

AVALIAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL PROBABILÍSTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS COM ELIPSES DE CONFIANÇA E MANOVA

Vinícius A. Montgomery de Miranda – vmontgomery@inatel.br
Edson de Oliveira Pamplona – pamplona@unifei.edu.br
Giancarlo Aquila – giancarlo.aquila@yahoo.com

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, análise de viabilidade econômica, emissão de carbono, LCOE.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda global por energia e a necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a expansão das fontes renováveis. Avanços tecnológicos, maior eficiência e novos materiais mitigam os impactos ambientais da geração convencional, embora persistam desafios ligados à intermitência, armazenamento e adaptação das redes (lyke, 2024). Nesse cenário, a energia solar fotovoltaica destaca-se como alternativa de baixo carbono, com capacidade global duplicada entre 2014 e 2023 e previsão de responder por 80% da expansão renovável até 2030. No Brasil, a geração solar atingiu 48 GW em 2024, impulsionada pela elevada irradiação e pelo crescimento da geração distribuída (IRENA, 2025).

Diante das incertezas climáticas, tarifárias e operacionais que afetam o setor, este estudo propõe um modelo probabilístico para avaliar a viabilidade econômica e ambiental de sistemas fotovoltaicos de 100 kWp em 17 localidades brasileiras. O modelo combina o Custo Nivelado de Energia (LCOE) e a Densidade de Redução de CO₂ (DCO₂), estimados via Simulação de Monte Carlo. As distribuições de probabilidade obtidas permitem, simultaneamente, a aplicação da MANOVA e a construção de elipses de confiança, possibilitando avaliar a dispersão dos resultados e as diferenças regionais. Essa abordagem fornece subsídios consistentes para

decisões de investimento e políticas públicas voltadas à transição energética sustentável no Brasil.

2. DESENVOLVIMENTO

Os sistemas fotovoltaicos podem operar *on-grid*, *off-grid* ou em arranjos híbridos, oferecendo diferentes níveis de autonomia, armazenamento e injeção de energia na rede, conforme regulamentação vigente no Brasil (Lei nº 14.300/2022; Resolução ANEEL nº 1.059/2023). Com o aumento da demanda energética, a segurança energética torna-se estratégica, reforçando a importância de fontes renováveis, que reduzem impactos ambientais e pressionam menos os recursos naturais. Experiências europeias mostram que a expansão das renováveis contribui simultaneamente para mitigação de emissões, fortalecimento da segurança energética, redução da dependência de combustíveis fósseis e promoção do crescimento econômico sustentável, apoiada por políticas públicas (De Rosa, Meleddu e Pulina, 2024).

2.1 Referencial teórico

Novas tecnologias têm sido continuamente desenvolvidas para aprimorar a eficiência da conversão fotovoltaica, consolidando os sistemas solares como uma alternativa estratégica para suprir a crescente demanda por eletricidade e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. A geração elétrica dos módulos fotovoltaicos pode ser estimada pela Equação 1:

$$E_t = \eta \times \rho \times A \times (1 - \gamma) \times (1 - \delta)^{t-1} \quad (1)$$

Onde: η = eficiência das células PV; ρ = irradiação local (kWh/m²); A = área ocupada pelo sistema (m²); γ = perda do sistema; δ = fator de degradação; t é o tempo de vida dos módulos fotovoltaicos.

