

AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO DE TECNOLOGIAS ELETROQUÍMICAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

André Hoinoski dos Anjos¹, Sérgio Inácio Gomes², Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ), Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Paraná, Brasil (andre_h.anjos@hotmail.com)

²Eixo de Controle e Processos Industriais (ECPI), Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Paraná, Brasil

Resumo: Os sistemas de armazenamento de energia são um dos grandes desafios nos tempos atuais. Este trabalho avaliou quatro tecnologias de armazenamento eletroquímico de energia (Li-ion, NaS, VRFB e chumbo-ácido) por meio do método multicritério PROMETHEE II. Foram considerados critérios técnicos, econômicos, ambientais e de aplicabilidade, utilizando três métodos de ponderação e cinco cenários estratégicos. Os resultados indicaram a Li-ion como a tecnologia de melhor desempenho global, enquanto a chumbo-ácido destacou-se quando priorizados os critérios econômicos.

Palavras-chave: Armazenamento de Energia; Baterias Estacionárias; Apoio à Decisão Multicritério; Planejamento Energético; Ranqueamento Tecnológico.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda mundial por energia elétrica, impulsionada pelo crescimento populacional, pela expansão industrial, pela digitalização dos serviços e pela eletrificação de diversos setores, tem intensificado a necessidade de sistemas energéticos mais eficientes, confiáveis e sustentáveis. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o consumo global de eletricidade deverá continuar crescendo nos próximos anos, impulsionado principalmente pela expansão dos centros de dados, sistemas de climatização e veículos elétricos (IEA, 2025).

Embora a eletricidade seja um dos pilares do desenvolvimento econômico e social, grande parte da matriz energética mundial ainda depende de combustíveis fósseis, responsáveis por elevadas emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2021; IEA, 2021a). A expansão das fontes renováveis, especialmente solar e eólica, tem desempenhado papel central na transição energética e na descarbonização da economia (IRENA, 2023). Entretanto, a natureza intermitente dessas fontes impõe desafios relacionados à estabilidade e à flexibilidade dos sistemas elétricos, tornando o armazenamento de energia essencial para equilibrar a oferta e a demanda e ampliar a participação das fontes renováveis na matriz elétrica (IEA, 2024).

Os sistemas de armazenamento podem ser classificados conforme a forma de armazenamento da energia em tecnologias mecânicas, eletromagnéticas, térmicas, químicas e eletroquímicas (Luo et al., 2015).

Entre essas alternativas, as tecnologias eletroquímicas destacam-se pela elevada eficiência, rápida resposta operacional, modularidade e flexibilidade de aplicação, características que favorecem sua utilização em sistemas elétricos modernos (Dunn et al., 2011; IEA, 2024). Além disso, sua expansão está diretamente relacionada à disponibilidade de minerais críticos, como lítio, níquel, cobalto e vanádio, cuja oferta influencia os custos de produção, a segurança das cadeias de suprimento e a competitividade industrial (IEA, 2021b; OECD, 2023).

As principais tecnologias eletroquímicas empregadas em sistemas de armazenamento estacionário são as baterias de íon-lítio, sódio-enxofre, fluxo redox de vanádio e chumbo-ácido. As Figuras 1, 2, 3 e 4 apresentam esquemas simplificados do funcionamento dessas tecnologias.

A bateria de íon-lítio armazena energia por meio da intercalação reversível de íons de lítio entre o ânodo e o cátodo durante os processos de carga e descarga. A tecnologia apresenta elevada densidade energética, alta eficiência e ampla aplicação em sistemas de armazenamento, embora dependa de minerais críticos e requeira gerenciamento térmico para garantir sua segurança operacional (Dunn et al., 2011; IEA, 2024).

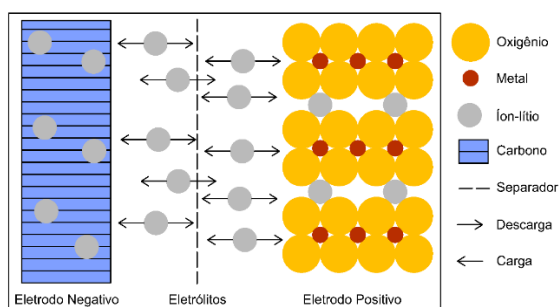


Figura 1. Esquema Explicativo de Uma Bateria de Íon-Lítio.

