



Otimização de Um Sistema Fotovoltaico de Microgeração: Uma Aplicação dos Métodos AHP E TOPSIS na Seleção de Alternativa de Armazenamento

Ana Luiza Oliveira de Macedo

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF

(luiza.oliveira@discente.univasf.edu.br)

Thiago Magalhães Amaral

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF

(thiago.magalhaes@univasf.edu.br)

CONTEXTUALIZAÇÃO: A constante integração de unidades de Micro e Minigeração Distribuída (MMGD) à rede elétrica tem estado associada à inserção de dificuldades operacionais no Sistema Interligado Nacional (SIN), uma vez que o planejamento original do sistema apresenta dificuldades em acompanhar o progresso verificado pela geração sustentável (CÔRTEZ, 2025). Durante os períodos de pico na geração de energia, a injeção excessiva na rede pode ultrapassar a capacidade das linhas de transmissão, o que por consequência resulta em variações de tensão e instabilidade na frequência. Neste cenário, a aplicação de medidas de restrição da geração como o *curtailment* são adotadas, visando proteger a integridade do SIN (MEDEIROS, 2024). Desse modo, verifica-se a necessidade da adoção de soluções complementares que venham a preservar a operação segura da rede elétrica. Uma possível solução que tem recebido maior destaque nos últimos anos é a inserção de armazenadores de energia, sendo estes responsáveis por auxiliar na otimização do fluxo de potência e promover um despacho eficiente de energia em sistemas intermitentes. Neste sentido, projeções realizadas pela consultoria BloombergNEF (BNEF) mostram que até o final de 2030, as instalações de

armazenamento de energia devem atingir uma capacidade acumulada de 411 GW, sendo a maior parte dessa capacidade voltada para a gestão do sistema elétrico (CASARIN, 2022). Diante desse cenário, a realização de análises acerca dos diversos métodos de armazenamento atualmente disponíveis se ampara em uma preocupação cada vez mais necessária, que compreende ainda as barreiras atualmente enfrentadas com relação a implementação de métodos tradicionais de armazenamento de energia, como, por exemplo, a sua viabilidade econômica (GOMES, 2022). Segundo Romão, Carvalho e Carvalho Junior (2019), devido aos esforços associados ao seu desenvolvimento, as baterias de íon de lítio são as mais empregadas atualmente. No entanto, algumas outras alternativas às baterias de íons de lítio podem ser mencionadas, como, por exemplo, as baterias de chumbo-ácido (PbA), sódio-íon (Na-Íon) e de fluxo. Nesse contexto, a avaliação comparativa dessas diferentes tecnologias de armazenamento de energia é proposta afim de delimitar uma base para escolhas técnicas e econômicas adequadas. Para tanto, a aplicação de metodologias multicritério, como a utilização do método AHP (*Analytic Hierarchy Process* – Processo de Análise Hierárquica) e do método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* – Técnica para Ordenação das Preferências por Similaridade com a Solução Ideal), caracterizam-se como estratégias consistentes para identificar a alternativa mais apropriada ao suporte de um dado sistema estudado.

OBJETIVO: O presente estudo visa aplicar uma metodologia multicritério híbrida com os métodos AHP e TOPSIS para identificar a alternativa mais adequada de tecnologia de armazenamento de energia para um sistema fotovoltaico de microgeração instalado no campus da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Juazeiro, Bahia.

MÉTODO: A partir das características iniciais do sistema, define-se um conjunto de alternativas a serem analisadas: (i) Bateria de íon de lítio (LiFePO_4 – alternativa já utilizada no sistema base); (ii) Bateria de chumbo-ácido (PbA); (iii) Bateria de sódio-íon (Na-ion); (iv) Bateria de fluxo (Vanádio); e, (v) Bateria NMC (Níquel Manganês Cobalto). Ademais, cinco critérios de avaliação com base em aspectos técnicos,

econômicos e ambientais, considerados fundamentais para a análise do desempenho de diferentes tecnologias de armazenamento, são definidos, a saber: (i) eficiência de conversão (%); (ii) vida útil (número de ciclos); (iii) custo nivelado de armazenamento (USD/kWh útil); (iv) impacto ambiental/reciclabilidade (escala de 1 a 10); e, (v) segurança operacional (escala 1 a 10). Na primeira etapa do estudo, foi aplicada a metodologia AHP para determinação dos pesos relativos de cada critério. Com esse propósito, elaborou-se uma matriz de comparação par a par com base na escala fundamental de Saaty, que varia de 1 (igual importância/preferência) a 9 (importância/preferência absoluta). O preenchimento da matriz foi realizado por um decisor especialista, professor, mestre e doutor em Engenharia Elétrica, responsável pelo sistema fotovoltaico analisado na UNIVASF. A coleta desses dados foi feita por meio de um formulário digital, elaborado especificamente para este estudo, no qual foram definidas as relações de comparação entre os critérios tendo como base sua experiência técnica e conhecimento prático do sistema em operação. A regularidade das respostas foi verificada por meio do índice de consistência (IC) e da razão de consistência (RC), sendo permitido valores de RC inferiores a 10% para conferência dos dados, conforme literatura. Os pesos resultantes foram posteriormente normalizados para utilização no método TOPSIS e empregado em sequência para o ranqueamento das alternativas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES: Com base nas respostas fornecidas pelo decisor, os pesos relativos dos critérios foram determinados. Em conformidade com o procedimento de análise da matriz de comparações, verificou-se uma RC igual a 0,089, o que confirma a consistência das avaliações realizadas. Em sequência, os pesos obtidos foram normalizados, tendo como resultado: eficiência de conversão (0,1130); vida útil (0,0647); custo nivelado de armazenamento (0,0366); impacto ambiental/reciclabilidade (0,2067); e, segurança operacional (0,5790). A partir desses resultados, observa-se inicialmente uma maior influência, da perspectiva do decisor, para sistemas que apresentam maior segurança operacional e que estejam associados a menores impactos ambientais, refletindo a preocupação do especialista pela confiabilidade do sistema, visto o âmbito acadêmico ao qual o sistema é inserido. Com os pesos definidos, aplicou-se o método