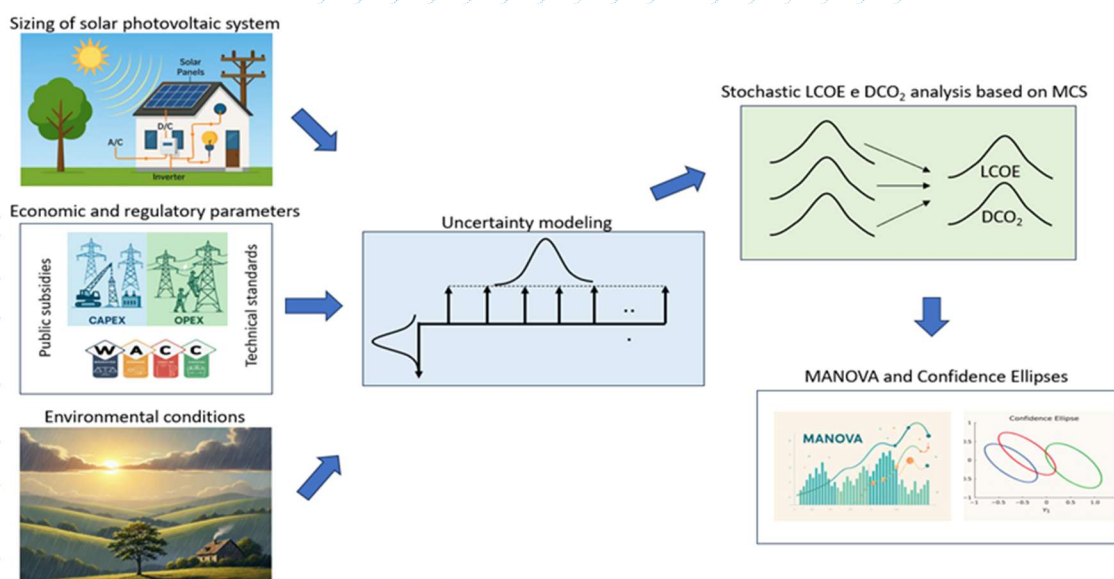
Apesar da eficiência média dos módulos fotovoltaicos comerciais situar-se em torno de 20%, o desempenho pode ser aprimorado por meio da escolha de locais com alta irradiância, resfriamento dos módulos e uso de rastreadores solares, elevando a captação e a viabilidade técnico-econômica (Sutanto *et al.*, 2025). O Brasil apresenta

irradiação média superior à de países líderes, com valores acima de $5,0 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$ no Nordeste e Centro-Oeste, entre 4,5 e 5,0 no Sudeste e Norte, e de 4,2 a 4,8 no Sul, ainda superiores aos da Europa Central (INPE, 2017).

2.2 Metodologia

O modelo analítico considera quatro grupos de parâmetros: técnicos, econômicos, regulatórios e ambientais, cuja interação é ilustrada na Figura 1. A modelagem utiliza séries históricas de irradiação solar (1984–2022) da NASA (2025), combinadas a dados locais para simular a geração elétrica e sua variabilidade. As distribuições de LCOE e DCO_2 foram obtidas por Simulação de Monte Carlo (5.000 iterações) no software Crystal Ball®, integrando variáveis determinísticas e estocásticas para representar a dispersão e incerteza dos resultados.

Figura 1 - Modelagem e passo a passo para a análise estocástica econômica e ambiental.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Na etapa seguinte, a Análise Multivariada de Variância (MANOVA) avalia simultaneamente as diferenças entre localidades com base nos indicadores LCOE e DCO_2 , permitindo uma análise integrada do desempenho econômico e ambiental. As elipses de confiança complementam essa abordagem, facilitando a visualização e comparação dos resultados.

A pesquisa é quantitativa, aplicada e empírica descritiva, buscando gerar impacto social e avançar o conhecimento, utilizando modelagem e simulação com base em modelo matemático (Gil, 2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a média, o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos indicadores LCOE e DCO₂ para as 17 localidades analisadas. As localidades estão ordenadas de acordo com o Coeficiente de Variação (CV), que indica a variabilidade dos resultados em torno da média. Valores mais elevados desse coeficiente refletem maior risco do investimento, evidenciado pela dispersão dos resultados de LCOE e DCO₂ associados aos projetos estudados.

