

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 08/12/2027

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until December 8, 2027

MURILO MICENO FRIGO

**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO MEIO RURAL: MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA
VIABILIDADE DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA**

Botucatu

2025

MURILO MICENO FRIGO

**TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO MEIO RURAL: MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA
VIABILIDADE DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola

Orientador: Fernando de Lima Caneppele

Botucatu

2025

F912t

Frigo, Murilo Miceno

Transição energética no meio rural : modelagem e avaliação da viabilidade da geração solar fotovoltaica / Murilo Miceno Frigo. - Botucatu, 2025

123 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Fernando de Lima Caneppele

1. Solar energy in agriculture. 2. Lógica difusa. 3. Geographic information systems. I. Título.

Impacto potencial desta pesquisa

O impacto potencial desta pesquisa está em fornecer bases científicas e metodológicas para o planejamento energético descentralizado e sustentável no Brasil. Ao integrar dados ambientais, territoriais e de infraestrutura por meio de análises espaciais e lógica fuzzy, a tese possibilita identificar áreas prioritárias para a implantação de sistemas solares fotovoltaicos e orientar políticas públicas mais eficientes. Seus resultados podem apoiar a redução das desigualdades regionais, promover a inclusão social e fortalecer a autonomia produtiva das comunidades rurais. Assim, contribui para a transição energética justa, para o desenvolvimento de baixo carbono e para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7

Potential Impact of this research

The potential impact of this research lies in providing scientific and methodological foundations for decentralized and sustainable energy planning in Brazil. By integrating environmental, territorial, and infrastructure data through spatial analysis and fuzzy logic, the thesis enables the identification of priority areas for the implementation of solar photovoltaic systems and guides more effective public policies. Its results can help reduce regional inequalities, promote social inclusion, and strengthen the productive autonomy of rural communities. Thus, it contributes to a just energy transition, low-carbon development, and the achievement of the United Nations Sustainable Development Goal 7.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO MEIO RURAL: MODELAGEM E AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

AUTOR: MURILO MICENO FRIGO

ORIENTADOR: FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

 Documento assinado digitalmente
FERNANDO DE LIMA CANEPPELE
Data: 08/12/2025 14:43:25-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. FERNANDO DE LIMA CANEPPELE (Participação Virtual)
Curso de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos FZEA USP PirassunungaSP

 Documento assinado digitalmente
DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
Data: 09/12/2025 17:03:15-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR (Participação Virtual)
Comissão Permanente de Avaliação / UNESP / Reitoria - RUNESP

 Documento assinado digitalmente
ANDRÉ LUIZ VEIGA GIMENES
Data: 09/12/2025 11:55:19-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ VEIGA GIMENES (Participação Virtual)
Engenharia de Energia e Automação Elétricas / Universidade de São Paulo

 Documento assinado digitalmente
JAIR ANTONIO CRUZ SIQUEIRA
Data: 10/12/2025 20:24:29-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JAIR ANTÔNIO CRUZ SIQUEIRA (Participação Virtual)
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

 Documento assinado digitalmente
LUIS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO
Data: 10/12/2025 08:17:08-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / UNESP / Câmpus de Tupã - FCE

Botucatu, 08 de dezembro de 2025.

Às minhas amadas filhas,

Ana e Miranda,

dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Fernando de Lima Caneppele, pela orientação, ensinamentos, paciência e exemplo de professor.

A todos os professores e funcionários da FCA.

Ao IFMS – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul, que me forneceu o amparo necessário para desenvolvimento desse doutorado.

Aos diversos colegas de estudos e pesquisas que fiz ao longo dessa trajetória acadêmica.

