIA; SAKAMOTO, 2014). Esse aumento está relacionado com a valorização monetária, com a melhoria nas moradias e nas estruturas de trabalho, e com ganhos de produtividade agrícola, intensificada pelas inovações tecnológicas. Assim, o IDS nº 26 auxilia na compreensão sobre a produção de energia ser capaz de promover um aumento no rendimento dos agricultores de cada caso que, conseqüentemente, promoveria melhor qualidade de vida e bem-estar.

Com essas informações pode-se observar que o acesso à energia elétrica e a viabilização por fontes geradoras de energia renovável é um indicador que auxilia na diminuição da pobreza, marginalização e desigualdades sociais e regionais (SILVA, 2020). Assim, o fomento da segurança energética e de serviços públicos que requerem energia elétrica promove a preservação ambiental e o bem-estar social (IBGE, 2015).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso permitiu ter dados reais de propriedades rurais de pequeno, médio e grande porte do município de Iporã-PR. A análise econômica demonstrou que os sistemas fotovoltaicos dos três casos contribuem com os locais onde estão instalados. As contribuições econômicas foram facilmente compreendidas por meio dos valores numéricos. Todavia, nem sempre ficam evidentes as contribuições ambientais e sociais que eles oferecem.

Desse modo, a pesquisa analisou valores de melhoria ambiental e social, mostrando os benefícios aos imóveis rurais estudados, às pessoas envolvidas e ao meio ambiente. Assim, por meio desses dados foi possível encontrar resultados concretos de análise de sustentabilidade nos três pilares, permitindo uma melhor avaliação do desenvolvimento rural sustentável nesses locais.

Nesse sentido, a utilização da tecnologia fotovoltaica auxilia na redução das emissões de Carbono, não emitindo gases do efeito estufa durante a operação do sistema. Entretanto, isso não significa que esse processo de geração de energia não possua impactos ambientais, pois o processo de fabricação dos equipamentos

geradores fotovoltaicos demanda grandes quantidades de outras fontes de energia, além dos processos de manutenção, limpeza, desmontagem e descarte ou reciclagem desses equipamentos. Mesmo assim, a emissão de CO₂ é muito mais baixa em relação a outras fontes geradoras mais danosas e agressivas ao meio ambiente, impactando significativamente no pilar ambiental de sustentabilidade nas atividades rurais.

Os empreendimentos de energia solar fotovoltaica na área rural promovem a compensação dos custos com energia elétrica. Dessa forma, alivia-se as despesas com esse item e permite-se utilizar uma quantidade maior de energia para as atividades produtivas que, além de ampliar a produtividade, melhoram a qualidade e dignidade do trabalho na utilização de ambientes mais iluminados, condicionadores de ar, motores e equipamentos que substituem o trabalho pesado, entre outros itens. Portanto, a implementação de sistemas fotovoltaicos impacta, trazendo melhorias também no pilar social de sustentabilidade nas atividades rurais.

REFERÊNCIAS

ABSOLAR (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica). **Panorama da solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 27 fev. 2023.

ALDERSEY-WILLIAMS, J.; RUBERT, T. Levelised cost of energy – A theoretical justification and critical assessment. **Energy Policy**, v. 124, p. 169–179, 1 jan. 2019. DOI 10.1016/j.enpol.2018.10.004.

ALTIERI, M. **Agroecologia: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Editora da UFRGS, 2004. 119 p.

ALVES, E.; SOUZA, G. S. Pequenos estabelecimentos também enriquecem? Pedras e tropeços, **Revista de Política Agrícola**, Brasília, v. 24, n. 3, p. 7-21, jul./set., 2015.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração Distribuída: Saiba mais sobre micro e minigeração distribuída**. MME, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida>. Acesso em: 17 fev. 2023.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração: Unidades com Geração Distribuída**. MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 10 fev. 2023.

BEZERRA, J. L.; LIRA, M. A. T.; SILVA, E. A. Avaliação do ciclo de vida aplicada a painéis fotovoltaicos. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, 2018.