Tabela 1 – Média, desvio-padrão e coeficiente de variação de LCOE e DCO₂ para as localidades

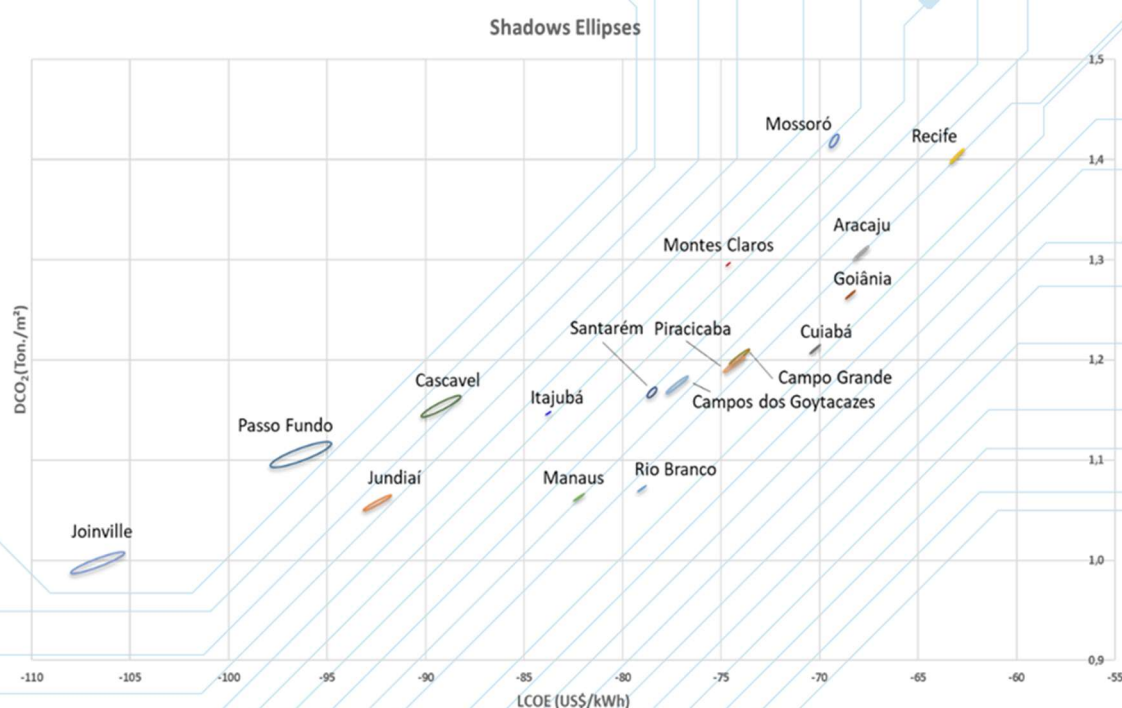
Localidade	LCOE média	LCOE dp	LCOE cv	DCO ₂ média	DCO ₂ dp	DCO ₂ cv
Montes Claros	74,64	2,70	0,036	1,30	0,05	0,038
Itajubá	83,78	3,49	0,042	1,15	0,05	0,043
Rio Branco	79,03	6,20	0,078	1,07	0,08	0,075
Santarém	78,51	6,87	0,088	1,17	0,10	0,085
Manaus	82,22	7,66	0,093	1,06	0,10	0,094
Mossoró	69,27	6,72	0,097	1,42	0,13	0,092
Goiânia	68,44	6,90	0,101	1,27	0,12	0,094
Cuiabá	70,23	7,50	0,107	1,21	0,12	0,099
Aracaju	67,90	10,89	0,160	1,31	0,19	0,145
Recife	63,02	10,30	0,163	1,40	0,20	0,143
Campo Grande	74,07	14,65	0,198	1,20	0,21	0,175
Piracicaba	74,35	15,48	0,208	1,20	0,22	0,183
Campos Goytacaz.	77,24	16,06	0,208	1,18	0,24	0,203
Jundiaí	92,46	20,58	0,223	1,06	0,21	0,198
Cascavel	89,22	28,88	0,324	1,15	0,29	0,252
Joinville	106,65	39,51	0,370	1,00	0,29	0,290
Passo Fundo	96,34	44,75	0,465	1,11	0,35	0,315