A bateria de sódio-enxofre utiliza eletrodos de sódio líquido e enxofre separados por um eletrólito cerâmico sólido, responsável pela condução seletiva de íons de sódio. Seu principal diferencial é a elevada capacidade de armazenamento para aplicações estacionárias de longa duração, embora sua operação ocorra em temperaturas elevadas (Luo et al., 2015; IRENA, 2023).

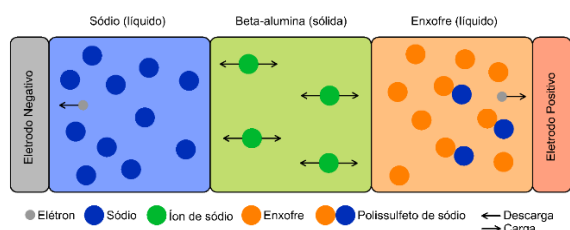


Figura 2. Esquema Explicativo de Uma Bateria de Sódio-Enxofre (NaS).

A bateria de fluxo redox de vanádio armazena energia em eletrólitos líquidos contendo diferentes estados de oxidação do vanádio, que circulam continuamente por uma célula eletroquímica durante os processos de carga e descarga. Essa configuração proporciona elevada vida útil, alta segurança operacional e possibilidade de expansão independente da potência e da capacidade energética (Skylas-Kazacos et al., 1986; IRENA, 2023).

A bateria de chumbo-ácido (Pb-ácido) baseia-se em reações eletroquímicas entre placas de chumbo e dióxido de chumbo imersas em solução de ácido sulfúrico. Apesar de representar a tecnologia recarregável mais antiga ainda em uso comercial, permanece amplamente empregada devido ao baixo custo e à elevada confiabilidade operacional, embora apresente menor densidade energética e impactos ambientais associados ao uso do chumbo (Bowen et al., 2021; IRENA, 2023).

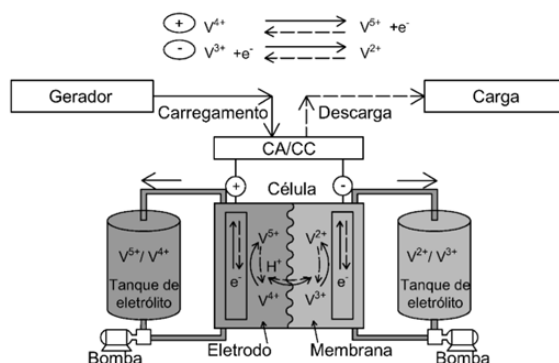


Figura 3. Esquema Simplificado de Uma Célula Redox-Flow de Vanádio (VRFB).

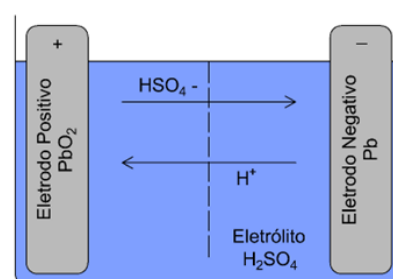


Figura 4. Esquema Simplificado de Uma Bateria de Chumbo-Ácido.

Apesar da crescente utilização dos sistemas de armazenamento, ainda são escassos os estudos que realizam avaliações integradas dessas tecnologias considerando simultaneamente critérios técnicos, econômicos, ambientais e de aplicabilidade. Para apoiar esse tipo de decisão, métodos de apoio multicritério podem ser empregados na comparação de alternativas tecnológicas e na priorização de investimentos no setor energético.

Entre esses métodos, destaca-se o *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE II), proposto por Brans e Vincke (1985). Trata-se de um método multicritério de apoio à decisão, que permite comparar alternativas sob múltiplos critérios e obter um ranking completo de desempenho. Trabalhos recentes demonstram sua aplicação em problemas relacionados ao planejamento energético, à seleção de tecnologias de armazenamento, à geração renovável e à avaliação de projetos de infraestrutura (Bortoluzzi et al., 2021; Liaqat et al., 2024; Mandal et al., 2024).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar e ranquear as tecnologias eletroquímicas de armazenamento de energia íon-lítio, sódio-enxofre, fluxo redox de vanádio e chumbo-ácido por meio do método PROMETHEE II, considerando critérios técnicos, econômicos, ambientais e de aplicabilidade. Como objetivos específicos, busca-se definir critérios de avaliação com base na literatura científica, aplicar diferentes



métodos de atribuição de pesos aos critérios, comparar o desempenho das tecnologias em cada categoria de análise e avaliar a influência de diferentes cenários estratégicos sobre o ranking final das alternativas.