BOFF, L. **Sustentabilidade: o que é: o que não é**. 4. ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2015. 200p.

BRASIL INDICADORES. **Publicações dos indicadores brasileiros**. [S. L.], 2023. Disponível em: <https://brasilindicadores.com.br/>. Acesso em: 10 fev. 2023.

COPEL (Companhia Paranaense de Energia). **Tarifas de energia elétrica**. Curitiba, 2022. Disponível em: <https://www.copel.com/site/copel-distribuicao/tarifas-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 27 fev. 2023.

CORREIA, M. S. Sustainability: An Overview of the Triple Bottom Line and Sustainability Implementation. **International Journal of Strategic Engineering**, v. 2, n. 1, p. 29–38, jan. 2019. DOI: 10.4018/IJoSE.2019010103.

CREDCARBO. **Créditos de Carbono – Valor por hectare em diversas culturas**. São Paulo, 2022. <https://credcarbo.com/carbono/creditos-de-carbono-valor-por-hectare-em-diversas-culturas/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

DIAS, R. F.; CARVALHO, C. A. A. Bioeconomia no Brasil e no Mundo: Panorama Atual e Perspectivas. **Revista Virtual de Química**, v. 9, 2017.

DONES, R.; HECK, T.; HIRSCHBERG, S. Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. **Encyclopedia of Energy**. [S. l.]: Elsevier, 2004. p. 77–95. DOI: 10.1016/B0-12-176480-X/00397-1.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Brasília: MME, 2022a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 26 fev. 2023.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021**. EPE, 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 27 fev. 2023.

FAMÁ, R.; BRUNI, A. L. **As decisões de Investimentos**. São Paulo: Atlas, 2003.

FARIA, J. H. Por uma teoria crítica da sustentabilidade. **Revista Organizações e Sustentabilidade**, Curitiba, n. 1, v. 2, 2014.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102>.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and

production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, jan. 2018.

GUTIERREZ, R. H.; GONÇALVES, O. A. V.; LUQUETTI, I. J. A. Gestão do consumo de energia elétrica: revisão da literatura nas bases Scopus e Scielo. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO & INOVARSE, **Responsabilidade Social Aplicada**, set. 2016.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Documentação do Censo 2000**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 352p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv94254.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2023.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Censo Agropecuário - Ano 2017: Brasil / Paraná / Iporã**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/ipora/pesquisa/24/27745>. Acesso em: 17 jun. 2023.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Perfil de metadados geoespaciais do Brasil: perfil MGB 2.0 / IBGE**, Diretoria de Geociências, Exército Brasileiro, Diretoria de Serviço Geográfico. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. 106 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101802.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2023.

IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. WMO/UNEP, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 27 fev. 2023.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2014b. 151p.

JORDÃO, L. R.; SILVA, T. H. C.; CHAGAS, G. G.; BARREIRA, S. Energia solar como fator de desenvolvimento rural e a produção de leite em Goiás. **Desenvolvimento Regional em Debate**, v. 10, p. 862-884, 2020. DOI: 10.24302/drd.v10i0.2827

LÊDO, S. O Futuro da Energia. **Revista da Sustentabilidade - Serviços sustentáveis**. Ago. 2015.

LEFF, E. **Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder**. Trad. Mathilde E. Orth. 7.ed. Petrópolis, RJ: Vozes. 2009.

LEUZINGER, M. D.; CUREAU, S. **Direito ambiental**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008.

LOZANO, L.; TABOADA, E. B. The Power of Electricity: How Effective Is It in Promoting Sustainable Development in Rural Off-Grid Islands in the Philippines? **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2705, 9 maio 2021. DOI: 10.3390/en14092705.

MAIA, A. G.; SAKAMOTO, C. S. A nova configuração do mercado de trabalho agrícola brasileiro. In: BUAINAIN, A. M.; ALVES, S.; SILVEIRA, J. M.; NAVARRO, ZANDER (ed.) **O mundo rural no Brasil do século 21: a formação de um novo padrão agrário e agrícola**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 1ª edição, p. 591-619.