Fonte: elaborado pelos autores (2025)

As localidades com menor variabilidade, segundo o coeficiente de variação (CV), são Montes Claros, Itajubá e Rio Branco, indicando menor risco nas estimativas, enquanto Passo Fundo, Joinville e Cascavel apresentam maior dispersão e incerteza. Nordeste e Centro-Oeste exibem variabilidade intermediária, equilibrando desempenho e estabilidade. A Análise de Variância ($p < 0,05$) e as elipses de confiança (Figura 2) evidenciam essas diferenças entre as 17 localidades: Itajubá,

Montes Claros, Goiânia e Cuiabá mostram elipses mais compactas (maior consistência e menor incerteza), enquanto Joinville, Cascavel, Passo Fundo e Jundiá exibem elipses mais alongadas (maior variabilidade e risco). A forma das elipses representa graficamente a dispersão conjunta — eixos curtos indicam estabilidade, eixos longos, maior risco.

Figura 2 – Elipses de Confiança das 17 localidades estudadas.



Fonte: elaborado pelos autores (2025)

Os testes estatísticos p e F da MANOVA confirmam distinções significativas entre as localidades. Todos apresentaram $p = 0,000$, exceto Piracicaba $\times$ Campo Grande ($p = 0,02$), ainda significativo a 95%. No teste-F, todos os cruzamentos resultaram em $F > 1,96$, reforçando as diferenças entre os grupos, com menor valor em Piracicaba $\times$ Campo Grande ($F = 6,01$), o que confirma a consistência estatística e a distinção regional observada nas elipses de confiança.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou um modelo probabilístico baseado em Simulação de Monte Carlo para avaliar a viabilidade econômica e ambiental da geração solar fotovoltaica, integrando variáveis técnicas, econômicas e meteorológicas. As distribuições de LCOE e DCO_2 , analisadas por MANOVA e elipses de confiança,

revelaram diferenças regionais significativas e permitiram classificar as localidades quanto à atratividade econômica e ambiental. Os resultados apontam maior viabilidade no Nordeste e Centro-Oeste, desempenho intermediário no Sudeste e Norte, e menor favorabilidade no Sul, onde há maior dispersão dos indicadores. Recife e Mossoró destacam-se como locais mais atrativos, enquanto Joinville apresentou os piores resultados. A irradiação solar mostrou-se o principal fator determinante da viabilidade, superando variações de custos. Assim, o modelo proposto confirma o papel estratégico da energia solar fotovoltaica na transição energética e oferece subsídios para decisões de investimento e formulação de políticas públicas sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

Nossos agradecimentos à FAPEMIG pelo apoio e fomento que viabilizaram a realização e divulgação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução normativa nº 1059/2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 25 de junho de 2025.
- DE ROSA, M.; MELEDDU, M.; PULINA, M. Contextual drivers of energy demand and supply from renewable sources. **Heliyon**, v.10, ed. 21, e39727, nov. 2024.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2022.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos: INPE, 2 ed., 2017. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 10 de setembro de 2025.
- IRENA – International Renewable Energy Agency. **Renewable Capacity Statistics 2025**, 2025. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 10 de setembro de 2025.
- IYKE, B. N. Climate change, energy security risk, and clean energy investment. **Energy Economics**, v. 129, 107225, jan. 2024.
- NASA – National Aeronautics and Space Administration. **Power Data Access Viewer**. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Acesso em: 3 de fevereiro de 2025.
- SUTANTO, B.; IACOVIDES, H.; NASSER, A.; CIONCOLINI, A.; AFGAN, I. Efficiency improvement of floating photovoltaic panels with natural convection cooling loops: Multi-physics thermal modelling. **Solar Energy**, v. 286, 113170, jan. 2025.