RESUMO

A presente tese investiga o papel da energia solar fotovoltaica na eletrificação rural brasileira, situando-a no contexto da transição energética para o baixo carbono. Parte-se do reconhecimento de que o acesso à energia nas áreas rurais é um fator estruturante para a redução das desigualdades, a diversificação produtiva e o fortalecimento da autonomia local, estando alinhada com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 da ONU. A pesquisa é composta por quatro artigos interligados, que combinam revisão teórica, análise crítica de políticas públicas e aplicação empírica de modelos espaciais. O primeiro artigo realiza uma revisão sistemática da literatura sobre o uso da energia solar fotovoltaica na eletrificação rural, destacando o caráter interdisciplinar do tema. O segundo artigo examina a evolução das políticas públicas brasileiras de eletrificação rural, identificando avanços e limitações dos programas implementados e apontando a necessidade de maiores estudos norteadores. O terceiro artigo representa um dos principais achados da tese, ao aplicar uma metodologia de análise multicritério baseada em sistemas de informação geográfica e lógica fuzzy em fazendas experimentais de universidades públicas. Essa abordagem integrou dados meteorológicos, de infraestrutura e de uso do solo, permitindo identificar áreas prioritárias para a instalação de sistemas solares fotovoltaicos e demonstrando a eficiência do modelo para subsidiar decisões de planejamento energético rural em diferentes contextos territoriais. O quarto artigo amplia essa metodologia para escala nacional, utilizando dados do Cadastro Ambiental Rural para construir um panorama detalhado do potencial fotovoltaico do Brasil. Além de elencar áreas de média e menor viabilidade, o quarto artigo expôs que programas como o Mais Luz para a Amazônia, com objetivo de atender as áreas excluídas da eletrificação pela expansão da rede, também coincidem com os territórios de menor viabilidade fotovoltaica. Em conjunto, os resultados confirmam que a energia solar no meio rural é capaz de articular a transição energética.

Palavras-chave: eletrificação rural; energia fotovoltaica; Lógica Fuzzy; ODS7; transição energética.

ABSTRACT

This thesis investigates the role of solar photovoltaic energy in rural electrification in Brazil, placing it within the context of the low-carbon energy transition. It is based on the recognition that access to energy in rural areas is a structural factor for reducing inequalities, promoting productive diversification, and strengthening local autonomy, in alignment with the United Nations Sustainable Development Goal 7. The research is composed of four interconnected articles that combine theoretical review, critical analysis of public policies, and empirical application of spatial models. The first article presents a systematic literature review on the use of solar photovoltaic energy in rural electrification, highlighting the interdisciplinary nature of the topic. The second article examines the evolution of Brazilian public policies on rural electrification, identifying advances and limitations of implemented programs and emphasizing the need for further guiding studies. The third article represents one of the main findings of the thesis by applying a multicriteria analysis methodology based on geographic information systems and fuzzy logic in experimental farms of public universities. This approach integrated meteorological, infrastructure, and land-use data, allowing for the identification of priority areas for the installation of photovoltaic systems and demonstrating the model's effectiveness in supporting rural energy planning decisions in different territorial contexts. The fourth article extends this methodology to the national scale, using data from the Rural Environmental Registry to construct a detailed overview of Brazil's photovoltaic potential. In addition to identifying areas of medium and low viability, this article revealed that programs such as *Mais Luz para a Amazônia*—designed to serve regions excluded from grid expansion—also coincide with territories of lower photovoltaic suitability. Taken together, the results confirm that solar energy in rural areas can effectively link energy transition

Keywords: rural electrification; photovoltaic energy; fuzzy logic; SDG7; energy transition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1 – REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ELETRIFICAÇÃO RURAL: CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O ODS 7

Figura 1 - Fluxograma do Processo de Revisão Sistemática Seguindo as Diretrizes PRISMA 2020.....	34
Figura 2 - Clusters de palavra-chave	44
Figura 3 - Análise temporal dos Clusters de palavra-chave.....	45

CAPÍTULO 2 – DA EXPANSÃO DA REDE À GERAÇÃO SOLAR DISTRIBUÍDA: A ELETRIFICAÇÃO RURAL NO BRASIL ESTÁ ALINHADA COM A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA JUSTA?