MESQUITA, J. M. **Método de Avaliação do Nível de Sustentabilidade de Programas de Eletrificação Rural com Sistemas Fotovoltaicos Individuais**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

MICHELETTI, D. H.; TELEKEN, J. G. Sustainable energy in agroindustry: evaluation, homologation and operation of a photovoltaic solar energy system in distributed generation of Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 31546–31267, 27 abr. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n4-554

NASCIMENTO, E. R.; SILVA, E. C. **Dimensionamento de um sistema fotovoltaico e viabilidade econômica para atender a demanda do laboratório de energia e meio ambiente da UFRA/Capanema**. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental & Energias Renováveis) - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Capanema (PA), 2019.

NASCIMENTO, T.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cadernos EBAPE. BR**, v. 10, n. 3, p. 630-651, 2012.

OLIVEIRA, L. C. **Sistema fotovoltaico conectado à rede para uma escola de uma comunidade quilombola, Abaetetuba – PA: um estudo de viabilidade social, econômica e ambiental**. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental & Energias Renováveis) - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Belém (PA), 2021.

PARANÁ. **Decreto 11538**, de 05 de novembro de 2018. Trata sobre a criação do Projeto Smart Energy Paraná e revoga o Decreto nº 8842, de 04 de setembro de 2013. Curitiba: Diário Oficial do Estado, 2018. Disponível em: <https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=210011&codTipoAto&tipoVisualizacao=alterado>. Acesso em: 25 set. 2019.

PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento. **Paraná Energia Rural Renovável**. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/Pagina/Parana-Energia-Rural-Renovavel>. Acesso em: 27 fev. 2023.

PASCARIS, A. S.; SCHELLY, C.; BURNHAM, L.; PEARCE, J. M. Integrating solar energy with agriculture: Industry perspectives on the market, community, and socio-political dimensions of agrivoltaics. **Energy Research & Social Science**, v. 75, p. 102023, 1 maio 2021. DOI 10.1016/j.erss.2021.102023.

PENTEADO, M. C.; SILVA, F. S.; MIECOANSKI, F. R. Determinantes socioeconômicos e espaciais do consumo per capita de energia elétrica no estado do Paraná em 2018. **Revista Orbis Latina**, v. 12, n. 1, jan./jul. 2022.

PEREIRA, C. P.; PAES, D. P.; PRATA, D. M.; MONTEIRO, L. P. C. Desenvolvimento de Ecoindicador de Emissão de CO₂ em uma Unidade Industrial. **Engevista**, v. 16, n. 2, p. 204-220, Junho 2014.

PORTAL SOLAR. **Energia solar traz competitividade para o desenvolvimento da agricultura**. 13 dez. 2019. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/energia-solar-traz-competitividade-para-o-desenvolvimento-da-agricultura.html>. Acesso em: 26 fev. 2023.

SANTOS, A.; POSSER, L. S.; GARCIA, S. B. **Aspectos de manutenção e análise de desempenho de um sistema fotovoltaico on-grid**. Fortaleza: VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, jun. 2020.

SELECTRA, Climate Consulting. **How much CO₂ does a tree absorb?** Dublin, 2022. Disponível em: <https://climate.selectra.com/en/news/co2-tree#:~:text=Although%20the%20carbon%20absorption%20capacity,emissions%20of%20a%20single%20Brit..> Acesso em: 27 fev. 2023.

SEN, A. **Desenvolvimento como Liberdade**. São Paulo: Companhia das Letras, 2010.

SILVA, A. A. L.; MACAGNAN, D. C.; LAGO, S. M. S.; BERTOLINI, G. R. F. Sustentabilidade energética: um estudo da viabilidade econômica e financeira do uso de energia solar na avicultura. **Revista Pretexto**, v. 21, n. 4, dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.21714/pretexto.v21i4.6114>

SLAPER, T. F.; HALL, T. J. The Triple Bottom Line: What Is It and How Does It Work? **Indiana Business Review**, Bloomington (IN), v. 86, n. 1, p. 4-8, 2011. ISBN:0019-6541.