MATERIAL E MÉTODOS

Formulação do Método PROMETHEE II

O método PROMETHEE II inicia-se com a definição do conjunto de alternativas que serão comparadas $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_m\}$ e do conjunto de critérios de comparação $C = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_n\}$, cujos desempenhos são organizados em uma matriz de decisão $F = [f_k(a_i)]$.

Na representação, a_i corresponde à i -ésima alternativa, c_k representa o k -ésimo critério de avaliação, m é o número total de alternativas, n é o número total de critérios e $[f_k(a_i)]$ representa o desempenho da alternativa a_i no critério c_k .

Em seguida, são atribuídos pesos (w_k) aos critérios, de forma que:

$$\sum_{k=1}^n w_k = 1, \quad w_k \geq 0 \quad (1)$$

Cada critério é classificado quanto à orientação de preferência, podendo ser de maximização ou de minimização. A diferença de desempenho entre duas alternativas (a_i) e (a_j) é calculada por:

Critérios de maximização:

$$d_{ij}^{(k)} = f_k(a_i) - f_k(a_j), \quad (2)$$

Critérios de minimização:

$$d_{ij}^{(k)} = f_k(a_j) - f_k(a_i), \quad (3)$$

Em que $d_{ij}^{(k)}$ representa a diferença de desempenho entre as alternativas a_i e a_j no critério c_k . Valores positivos indicam preferência da alternativa a_i em relação à alternativa a_j .

As diferenças obtidas são transformadas em graus de preferência por meio de uma função de preferência. No trabalho foi adotada a função *V-shape criterion*, Eq. 4, recomendada para critérios quantitativos por representar uma preferência crescente de forma linear até um limiar de preferência p_k , a partir do qual a preferência passa a ser total (Brans e Vincke, 1985; Brans e Mareschal, 2005).

Na Eq. 4, $P_k(d_{ij}^{(k)})$ representa o grau de preferência associado ao critério c_k , d corresponde à diferença de desempenho entre as alternativas e p_k representa o limiar de preferência do critério, a partir do qual a preferência passa a ser considerada completa.

$$P_k(d_{ij}^{(k)}) = \begin{cases} 0, & \text{se } d_{ij}^{(k)} \leq 0 \\ \frac{d_{ij}^{(k)}}{p_k}, & \text{se } 0 < d_{ij}^{(k)} < p_k \\ 1, & \text{se } d_{ij}^{(k)} \geq p_k \end{cases} \quad (4)$$

Os graus de preferência são então ponderados pelos respectivos pesos:

$$\pi_{ij}^{(k)} = w_k \cdot P_k(d_{ij}^{(k)}) \quad (5)$$

e agregados para obtenção do índice global de preferência entre as alternativas:

$$\pi_{ij} = \sum_{k=1}^n \pi_{ij}^{(k)} \quad (6)$$

Por fim, calculam-se os fluxos positivo ϕ^+ , negativo ϕ^- e líquido ϕ , equações 7, 8 e 9, respectivamente:

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \pi_{ij} \quad (7)$$

$$\phi^-(a_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \pi_{ji} \quad (8)$$

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) - \phi^-(a_i) \quad (9)$$

Em que $\phi^+(a_i)$ representa o fluxo positivo da alternativa a_i , indicando sua capacidade de sobreclassificar as demais alternativas; $\phi^-(a_i)$ representa o fluxo negativo, indicando o grau em que a alternativa é sobreclassificada pelas demais; e ϕ representa o fluxo líquido, utilizado para estabelecer a classificação final das alternativas.

O ranking é obtido pela ordenação decrescente dos valores de fluxo líquido, sendo considerada mais bem classificada a alternativa que apresenta o maior valor de $\phi(a_i)$ (Brans e Vincke, 1985; Brans e Mareschal, 2005).