Figura 1 - Percentual de domicílios rurais com acesso à eletricidade no Brasil, comparando os anos de 2006 e 2017.....	60
Figura 2 - Número de domicílios atendidos anualmente por modalidade de programa (2004 a 2023).....	61
Figura 3 - Estrutura do Consumo no Setor Agropecuário.....	65

CAPÍTULO 3 – POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ÁREAS RURAIS BRASILEIRAS: UMA ABORDAGEM SIG-FUZZY MULTICRITÉRIO

Figura 1 - Localização do desenvolvimento da pesquisa.....	83
Figura 2 - Áreas das fazendas experimentais.....	83
Figura 3 - Mapas de Viabilidade GIS-FUZZY.....	95

CAPÍTULO 4 – UM ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA ELETRIFICAÇÃO RURAL BRASILEIRA NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O ODS7.

Figura 1 - Distribuição percentual das classes de adequação fuzzy por região brasileira.. ..	108
Figura 2 - Resultado final da análise Fuzzy.....	109
Figura 3 - Recortes das áreas rurais e regiões.....	110

Figura 4 - Dados fuzzy reclassificados e recorte da Amazônia Legal.....111

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ELETRIFICAÇÃO RURAL: CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O ODS 7

Tabela 1 – <i>Strings</i> ” de busca.....	32
Tabela 2 – Resultados da revisão sistemática.....	35

CAPÍTULO 3 – POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ÁREAS RURAIS BRASILEIRAS: UMA ABORDAGEM SIG-FUZZY MULTICRITÉRIO

Tabela 1 – Critérios meteorológicos.....	87
Tabela 2 – Critérios de característica do solo.....	88
Tabela 3 – Critérios de Infraestrutura	89
Tabela 4 – Marcador de restrição de uso do solo.....	91

CAPÍTULO 4 – UM ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA ELETRIFICAÇÃO RURAL BRASILEIRA NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O ODS7.

Tabela 1 – Distribuição percentual das classes de adequação fuzzy por região brasileira	111
Tabela 2 – Distribuição percentual das classes de adequação fuzzy por região brasileira.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
APP – Área de Preservação Permanente
CAR – Cadastro Ambiental Rural
CO₂ – Dióxido de Carbono
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
FV – Fotovoltaico
GEE – Gases de Efeito Estufa
GIS – Geographic Information System (*Sistema de Informação Geográfica*)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFMS – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IRENA – International Renewable Energy Agency
LABREN – Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia
LPT – Programa Luz para Todos
MLA – Programa Mais Luz para a Amazônia
MME – Ministério de Minas e Energia
ODS – Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ODS7 – Energia Limpa e Acessível
ONU – Organização das Nações Unidas
ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
PCA – *Principal Component Analysis* (Análise de Componentes Principais)
PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima
PRODEEM – Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
PV – *Photovoltaic* (Fotovoltaico)
REN – Resolução Normativa
SDG – *Sustainable Development Goal* (Objetivo de Desenvolvimento Sustentável)
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SIN – Sistema Interligado Nacional
SISOL – Sistema Isolado de Geração

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	23
CAPÍTULO 1 - REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE A ENERGIA FOTOVOLTAICA NA ELETRIFICAÇÃO RURAL: CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O ODS 7.....	27
1.1 INTRODUÇÃO.....	28
1.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
1.4 UMA ABORDAGEM BIBLIOMÉTRICA.....	43
1.5 CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS	47
CAPÍTULO 2 - DA EXPANSÃO DA REDE À GERAÇÃO SOLAR DISTRIBUÍDA: A ELETRIFICAÇÃO RURAL NO BRASIL ESTÁ ALINHADA COM A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA JUSTA?.....	52
2.1 INTRODUÇÃO.....	54
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
2.3 A ELETRIFICAÇÃO RURAL BRASILEIRA.....	57
2.4 JUSTIÇA ENERGÉTICA E MEDIDAS DE PROBREZA ENERGÉTICA: DIMENSÕES CRÍTICAS DA INCLUSÃO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA.....	63
2.5 A APOSTA NOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	67
2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	68
REFERÊNCIAS.....	70
CAPÍTULO 3 – POTENCIAL DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA EM ÁREAS RURAIS BRASILEIRAS: UMA ABORDAGEM SIG-FUZZY MULTICRITÉRIO.....	76
3.1 INTRODUÇÃO.....	77
3.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	79
3.3 MATERIAIS E MÉTODOS	82
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
3.5 CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS.....	97