SOLSTICIO ENERGIA. **Bandeiras Tarifárias**. Campinas, SP, 2022. Disponível em: <https://www.solsticioenergia.com/saiba-mais/bandeiras-tarifarias/#:~:text=O%20sistema%20%C3%A9%20composto%20por,1%20e%20vermelha%20patamar%202..> Acesso em: 27 fev. 2023.

TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; URBANETZ JR, J.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S., ALVES, A. R. **Atlas de Energia Solar do Estado do Paraná**. 1. Ed. Curitiba: UTFPR, 2017.

UCZAI, P. **Energias renováveis riqueza sustentável ao alcance da sociedade**. Cadernos de Altos Estudos nº 10. Brasília: Centro de Documentação e Informação, 2012. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/a-camara/estruturaadm/altosestudios/pdf/energias-renovaveis-riqueza-sustentavel-ao-alcance-da-sociedade>. Acesso em: 27 fev. 2023.

NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. UNIC Rio, set. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 10 fev. 2023.

VIKHOREV, K.; GREENOUGH, R.; BROWN, N. An advanced energy management framework to promote energy awareness. **Journal of Cleaner Production**, v. 43, p. 103–112, mar. 2013. DOI 10.1016/j.jclepro.2012.12.012.

WANG, X.; GUAN, Z.; WU, F. Solar energy adoption in rural China: A sequential decision approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1312-1318, 2017.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010.

PANAROTTO, C. O meio ambiente e o consumo sustentável: alguns hábitos que podem fazer a diferença. **Revista das relações de consumo**, Caxias do Sul, p. 132-152, 2008.

SILVA, R. M. **Energia Solar no Brasil: dos incentivos aos desafios**. Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/Senado: 2015.

5 CONCLUSÕES GERAIS

A pesquisa buscou analisar a contribuição no desenvolvimento sustentável de imóveis rurais com base na utilização de sistemas geradores por fonte solar fotovoltaica. Desse modo, ressaltou-se a importância da energia como propulsora de tecnologia e produtividade nas atividades rurais, de forma que a energia solar traz estabilidade para a agricultura e promove o desenvolvimento rural sustentável.

O estudo conseguiu explicitar alguns dos desafios mais enfrentados pela aplicação de energia solar nos imóveis rurais, mostrando as condições favoráveis e desfavoráveis para implementação e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos no meio rural. Além disso, mostrou-se a evolução do uso da energia solar fotovoltaica e seu incentivo ao desenvolvimento sustentável nas propriedades rurais.

A inserção da energia solar fotovoltaica demorou um pouco mais para efetivamente chegar no setor rural longe dos grandes centros, principalmente devido à necessidade de incentivos governamentais para financiamento desses sistemas pelos produtores rurais. Além disso, houve insegurança quanto à aderência de uma nova tecnologia e de investir em valores elevados.

A inserção das redes monofásicas no setor rural foi uma medida de necessidade, a fim de atender uma quantidade maior de imóveis rurais e melhorar a qualidade de vida da população rural. Contudo, a instabilidade e risco das redes monofásicas não eram totalmente compreendidas na época que acabaram por impactar na efetiva sustentabilidade social nesse setor. Além disso, essa elevação da tensão e surtos elétricos nas redes monofásicas têm causado problemas nos sistemas fotovoltaicos, desarmando ou até queimando inversores.

Ressalta-se que o produtor rural, muitas vezes, precisa se capacitar para conseguir compreender alguns dos aspectos técnicos da energia solar e acompanhar a produção de energia pelo sistema de monitoramento que, conseqüentemente, impacta na vida deles. Critica-se que ainda há produtores rurais com dificuldade de realizar e enviar a leitura do consumo da Copel, impactando no aspecto social por tornar difícil essa tarefa de acompanhar a efetiva instalação e funcionamento dos sistemas fotovoltaicos.

