

PROPOSTA DE UM *FRAMEWORK* MULTIOBJETIVO PARA O DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO HÍBRIDOS RESIDENCIAIS COM ARMAZENAMENTO FRENTE A MUDANÇAS REGULATÓRIAS

Arthur Leandro Guerra Pires – a.guerrapires@hotmail.com
Rafael de Carvalho Miranda – rafael.miranda@unifei.edu.br
Paulo Rotella Junior – paulo.rotela@gmail.com

Palavras-chave: Otimização multiobjetivo, Dimensionamento ótimo, Mudanças regulatórias, Armazenamento de energia, Geração híbrida.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o aquecimento global estão entre as principais preocupações globais (Taabodi *et al.*, 2025). Nesse contexto, a transição energética busca ampliar o uso de fontes renováveis, como solar e eólica, que apresentam menor impacto ambiental e maior sustentabilidade (Suraparaju *et al.*, 2025). Entretanto, sua ampla inserção enfrenta desafios técnicos e econômicos, especialmente pela intermitência e pelas restrições impostas à rede elétrica (Olabi; Abdelkareem, 2022).

No Brasil, o tema é particularmente relevante. Apesar do alto potencial renovável, o país ainda depende fortemente da geração hidrelétrica e enfrenta limitações para novos projetos de geração distribuída (EPE, 2025), com problemas atrelados às altas taxas de injeção de energia na rede. Além disso, a Lei 14.300/2022 (BRASIL, 2022) alterou o modelo de compensação da energia injetada na rede, atrelada à regra do *net-metering*, exigindo soluções mais eficientes e economicamente atrativas para os prosumidores.

Nesse cenário, o armazenamento de energia destaca-se como estratégia para mitigar a intermitência e aumentar a autossuficiência (Bertsch; Geldermann; Lühn, 2017). No contexto de baterias, as baterias de íon-lítio, especialmente as de segunda vida, oriundas de veículos elétricos, surgem como alternativas promissoras por aliar menor custo (Gu *et al.*, 2024) e menor impacto ambiental (Saez-de-Ibarra *et*

al., 2016). Complementarmente, sistemas híbridos que combinam energia solar e eólica aproveitam a complementaridade dos recursos e aumentam a confiabilidade do suprimento (Mahesh; Sushnigdha, 2022).

Diante da diversidade de configurações possíveis, a otimização multiobjetivo é uma ferramenta adequada para apoiar decisões, pois permite equilibrar critérios conflitantes (Khan; Yu; Waseem, 2022) como viabilidade econômica, autossuficiência e impacto ambiental. Contudo, poucos estudos integram simultaneamente essas três dimensões em sistemas híbridos residenciais. Além disso, são poucos estudos de otimização que exploraram os contextos da mudança regulatória brasileira, trazendo ainda mais relevância para o presente estudo.

Assim, esta pesquisa propõe um *framework* multiobjetivo para identificar combinações ótimas de sistemas fotovoltaico-eólico com baterias em escala residencial, considerando as mudanças regulatórias da Lei 14.300/2022 e as opções tarifárias brasileiras, sob as perspectivas econômica, de autonomia e ambiental.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Referencial teórico

2.1.1. *Net-Metering* e a mudança regulatória no Brasil

A ampliação das fontes sustentáveis exige políticas energéticas eficazes para incentivar investimentos (Meckling, 2019). entre os principais mecanismos destacam-se o *feed-in tariff* (FiT) e o *net-metering*, adotados em mais de 60 países (REN21, 2024). O *net-metering* compensa o saldo entre energia exportada e importada (Koumparou *et al.*, 2017), podendo gerar créditos ao consumidor (Dufo-López; Bernal-Agustín, 2015). No Brasil, a Lei nº 14.300/2022 (BRASIL, 2022) reformulou esse sistema, introduzindo a taxação gradual de uma parte do valor da tarifa.

2.1.2. Metodologia de superfície de Resposta (RSM)

A RSM utiliza ferramentas matemáticas e estatísticas para modelar a relação entre variáveis de entrada e a variável resposta (Montgomery, 2017). Geralmente, essa relação é representada por um polinômio de segunda ordem, ajustado pelo

método dos mínimos quadrados (OLS) para minimizar a diferença entre valores observados e previstos. Em comparação à abordagem *One-Variable-At-a-Time* (OVAT), a RSM é mais eficiente na exploração do espaço experimental e na identificação de interações entre variáveis (Williamson *et al.*, 2021).

2.1.3. Normal Boundary Intersection (NBI)

O NBI é o método proposto por Das e Dennis (1998), que permite produzir um conjunto de pontos na fronteira de Pareto, mesmo para problemas de pequena escala, sendo considerado uma técnica eficiente para comparação de soluções uniformemente distribuídas na fronteira de Pareto. O método NBI é capaz de formar uma dispersão quase uniforme da fronteira Pareto-ótima, tornando-se uma abordagem mais atrativa quando comparada a outros métodos, como o Método da Soma Ponderada, na resolução de problemas multiobjetivo não convexos de alta dimensão (Cui *et al.*, 2017).

2.2. Metodologia

Inicialmente, o método RSM será utilizado para definir as simulações a partir da combinação dos níveis das variáveis de decisão. Cada configuração será simulada considerando sistemas híbridos com armazenamento, que podem utilizar energia eólica, fotovoltaica ou a combinação de ambas. Os dados utilizados serão provenientes da base da NASA, de referências da literatura e de informações de fabricantes. O estudo será aplicado a cenários brasileiros, incluindo também análises com baterias de segunda vida.