CAPÍTULO 4 – CAPÍTULO 4 - UM ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DA GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA NA ELETRIFICAÇÃO RURAL BRASILEIRA NO CONTEXTO DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E O ODS7.....	101
4.1 INTRODUÇÃO.....	102
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS	106
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	107
4.4 CONCLUSÕES.....	114
REFERÊNCIAS.....	116
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	120
REFERÊNCIAS	123

INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, o aumento exponencial do consumo de energia transformou profundamente as estruturas produtivas, sociais e ambientais. Os hidrocarbonetos tornaram-se a base do desenvolvimento industrial moderno, oferecendo energia abundante e barata, mas ao custo de crescente dependência de recursos fósseis e de sérios impactos climáticos e ambientais. A crise do petróleo da década de 1970 foi um marco no reconhecimento da vulnerabilidade desse modelo e impulsionou a busca por alternativas energéticas. Nas décadas seguintes, a consolidação do debate sobre as mudanças climáticas e a formulação de políticas globais de mitigação, como o Protocolo de Kyoto (1997), o Acordo de Paris (2015) e a Agenda 2030, reforçaram o imperativo de uma transição energética justa, orientada à descarbonização e ao acesso universal à energia limpa, conforme o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7) das Nações Unidas (Onu, 2015; Relva *et al.*, 2021; Smil, 2017).

A experiência acumulada por grandes economias emissoras demonstra que, embora avanços expressivos tenham ocorrido em setores como eletricidade e transporte, as políticas atuais ainda são insuficientes para manter o aquecimento global abaixo de 2 °C, evidenciando a necessidade de estratégias transformadoras e da ampliação global das práticas bem-sucedidas de mitigação (Fekete *et al.*, 2021).

No contexto brasileiro, essa discussão adquire contornos próprios. O país combina uma matriz elétrica majoritariamente renovável, sustentada pela geração hidrelétrica, com profundas desigualdades territoriais e sociais. A eletrificação rural, historicamente conduzida pela expansão da rede, garantiu avanços expressivos em universalização, mas manteve lacunas significativas quanto à inclusão energética efetiva. Milhares de comunidades permanecem em situação de vulnerabilidade ou dependentes de soluções precárias, como o uso de biomassa tradicional e geradores a diesel, perpetuando a pobreza energética e limitando oportunidades de desenvolvimento humano e produtivo (Leduchowicz-Municio *et al.*, 2022; Leduchowicz-Municio *et al.*, 2024; Yushchenko *et al.*, 2018).

As transformações recentes na agricultura, marcadas pela intensificação da mecanização e pela crescente eletrificação das cadeias produtivas rurais, evidenciam

a necessidade de integrar políticas energéticas e de desenvolvimento territorial. Estudos demonstram que a energia solar fotovoltaica descentralizada constitui uma alternativa estratégica para essa integração, ao promover sustentabilidade econômica, autonomia local e inovação tecnológica. Experiências em comunidades rurais da Índia e da Palestina revelam que sistemas fotovoltaicos distribuídos favorecem o desenvolvimento socioeconômico, a gestão sustentável dos recursos e a redução da dependência de combustíveis fósseis, reforçando o papel da energia solar como vetor de transição energética justa no campo (Ibrik, 2020; Yadav; Davies; Palit, 2019).

Em contextos rurais de países em desenvolvimento, sistemas fotovoltaicos conectados em micro-redes têm se mostrado eficazes na substituição de geradores a diesel, ampliando a disponibilidade de energia para irrigação, bombeamento de água e uso doméstico, ao mesmo tempo em que reduzem custos e emissões (Ibrik, 2020).