A energia solar fotovoltaica é bem-vista pela sociedade e bem comentada nos textos sobre sustentabilidade. Entretanto, seus impactos precisam ser avaliados em casos mais específicos e acompanhados, visto que cada localidade possui condições

ambientais diferentes. Desse modo, destaca-se que diferentes situações problema aparecem no setor rural, nas quais é necessária intervenção minuciosa, a fim de serem resolvidas e evitadas. Pouco é mostrado ou falado sobre os problemas e dificuldades enfrentados com os sistemas fotovoltaicos no âmbito rural, menos ainda se têm orientações específicas para cuidados com o sistema após instalação.

Dessa forma, as análises dos três artigos trouxeram bons resultados que demonstram a efetiva caracterização de sustentável para os sistemas fotovoltaicos. Entretanto, as dificuldades e questões que também foram comentadas podem influenciar nesse título de sustentabilidade que a energia solar carrega. Assim, também é necessária intervenção dos órgãos reguladores, a fim de realizar vistorias nesses sistemas e de passar orientações para manter a segurança e a confiabilidade da tecnologia.

Outrossim, a redução com custos de energia elétrica favorece a gradual substituição dos equipamentos movidos a combustíveis não renováveis, os quais geralmente geram bastante ruído, demandam maior manutenção e emitem muito mais poluição. Ainda, a redução dos custos operacionais também contribui com o investimento em melhores condições de trabalho ou outras áreas sociais das famílias envolvidas, como educação, saúde, transporte e lazer. Desse modo, a aplicação dessa tecnologia no contexto rural pode promover o desenvolvimento rural sustentável.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Geração**: Unidades com Geração Distribuída. MME, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>. Acesso em: 12 fev. 2023.
- CHEL, A.; KAUSHIK, G. Renewable energy for sustainable agriculture. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 31, n. 1, p. 91–118, jan. 2011. DOI: 10.1051/agro/2010029.
- DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico. **Texto para Discussão - Ipea**, Rio de Janeiro, n. 2388, p. 1-42, 2018.
- DONES, R.; HECK, T.; HIRSCHBERG, S. Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. **Encyclopedia of Energy**. [S. l.]: Elsevier, 2004. p. 77–95. DOI: 10.1016/B0-12-176480-X/00397-1.
- IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. WMO/UNEP, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf. Acesso em: 27 fev. 2023.
- MICHELETTI, D. H.; TELEKEN, J. G. Sustainable energy in agroindustry: evaluation, homologation and operation of a photovoltaic solar energy system in distributed generation of Paraná. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 31546–31267, 27 abr. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n4-554
- LOZANO, L.; TABOADA, E. B. The Power of Electricity: How Effective Is It in Promoting Sustainable Development in Rural Off-Grid Islands in the Philippines? **Energies**, v. 14, n. 9, p. 2705, 9 maio 2021. DOI: 10.3390/en14092705.
- NOGUEIRA, G. B.; SALES, F. E.; BOSCHI, L. S.; AZEVEDO, C. G. Viabilidade técnica econômica de implementação de um sistema de backup de energia em uma pequena propriedade rural. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e35211528210, 9 abr. 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i5.28210.
- OLIVEIRA, L. C. **Sistema fotovoltaico conectado à rede para uma escola de uma comunidade quilombola, Abaetetuba – PA**: um estudo de viabilidade social, econômica e ambiental. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental & Energias Renováveis) - Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA). Belém (PA), 2021.
- NAÇÕES UNIDAS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. UNIC Rio, set. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- VILLALVA, M. G. **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Érica, 2015.