Aplicação do Método PROMETHEE II

A aplicação do método PROMETHEE II foi desenvolvida em quatro etapas: levantamento e tratamento dos dados, construção das matrizes de decisão, atribuição dos pesos aos critérios e obtenção dos rankings das tecnologias.

Inicialmente, foi realizado um levantamento bibliográfico em artigos científicos e relatórios técnicos, priorizando publicações recentes que apresentassem dados comparáveis para as tecnologias de armazenamento eletroquímico avaliadas: íons de lítio (Li-ion), sódio-enxofre (NaS), redox de vanádio (VRFB) e chumbo-ácido. Os valores utilizados nas matrizes de decisão foram obtidos a partir da consolidação das informações disponíveis na literatura especializada (IRENA, 2020, 2025a, 2025b; Bowen et al., 2021; Bulut e Özcan, 2021; Rahman et

al., 2021a, 2021b; Šimić et al., 2021; Chakraborty et al., 2022; Wang et al., 2022; Rostami et al., 2022; Fan et al., 2020; Rezk et al., 2025; Liu et al., 2025; Mahadevan et al., 2025).

Os dados coletados foram padronizados para garantir a comparabilidade entre as tecnologias. Foram realizadas conversões de unidades, incluindo a padronização da densidade de energia para Wh/L e dos indicadores econômicos para euros (€). Quando os estudos apresentavam intervalos de valores, adotou-se a média aritmética como valor representativo. Para os critérios qualitativos foi empregada uma escala ordinal de 1 a 5.

Após o tratamento dos dados, obteve-se um único valor representativo para cada critério e tecnologia, constituindo as matrizes de decisão apresentadas nas Tabelas 1 a 4.

Tabela 1. Valores escalares dos critérios de desempenho técnico.

Critério	Li-ion	NaS	VRFB	Pb-Ácido
Eficiência (%)	91,500	81,600	76,450	79,350
Vida útil (anos)	9,920	15,420	13,080	8,420
Ciclos de vida	4892,500	8000,000	11340,000	977,500
Taxa C	3,560	0,130	0,160	0,250
Autodescarga (%)	0,170	2,370	0,270	1,030
Densidade de potência (W/L)	5050,000	140,000	2,000	355,000
Densidade de energia (Wh/L)	651,500	222,000	26,350	130,000
Profundidade de descarga (%)	88,000	90,000	96,000	60,000
Segurança térmica	4,000	3,000	4,000	4,000

Tabela 2. Valores escalares dos critérios de desempenho econômico.

Critério	Li-ion	NaS	VRFB	Pb-Ácido
CAPEX (€/kWh)	1164,84	666,2	542,54	304,21
OPEX (€/kWh)	5,178	6,904	9,493	2,589
Custo de potência (€/kW)	2099,13	2066	1275,34	645,42

Tabela 3. Valores escalares dos critérios de sustentabilidade ambiental.

Critério	Li-ion	NaS	VRFB	Pb-Ácido
Dano à saúde humana	9,250	5,300	29,440	5,230
Disponibilidade de recursos	8,250	6,390	15,110	9,710
Reciclagem e disposição final	3,000	3,000	2,000	4,000
Razão líquida de energia (NER)	0,690	0,610	0,520	0,560
Emissões de GEE (kg CO ₂ eq/MWh)	624,960	740,000	800,190	750,000
Dano aos ecossistemas	5,750	2,080	4,540	1,150
Consumo de água (m ³)	0,001	0,002	0,003	0,002

Tabela 4. Valores escalares dos critérios de aspectos de aplicabilidade.

Critério	Li-ion	NaS	VRFB	Pb-Ácido
Maturidade tecnológica	3,500	3,000	2,500	5,000
Escalabilidade	4,000	4,000	4,000	3,000
Tempo de desenvolvimento (anos)	0,500	0,500	1,000	0,250
Área de implantação (m ² /kWh)	0,017	0,030	0,243	0,062



Definição da Orientação dos Critérios

Após a consolidação dos dados, cada critério foi classificado quanto à sua orientação de preferência, sendo definido como de maximização ou minimização, conforme o objetivo da avaliação. Essa classificação foi utilizada na construção das matrizes de decisão e na aplicação do método PROMETHEE II. A Tabela 5 apresenta a orientação adotada para todos os critérios.

Tabela 5. Orientação de preferência dos critérios de avaliação.