Além dos benefícios ambientais, a expansão da energia solar no campo tem fortalecido as atividades produtivas e o bem-estar das comunidades, oferecendo maior estabilidade energética e incentivando o uso produtivo da eletricidade, o que contribui para romper o ciclo de pobreza energética e ampliar a justiça distributiva (Yadav; Davies; Palit, 2019).

Do ponto de vista das transições socio-técnicas, a difusão dos sistemas fotovoltaicos distribuídos em áreas rurais tem se mostrado capaz de reduzir as limitações impostas por modelos centralizados e permitir novos arranjos locais baseados em inovação e desenvolvimento territorial sustentável (Yadav; Malakar; Davies, 2019).

Contudo, como salientam Yadav, Davies e Khan (2020), para que essas transformações se consolidem, é necessário que a transição energética no campo seja acompanhada por políticas públicas integradas. Assim, a energia solar fotovoltaica pode desempenhar seu protagonismo, não apenas como uma solução técnica, mas como um vetor estruturante da transição energética sustentável e justa no meio rural.

Este trabalho propõe uma leitura crítica sobre o papel da energia solar fotovoltaica na eletrificação rural e na promoção de um modelo sustentável de baixo carbono. Estruturado sob a forma de quatro artigos científicos interconectados, o conjunto das pesquisas compõe um percurso analítico que parte de um panorama geral da transição energética e percursos da eletrificação rural brasileira, para uma

abordagem teórica e metodológica aplicada ao estudo de áreas rurais e seu potencial para uma transição energética para o baixo carbono de base fotovoltaica.

O trabalho está estruturado em quatro artigos:

- O Capítulo 1 apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o uso da energia solar fotovoltaica na eletrificação rural no contexto da transição energética, destacando os principais eixos temáticos, lacunas de pesquisa e convergências do tema
- O Capítulo 2 discute criticamente a trajetória das políticas públicas de eletrificação rural no Brasil, desde os programas PRODEEM e Luz para Todos até as iniciativas mais recentes, como o Mais Luz para a Amazônia. O capítulo examina em que medida essas políticas se alinham aos princípios da transição energética justa.
- O Capítulo 3 apresenta a aplicação de um modelo SIG–Fuzzy Multicritério em fazendas experimentais de universidades públicas brasileiras, integrando variáveis meteorológicas, de infraestrutura e de uso do solo. O método possibilita identificar áreas prioritárias para implantação de sistemas solares e demonstrar o potencial técnico da energia fotovoltaica no meio rural, considerando a heterogeneidade territorial.
- O Capítulo 4, aplica parte essencial da abordagem do Capítulo 3 em escala nacional, utilizando dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR). O trabalho busca construir um panorama detalhado do potencial fotovoltaico brasileiro, considerando as características regionais, potencial e restrições. Dessa forma busca contribuir para o planejamento energético descentralizado e sustentável.

Em conjunto, os capítulos reafirmam que a transição energética no Brasil deve transcender o paradigma técnico de expansão da oferta elétrica e incorporar dimensões territoriais. A energia solar fotovoltaica, ao ser articulada com políticas integradas de desenvolvimento e inclusão, pode desempenhar papel central na construção de uma transição justa, contribuindo não apenas para o cumprimento do

ODS 7, mas também para o fortalecimento da soberania energética e do desenvolvimento rural brasileiro.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese analisou de forma integrada o papel da energia solar fotovoltaica na eletrificação rural brasileira, situando-a no contexto mais amplo da transição energética justa e da busca por um modelo de desenvolvimento de baixo carbono. Estruturada em quatro artigos complementares, a pesquisa percorreu um trajeto que vai da revisão conceitual e crítica à proposição metodológica e empírica, demonstrando que a energia solar, mais do que uma solução tecnológica, constitui um vetor estratégico de transformação socioambiental e territorial. A Tese defende que a análise desses critérios não deve ser realizada de forma separada, mas sim de forma imbricada.