APÊNDICE A – ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Tabela A.1 – Dados da Análise Econômica do Caso 1

Período	Geração (kWh)	Rendimento	Investimento	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VPL
0			-R\$ 46.000,00	-R\$ 46.000,00	-R\$ 46.000,00	-R\$ 46.000,00
1	11.184	R\$ 6.263,04	-R\$ 1.171,93	R\$ 5.091,11	R\$ 4.812,93	-R\$ 41.187,07
2	11.095	R\$ 6.796,33	-R\$ 1.171,93	R\$ 5.624,40	R\$ 5.026,54	-R\$ 36.160,53
3	11.006	R\$ 7.375,03	-R\$ 1.171,93	R\$ 6.203,10	R\$ 5.240,81	-R\$ 30.919,72
4	10.918	R\$ 8.003,00	-R\$ 1.171,93	R\$ 6.831,08	R\$ 5.456,01	-R\$ 25.463,71
5	10.830	R\$ 8.684,45	-R\$ 1.171,93	R\$ 7.512,53	R\$ 5.672,42	-R\$ 19.791,29
6	10.744	R\$ 9.423,92	-R\$ 1.171,93	R\$ 8.252,00	R\$ 5.890,30	-R\$ 13.900,99
7	10.658	R\$ 10.226,36	-R\$ 1.171,93	R\$ 9.054,43	R\$ 6.109,93	-R\$ 7.791,06
8	10.573	R\$ 11.097,12	-R\$ 1.171,93	R\$ 9.925,19	R\$ 6.331,56	-R\$ 1.459,51
9	10.488	R\$ 12.042,03	-R\$ 230,00	R\$ 11.812,03	R\$ 7.123,48	R\$ 5.663,98
10	10.404	R\$ 13.067,39	-R\$ 230,00	R\$ 12.837,39	R\$ 7.318,82	R\$ 12.982,80
11	10.321	R\$ 14.180,06	-R\$ 230,00	R\$ 13.950,06	R\$ 7.518,60	R\$ 20.501,40
12	10.238	R\$ 15.387,48	-R\$ 230,00	R\$ 15.157,48	R\$ 7.722,97	R\$ 28.224,36
13	10.156	R\$ 16.697,70	-R\$ 230,00	R\$ 16.467,70	R\$ 7.932,07	R\$ 36.156,44
14	10.075	R\$ 18.119,49	-R\$ 230,00	R\$ 17.889,49	R\$ 8.146,07	R\$ 44.302,51
15	9.994	R\$ 19.662,34	-R\$ 230,00	R\$ 19.432,34	R\$ 8.365,11	R\$ 52.667,62
16	9.915	R\$ 21.336,57	-R\$ 230,00	R\$ 21.106,57	R\$ 8.589,36	R\$ 61.256,97
17	9.835	R\$ 23.153,35	-R\$ 230,00	R\$ 22.923,35	R\$ 8.818,96	R\$ 70.075,94
18	9.757	R\$ 25.124,83	-R\$ 230,00	R\$ 24.894,83	R\$ 9.054,10	R\$ 79.130,04
19	9.678	R\$ 27.264,18	-R\$ 230,00	R\$ 27.034,18	R\$ 9.294,92	R\$ 88.424,95
20	9.601	R\$ 29.585,70	-R\$ 230,00	R\$ 29.355,70	R\$ 9.541,60	R\$ 97.966,55
21	9.524	R\$ 32.104,88	-R\$ 230,00	R\$ 31.874,88	R\$ 9.794,31	R\$ 107.760,86
22	9.448	R\$ 34.838,57	-R\$ 230,00	R\$ 34.608,57	R\$ 10.053,22	R\$ 117.814,08
23	9.372	R\$ 37.805,04	-R\$ 230,00	R\$ 37.575,04	R\$ 10.318,52	R\$ 128.132,60
24	9.297	R\$ 41.024,09	-R\$ 230,00	R\$ 40.794,09	R\$ 10.590,38	R\$ 138.722,99
25	9.223	R\$ 44.517,24	-R\$ 230,00	R\$ 44.287,24	R\$ 10.869,00	R\$ 149.591,99

Fonte: Os autores (2023).