Categoria	Critério	Tipo
Desempenho Técnico	Eficiência	Max.
	Vida útil	Max.
	Ciclos de vida	Max.
	Taxa C	Max.
	Autodescarga	Min.
	Densidade de potência	Max.
	Densidade de energia	Max.
	Profundidade de descarga (DoD)	Max.
Desempenho Econômico	Segurança térmica	Max.
	CAPEX	Min.
	OPEX	Min.
	Custo de potência	Min.
Sustentabilidade Ambiental	Dano à saúde humana	Min.
	Disponibilidade de recursos	Min.
	Reciclagem e disposição final	Min.
	Razão Líquida de energia (NER)	Max.
	Emissões de GEE	Min.
	Dano aos ecossistemas	Min.
Aspectos de Aplicabilidade	Consumo de água	Min.
	Maturidade tecnológica	Max.
	Escalabilidade	Max.
	Tempo de desenvolvimento e construção	Min.
	Área de Implantação	Min.

Definição dos Pesos dos Critérios

A atribuição de pesos aos critérios representa uma etapa importante da análise multicritério, pois permite incorporar diferentes perspectivas sobre a importância relativa de cada indicador na avaliação das tecnologias. Como não existe um procedimento universal para definição dos pesos, foram empregados três métodos distintos de ponderação, com o objetivo de analisar a influência dessa escolha sobre os resultados obtidos pelo método PROMETHEE II.

O primeiro Método (M1) consiste na atribuição de pesos iguais, assumindo que todos os critérios de uma mesma categoria possuem a mesma importância no processo de decisão. Essa abordagem representa uma condição de neutralidade, na qual nenhum critério recebe priorização prévia, sendo frequentemente utilizada como referência para comparação com outros métodos de ponderação.

O segundo Método (M2) utiliza a frequência de ocorrência dos critérios na literatura como base para a atribuição dos pesos. No procedimento, critérios reportados em um maior número de referências científicas recebem maior importância relativa, sob a premissa de que sua recorrência reflete maior relevância na avaliação das tecnologias de armazenamento de energia.

O terceiro Método (M3) fundamenta-se na dispersão relativa dos dados, medida por meio do coeficiente de variação, onde critérios que apresentam maior variabilidade entre as tecnologias recebem pesos mais elevados, uma vez que possuem maior capacidade de discriminar as alternativas avaliadas. Em contrapartida, critérios cujos valores são semelhantes entre as tecnologias recebem menor influência no processo decisório.

Consolidação dos Rankings e Definição dos Cenários Estratégicos

Após a aplicação do método PROMETHEE II às quatro categorias de avaliação, foi adotada uma estrutura hierárquica para consolidar os resultados e reduzir a influência de um único método de atribuição de pesos.

Inicialmente, o método foi aplicado separadamente às categorias de desempenho técnico, desempenho econômico, sustentabilidade ambiental e aspectos de aplicabilidade, utilizando os três métodos de

ponderação (M1, M2 e M3), resultando em doze rankings parciais.

Os fluxos líquidos obtidos em cada categoria foram consolidados em quatro rankings representativos por meio da média aritmética dos resultados dos três métodos de ponderação (M1, M2 e M3). Esses valores médios foram utilizados na construção da Matriz de Fluxos Consolidados, na qual cada categoria passou a ser tratada como um critério de avaliação. Essa matriz serviu de base para uma segunda aplicação do PROMETHEE II. A estrutura metodológica adotada é apresentada na Figura 5.