O Capítulo 1 realizou uma revisão sistemática e bibliométrica sobre o uso da energia fotovoltaica na eletrificação rural, no contexto da transição energética. Os resultados revelaram um campo científico em expansão e com forte caráter interdisciplinar, no qual convergem temas como transição energética, agricultura sustentável, pobreza energética e justiça social. Verificou-se que a energia solar descentralizada tem forte potencial para proporcionar benefícios socioeconômicos significativos, mas ainda enfrenta barreiras estruturais associadas ao financiamento, à regulação e à infraestrutura local. O capítulo concluiu que políticas integradas, modelos de negócio inclusivos e soluções tecnológicas adaptadas às especificidades regionais são indispensáveis para consolidar uma transição energética efetivamente justa. Sinalizando a necessidade de uma abordagem multicritério e regionalizada.

O Capítulo 2 aprofundou o exame da trajetória das políticas públicas de eletrificação rural no Brasil, da experiência pioneira do PRODEEM ao programa *Luz para Todos* e, mais recentemente, ao *Mais Luz para a Amazônia*. A análise revelou que, embora o país tenha alcançado níveis elevados de universalização do acesso à energia elétrica, o modelo de expansão adotado manteve características centralizadoras e pouco sensíveis às particularidades territoriais e sociais. O capítulo propõe, assim, uma reorientação das políticas públicas rumo a abordagens que integrem energia, território e desenvolvimento rural, valorizando a autonomia local.

O Capítulo 3 introduziu uma contribuição metodológica ao aplicar um modelo de análise multicritério baseado em lógica Fuzzy em ambiente SIG para avaliar o potencial fotovoltaico em fazendas experimentais de universidades públicas. A metodologia integrou variáveis meteorológicas, de uso do solo e de infraestrutura

elétrica e viária, possibilitando representar espacialmente a viabilidade técnica de instalação de sistemas solares. Os resultados mostraram que a combinação de critérios ponderados e a modelagem Fuzzy permitiram lidar com a incerteza e a heterogeneidade territorial, identificando áreas prioritárias e contribuindo para o planejamento energético de base científica. O capítulo reforça a relevância de instrumentos geoespaciais como suporte decisório para políticas de energia sustentável, principalmente em contextos rurais.

O Capítulo 4 expandiu essa abordagem para a escala nacional, utilizando dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) para mapear o potencial fotovoltaico em todo o território brasileiro. O estudo revelou a capacidade de cruzar informações para compor um diagnóstico espacial detalhado do país. Essa análise evidenciou que a transição energética deve estar ancorada na territorialidade e na diversidade regional, reconhecendo que o potencial técnico da energia solar não é homogêneo. O modelo aplicado demonstrou que a integração entre ciência de dados e planejamento energético é essencial para orientar decisões sustentáveis e descentralizadas.

As contribuições desta tese se situam em três níveis complementares.

No plano teórico, o trabalho articula os campos da transição energética, eletrificação rural e planejamento territorial, oferecendo um referencial interdisciplinar que combina aspectos técnicos, socioeconômicos e ambientais. Essa abordagem contribui para o avanço do debate sobre justiça energética e sobre o papel das energias renováveis na redução das desigualdades territoriais.

No plano metodológico, a integração entre SIG, lógica Fuzzy e análise multicritério constitui um avanço relevante, permitindo a representação espacial de variáveis complexas e a incorporação de graus de pertinência que refletem melhor a realidade dos territórios rurais. A metodologia proposta é replicável e adaptável, podendo ser aplicada a outras fontes de energia renovável ou a diferentes escalas geográficas.

O trabalho reconhece limitações relacionadas à disponibilidade e à qualidade dos dados utilizados, bem como à calibração dos parâmetros Fuzzy, que dependem de funções de pertinência ajustadas a contextos regionais. As análises concentraram-se principalmente em fatores técnicos e territoriais, mas podem ser ampliadas por indicadores socioeconômicos e institucionais. Nesse sentido, futuras pesquisas poderão integrar o modelo proposto a técnicas de aprendizado de máquina e análises temporais de séries climáticas, aprimorando sua capacidade preditiva e aplicabilidade em diferentes escalas. A aplicação da metodologia em polos agroenergéticos e

assentamentos rurais surge como uma frente promissora, ao permitir a integração entre produção de energia, uso produtivo da eletricidade e segurança alimentar, além de favorecer estudos sobre geração de empregos verdes, capacitação técnica e participação social.