TOPSIS para o ranqueamento das alternativas de armazenamento de energia. Para tanto, considerou-se valores técnicos e econômicos levantados para cada tecnologia. Dando continuidade ao estudo, o cálculo da proximidade relativa (ζ_i) permitiu ordenar as alternativas pelos seus valores de proximidade. Em ordem decrescente de prioridade, os valores obtidos para cada alternativa foram: Bateria de Íon Lítio = 0,7829; Bateria de Fluxo = 0,7608; Bateria de Sódio-Íon = 0,6057; Bateria NMC = 0,3279; e, Bateria de Chumbo-ácido = 0,1507. Esses resultados revelam que a bateria de íon lítio foi a alternativa de melhor desempenho global, apresentando maior similaridade à solução ideal. Observa-se ainda que sua vantagem é garantida pela combinação de alta eficiência de conversão (95%), vida útil satisfatória (4000 ciclos) e custo nivelado de armazenamento competitivo (151 USD/kWh útil), mantendo também níveis superiores no que diz respeito a segurança operacional e impacto ambiental. Por fim, destaca-se ainda o resultado obtido para a bateria de chumbo-ácido, apresentando os menores índices de proximidade, o que evidencia algumas limitações em termos de densidade e eficiência energética referente a essa tecnologia, além dos valores inferiores referentes aos seus indicativos de segurança operacional e nível de impacto ambiental/reciclabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS: A aplicação integrada dos métodos AHP e TOPSIS no apoio de decisões multicritério de seleção tecnológica em sistemas de energia renovável mostra-se eficaz ao se adequar aos padrões estabelecidos e identificar de forma quantitativa a alternativa mais adequada às condições fornecidas. O procedimento, por sua vez, considerou aspectos técnicos, econômicos, ambientais e operacionais, estabelecendo uma análise equilibrada e consistente. A análise indicou a bateria de íon-lítio como a alternativa de melhor desempenho global, corroborando sua atual predominância no mercado de sistemas de armazenamento e sua adoção no sistema objeto deste estudo. Por fim, sugere-se a aplicação e o aperfeiçoamento da metodologia proposta em novos estudos, visando à sua consolidação como instrumento de suporte técnico e estratégico ao planejamento de sistemas híbridos sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Decisão multicritério; AHP; TOPSIS; Sistema fotovoltaico; Armazenamento de energia.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

REFERÊNCIAS:

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE (BNEF). *Battery Price Survey 2024*. Londres: BloombergNEF, 2024. Disponível em: <https://about.bnef.com>. Acesso em: 06 de outubro de 2025.

CASARIN, Ricardo. **Mercado global de armazenamento de energia será quinze vezes maior que o atual em 2030**. *Portal Solar*, 13 out. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/tecnologia/armazenamento/mercado-global-de-armazenamento-de-energia-sera-quinze-vezes-maior-que-o-atual-em-2030>. Acesso em: 23 de setembro de 2025.

CÔRTEZ, Pedro. **Há excesso de energia solar e eólica no Brasil?** *CNN Brasil*, 11 set. 2025. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br/blogs/pedro-cortes/nacional/brasil/ha-excesso-de-energia-solar-e-eolica-no-brasil/#goog_rewarded. Acesso em: 23 de setembro de 2025.

GOMES, Amanda. **Avaliação de viabilidade técnica e econômica de sistemas de armazenamento de energia de pequeno porte associados a geradores solares fotovoltaicos residenciais**. 2022. 105 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 06 de outubro de 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Energy Storage Technology Report 2022*. Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/reports>. Acesso em: 06 de outubro de 2025.

LI, X.; ZHANG, Y.; WANG, H. *Life cycle assessment of lithium-ion and sodium-ion batteries for renewable energy storage applications*. *Journal of Energy Storage*, v. 67, p. 107–118, 2023.



Anais do Simpósio Acadêmico de Engenharia de Produção (SAEPRO) da EEL-USP

IX SAEPRO – 25 e 26 de novembro de 2025

RYDH, C. J. *Environmental Assessment of Battery Systems: Critical Issues for Established and Emerging Technologies*. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2003. Tese de Doutorado (Ph.D. em Análise de Sistemas Ambientais).

ROMÃO, Ulisses Galvão; CARVALHO, Amauri Dias de; CARVALHO JUNIOR, Arnaldo. **Baterias de íon de lítio: estado da arte e aplicações**. Revista Acadêmica – Ensino de Ciências e Tecnologias, Cubatão: IFSP, v. 5, n. 5, p. 86-106, ago./dez. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339209159>. Acesso em: 23 de setembro de 2025.

UNITED STATES. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE); NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **2023 Annual Technology Baseline (ATB): Electricity Storage**. Golden, CO: NREL, 2023. Disponível em: <https://atb.nrel.gov>. Acesso em: 06 de outubro de 2025.