Tabela A.2 – Dados da Análise Econômica do Caso 2

Período	Geração (kWh)	Rendimento	Investimento	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VPL
0			-R\$ 180.000,00	-R\$ 180.000,00	-R\$ 180.000,00	-R\$ 180.000,00
1	60.888	R\$ 43.839,36	-R\$ 19.873,69	R\$ 23.965,67	R\$ 22.656,15	-R\$ 157.343,85
2	60.401	R\$ 47.572,23	-R\$ 19.873,69	R\$ 27.698,54	R\$ 24.754,25	-R\$ 132.589,60
3	59.918	R\$ 51.622,95	-R\$ 19.873,69	R\$ 31.749,26	R\$ 26.823,96	-R\$ 105.765,64
4	59.438	R\$ 56.018,58	-R\$ 19.873,69	R\$ 36.144,89	R\$ 28.869,06	-R\$ 76.896,58
5	58.963	R\$ 60.788,49	-R\$ 19.873,69	R\$ 40.914,81	R\$ 30.893,18	-R\$ 46.003,40
6	58.491	R\$ 65.964,56	-R\$ 900,00	R\$ 65.064,56	R\$ 46.443,31	R\$ 439,91
7	58.023	R\$ 71.581,36	-R\$ 900,00	R\$ 70.681,36	R\$ 47.695,78	R\$ 48.135,69
8	57.559	R\$ 77.676,43	-R\$ 900,00	R\$ 76.776,43	R\$ 48.977,82	R\$ 97.113,51
9	57.099	R\$ 84.290,49	-R\$ 900,00	R\$ 83.390,49	R\$ 50.290,33	R\$ 147.403,83
10	56.642	R\$ 91.467,72	-R\$ 900,00	R\$ 90.567,72	R\$ 51.634,24	R\$ 199.038,07

11	56.189	R\$ 99.256,09	-R\$ 900,00	R\$ 98.356,09	R\$ 53.010,52	R\$ 252.048,59
12	55.739	R\$ 107.707,62	-R\$ 900,00	R\$ 106.807,62	R\$ 54.420,12	R\$ 306.468,71
13	55.293	R\$ 116.878,80	-R\$ 900,00	R\$ 115.978,80	R\$ 55.864,03	R\$ 362.332,75
14	54.851	R\$ 126.830,89	-R\$ 900,00	R\$ 125.930,89	R\$ 57.343,26	R\$ 419.676,01
15	54.412	R\$ 137.630,39	-R\$ 900,00	R\$ 136.730,39	R\$ 58.858,83	R\$ 478.534,84
16	53.977	R\$ 149.349,45	-R\$ 900,00	R\$ 148.449,45	R\$ 60.411,77	R\$ 538.946,61
17	53.545	R\$ 162.066,37	-R\$ 900,00	R\$ 161.166,37	R\$ 62.003,17	R\$ 600.949,78
18	53.117	R\$ 175.866,13	-R\$ 900,00	R\$ 174.966,13	R\$ 63.634,09	R\$ 664.583,87
19	52.692	R\$ 190.840,92	-R\$ 900,00	R\$ 189.940,92	R\$ 65.305,66	R\$ 729.889,53
20	52.270	R\$ 207.090,80	-R\$ 900,00	R\$ 206.190,80	R\$ 67.019,01	R\$ 796.908,55
21	51.852	R\$ 224.724,33	-R\$ 900,00	R\$ 223.824,33	R\$ 68.775,30	R\$ 865.683,84
22	51.437	R\$ 243.859,34	-R\$ 900,00	R\$ 242.959,34	R\$ 70.575,70	R\$ 936.259,55
23	51.026	R\$ 264.623,67	-R\$ 900,00	R\$ 263.723,67	R\$ 72.421,44	R\$ 1.008.680,99
24	50.617	R\$ 287.156,06	-R\$ 900,00	R\$ 286.256,06	R\$ 74.313,75	R\$ 1.082.994,74
25	50.212	R\$ 311.607,05	-R\$ 900,00	R\$ 310.707,05	R\$ 76.253,90	R\$ 1.159.248,64

Fonte: Os autores (2023).