Em síntese, a energia solar emerge como um instrumento de justiça energética, territorial e social, capaz de combater a pobreza energética e contribuir para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7. Sua adoção no meio rural representa uma oportunidade concreta de construção de uma nova ruralidade autônoma, conectada e sustentável, inserindo o Brasil na agenda global de descarbonização sem reproduzir dependências históricas. Assim, a energia fotovoltaica se afirma não apenas como tecnologia de geração, mas como uma mudança de paradigma, na qual o território rural deixa de ser um passivo atendido pela indústria elétrica para se tornar protagonista e potencial fornecedor de energia limpa no processo de transição energética para o baixo carbono.

REFERÊNCIAS

- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **General Assembly. Resolution 70/1, 25 September 2015: transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. [S. l.]: ONU, 2015. Disponível em: http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf. Acesso em: 1 out. 2021.
- IBRIK, I. Micro-grid solar photovoltaic systems for rural development and sustainable agriculture in Palestine. **Agronomy**, Basel, v. 10, n. 10, p. 1474, 2020.
- FEKETE, H.; KURAMOCHI, T.; ROELFSEMA, M.; DEN ELZEN, M.; FORSELL, N.; HÖHNE, N.; LUNA, L.; HANS, F.; STERL, S.; OLIVIER, J.; VAN SOEST, H.; FRANK, S.; GUSTI, M. A review of successful climate change mitigation policies in major emitting economies and the potential of global replication. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 137, p. 110602, 2021.
- LEDUCHOWICZ-MUNICIO, A.; LÓPEZ-GONZÁLEZ, A.; DOMENECH, B.; FERRER-MARTÍ, L.; UDAETA, M. E. M.; GIMENES, A. L. V. Last-mile rural electrification: lessons learned from universalization programs in Brazil and Venezuela. **Energy Policy**, Amsterdam, v. 167, art. 113080, 2022.
- LEDUCHOWICZ-MUNICIO, A.; DOMENECH, B.; FERRER-MARTÍ, L.; UDAETA, M. E. M.; GIMENES, A. L. V. What are the key strategies for a successful and fair energy transition for all? Multi-criteria assessment of isolated case studies in São Paulo. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, Amsterdam, v. 50, p. 100813, 2024.
- RELVA, S. G.; LÓPEZ, G.; SANZ, P.; GALARZA, A.; CORDERO, Á. Enhancing developing countries' transition to a low-carbon electricity sector. **Energy**, Amsterdam, v. 220, p. 119659, 2021.
- SMIL, V. **Energy and civilization: a history**. Cambridge (MA): The MIT Press, 2017.
- YADAV, P.; DAVIES, P. J.; KHAN, S. Breaking into the photovoltaic energy transition for rural and remote communities: challenging the impact of awareness norms and subsidy schemes. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Berlin, v. 22, n. 4, p. 817–834, 2020.
- YADAV, P.; DAVIES, P. J.; PALIT, D. Distributed solar photovoltaics landscape in Uttar Pradesh, India: lessons for transition to decentralised rural electrification. **Energy Strategy Reviews**, Amsterdam, v. 26, 2019.
- YADAV, P.; MALAKAR, Y.; DAVIES, P. J. Multi-scalar energy transitions in rural households: distributed photovoltaics as a circuit breaker to the energy poverty cycle in India. **Energy Research & Social Science**, Amsterdam, v. 48, p. 1–12, 2019.
- YUSHCHENKO, A.; DE BONO, A.; CHATENOUX, B.; PATEL, M. K.; RAY, N. GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 81, p. 2088–2103, 2018.