Com o método dos mínimos quadrados ordinários (OLS) será possível determinar os coeficientes das funções objetivo em relação às variáveis de decisão, permitindo modelar o Valor Presente Líquido (VPL), a autossuficiência e as emissões de CO₂ equivalente. Em seguida, o método NBI será aplicado para a otimização multiobjetivo, resultando nas fronteiras de Pareto. Por fim, a distância euclidiana normalizada poderá ser utilizada para identificar uma solução única e apoiar a tomada de decisão

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Espera-se que os modelos multiobjetivo desenvolvidos sob as perspectivas econômica, de autonomia e ambiental ofereçam uma abordagem abrangente para avaliar sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos com armazenamento em configuração *on-grid*.

Com a aplicação do método RSM serão modeladas as funções objetivo VPL, autossuficiência e emissões de CO₂ equivalentes, possibilitando analisar o impacto das mudanças regulatórias e apoiar tanto investidores quanto a formulação de políticas públicas. A otimização simultânea das variáveis será conduzida pelo método NBI, resultando na identificação da fronteira de Pareto com soluções eficientes sob múltiplos critérios.

Por fim, o método da distância euclidiana normalizada será empregado para selecionar o ponto ótimo dessa fronteira, identificando a configuração mais eficiente do sistema híbrido em termos econômicos, ambientais e técnicos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados esperados da pesquisa contribuirão para uma compreensão mais aprofundada da viabilidade e da otimização de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos com armazenamento de energia, considerando aspectos econômicos, ambientais e técnicos. A análise dos impactos da mudança regulatória da Lei nº 14.300/2022 e da utilização de baterias, incluindo as de segunda vida, ampliará a relevância prática dos resultados. Esses achados fornecerão diretrizes valiosas para subsidiar decisões de investimento e apoiar a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade energética.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES, ao CNPQ, a FAPESQ e à FAPEMIG, pelo apoio e financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BERTSCH, Valentin; GELDERMANN, Jutta; LÜHN, Tobias. What drives the

profitability of household PV investments, self-consumption and self-sufficiency?.

Applied Energy, [s. l.], v. 204, p. 1–15, 2017. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917308073>.

BRASIL. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**. [S. l.], 2022. Disponível em:

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. .

CUI, Yunfei *et al.* Review: Multi-objective optimization methods and application in energy saving. **Energy**, [s. l.], v. 125, p. 681–704, 2017. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544217303584>.

DAS, Indraneel; DENNIS, J. E. Normal-Boundary Intersection: A New Method for Generating the Pareto Surface in Nonlinear Multicriteria Optimization Problems.

SIAM Journal on Optimization, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 631–657, 1998. Disponível em:

<http://epubs.siam.org/doi/10.1137/S1052623496307510>.

DUFO-LÓPEZ, Rodolfo; BERNAL-AGUSTÍN, José L. A comparative assessment of net metering and net billing policies. Study cases for Spain. **Energy**, [s. l.], v. 84, p.

684–694, 2015. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544215003254>.

EPE. **Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída**. [S. l.], 2025.

Disponível em: <https://dashboard.epe.gov.br/apps/pdgd/>. .

GU, Xubo *et al.* Challenges and opportunities for second-life batteries: Key technologies and economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 192, p. 114191, 2024. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032123010493>.

KHAN, Tahir; YU, Miao; WASEEM, Muhammad. Review on recent optimization strategies for hybrid renewable energy system with hydrogen technologies: State of the art, trends and future directions. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 47, n. 60, p. 25155–25201, 2022. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036031992202465X>.

MAHESH, Aeidapu; SUSHNIGDHA, Gangireddy. Optimal sizing of photovoltaic/wind/battery hybrid renewable energy system including electric vehicles using improved search space reduction algorithm. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 56, p. 105866, 2022. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X22018540>.

MECKLING, Jonas. Governing renewables: Policy feedback in a global energy transition. **Environment and Planning C: Politics and Space**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 317–338, 2019. Disponível em:

<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/2399654418777765>.

OLABI, A.G.; ABDELKAREEM, Mohammad Ali. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 158, p. 112111, 2022. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032122000405>.

REN21. **RENEWABLES 2024 GLOBAL STATUS REPORT Renewables in Energy Supply - Policy and Targets**. [S. l.], 2024. Disponível em:

<https://www.ren21.net/gsr->

[2024/modules/energy_supply/01_global_trends/02_policy_and_targets/](https://www.ren21.net/gsr-2024/modules/energy_supply/01_global_trends/02_policy_and_targets/) .

SAEZ-DE-IBARRA, Andoni *et al.* Sizing Study of Second Life Li-ion Batteries for Enhancing Renewable Energy Grid Integration. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [s. l.], v. 52, n. 6, p. 4999–5008, 2016. Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/document/7516664/>.

SURAPARAJU, Subbarama Kousik *et al.* Challenges and perspectives of energy storage integration in renewable energy systems for net zero transition. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 125, p. 116923, 2025. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352152X25016366>.

TAABODI, M.H. *et al.* Electrochemical storage systems for renewable energy integration: A comprehensive review of battery technologies and grid-scale applications. **Journal of Power Sources**, [s. l.], v. 641, p. 236832, 2025. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775325006688>.