Tabela A.3 – Dados da Análise Econômica do Caso 3

Período	Geração (kWh)	Rendimento	Investimento	Fluxo de Caixa	Valor Presente	VPL
0			-R\$ 810.000,00	-R\$ 810.000,00	-R\$ 810.000,00	-R\$ 810.000,00
1	257.760	R\$ 144.345,60	-R\$ 22.915,66	R\$ 121.429,94	R\$ 114.794,80	-R\$ 695.205,20
2	255.698	R\$ 156.636,45	-R\$ 22.915,66	R\$ 133.720,79	R\$ 119.506,58	-R\$ 575.698,63
3	253.652	R\$ 169.973,86	-R\$ 22.915,66	R\$ 147.058,20	R\$ 124.244,89	-R\$ 451.453,73
4	251.623	R\$ 184.446,93	-R\$ 22.915,66	R\$ 161.531,27	R\$ 129.015,64	-R\$ 322.438,10
5	249.610	R\$ 200.152,37	-R\$ 22.915,66	R\$ 177.236,70	R\$ 133.824,57	-R\$ 188.613,53
6	247.613	R\$ 217.195,10	-R\$ 22.915,66	R\$ 194.279,43	R\$ 138.677,32	-R\$ 49.936,21
7	245.632	R\$ 235.689,00	-R\$ 22.915,66	R\$ 212.773,34	R\$ 143.579,44	R\$ 93.643,24
8	243.667	R\$ 255.757,64	-R\$ 22.915,66	R\$ 232.841,97	R\$ 148.536,36	R\$ 242.179,59
9	241.718	R\$ 277.535,09	-R\$ 22.915,66	R\$ 254.619,43	R\$ 153.553,41	R\$ 395.733,01
10	239.784	R\$ 301.166,87	-R\$ 22.915,66	R\$ 278.251,21	R\$ 158.635,88	R\$ 554.368,89
11	237.866	R\$ 326.810,87	-R\$ 4.050,00	R\$ 322.760,87	R\$ 173.956,91	R\$ 728.325,80
12	235.963	R\$ 354.638,42	-R\$ 4.050,00	R\$ 350.588,42	R\$ 178.630,17	R\$ 906.955,98
13	234.075	R\$ 384.835,46	-R\$ 4.050,00	R\$ 380.785,46	R\$ 183.414,66	R\$ 1.090.370,64
14	232.203	R\$ 417.603,74	-R\$ 4.050,00	R\$ 413.553,74	R\$ 188.313,77	R\$ 1.278.684,40
15	230.345	R\$ 453.162,20	-R\$ 4.050,00	R\$ 449.112,20	R\$ 193.330,96	R\$ 1.472.015,36
16	228.502	R\$ 491.748,41	-R\$ 4.050,00	R\$ 487.698,41	R\$ 198.469,76	R\$ 1.670.485,12
17	226.674	R\$ 533.620,20	-R\$ 4.050,00	R\$ 529.570,20	R\$ 203.733,75	R\$ 1.874.218,87
18	224.861	R\$ 579.057,32	-R\$ 4.050,00	R\$ 575.007,32	R\$ 209.126,58	R\$ 2.083.345,45
19	223.062	R\$ 628.363,36	-R\$ 4.050,00	R\$ 624.313,36	R\$ 214.652,00	R\$ 2.297.997,45
20	221.278	R\$ 681.867,74	-R\$ 4.050,00	R\$ 677.817,74	R\$ 220.313,79	R\$ 2.518.311,24
21	219.507	R\$ 739.927,96	-R\$ 4.050,00	R\$ 735.877,96	R\$ 226.115,84	R\$ 2.744.427,08
22	217.751	R\$ 802.931,94	-R\$ 4.050,00	R\$ 798.881,94	R\$ 232.062,10	R\$ 2.976.489,18
23	216.009	R\$ 871.300,63	-R\$ 4.050,00	R\$ 867.250,63	R\$ 238.156,63	R\$ 3.214.645,82
24	214.281	R\$ 945.490,83	-R\$ 4.050,00	R\$ 941.440,83	R\$ 244.403,56	R\$ 3.459.049,37
25	212.567	R\$ 1.025.998,24	-R\$ 4.050,00	R\$ 1.021.948,24	R\$ 250.807,10	R\$ 3.709.856,48

Fonte: Os autores (2023).