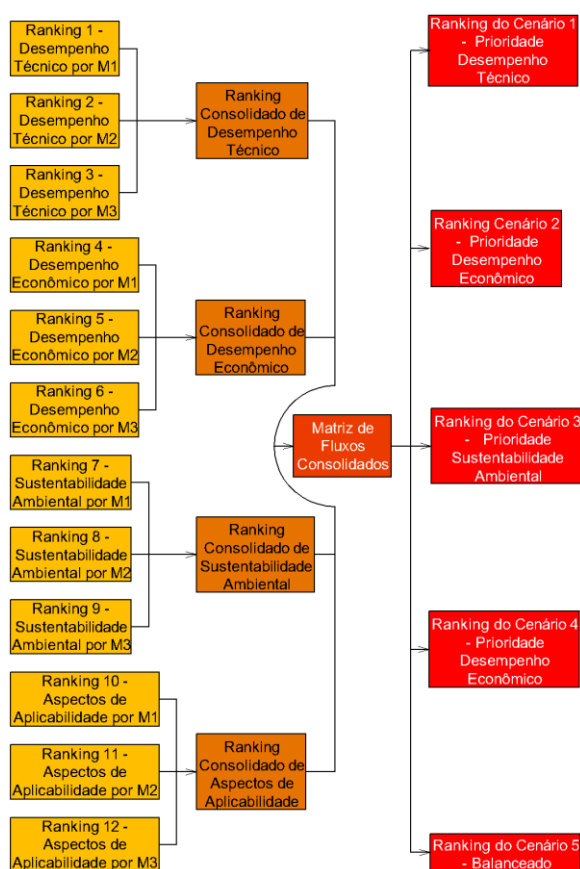


Figura 5. Estrutura hierárquica para consolidação dos rankings e definição dos cenários estratégicos.

Com base na Matriz de Fluxos Consolidados, foram definidos cinco cenários estratégicos para avaliar a influência das prioridades de decisão sobre o ranking das tecnologias. Nos quatro primeiros cenários, uma única categoria recebeu peso de 0,40, enquanto as demais receberam peso de 0,20, representando, respectivamente, prioridade ao desempenho técnico, ao desempenho econômico, à sustentabilidade ambiental e aos aspectos de aplicabilidade. O quinto cenário, denominado Balanceado, atribuiu peso igual (0,25) às quatro categorias, simulando uma condição

em que nenhuma dimensão é priorizada em relação às demais.

Para cada cenário, o PROMETHEE II foi reaplicado à Matriz de Fluxos Consolidados, gerando os rankings finais das tecnologias.

Todos os cálculos foram realizados em planilhas do Microsoft Excel, com fórmulas automatizadas para construção das matrizes, aplicação das funções de preferência, cálculo dos fluxos de sobreclassificação e obtenção dos rankings.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho Técnico

A Figura 6 apresenta o ranking consolidado das tecnologias considerando os critérios de desempenho técnico. A tecnologia Li-ion obteve o maior fluxo líquido (0,4528), seguida por VRFB (0,0005), NaS (-0,1620) e Chumbo-Ácido (-0,2913). A liderança da Li-ion foi mantida nos três métodos de ponderação, evidenciando elevada robustez dos resultados frente às diferentes estratégias de atribuição de pesos.

O desempenho superior da Li-ion está associado principalmente à elevada eficiência energética, alta densidade de energia, elevada densidade de potência e profundidade de descarga, características que proporcionaram desempenho consistente na maior parte dos critérios técnicos. A tecnologia VRFB ocupou a segunda posição em razão de sua elevada vida útil e número de ciclos, embora sua baixa densidade de energia tenha limitado sua competitividade. As tecnologias NaS e Chumbo-Ácido apresentaram os menores desempenhos técnicos, principalmente devido às limitações relacionadas à segurança operacional, vida útil e capacidade de armazenamento.

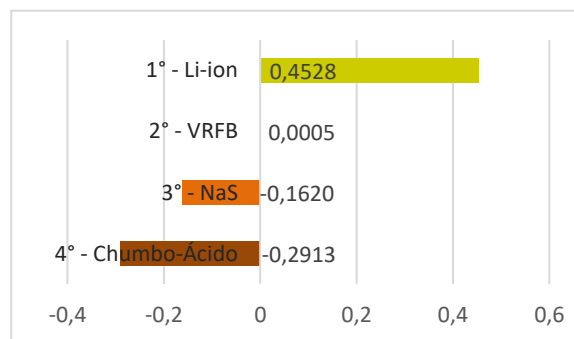


Figura 6. Ranking consolidado do desempenho técnico.

Desempenho Econômico

Os resultados consolidados da avaliação econômica são apresentados na Figura 7. A tecnologia Chumbo-Ácido apresentou o maior fluxo líquido (0,6707), seguida por VRFB (-0,0091), NaS (-0,2071) e Li-ion (-0,4545). Diferentemente da categoria técnica, a classificação permaneceu praticamente inalterada nos três métodos de ponderação, indicando baixa sensibilidade dos resultados à estratégia de atribuição de pesos.

O melhor desempenho da bateria Chumbo-Ácido decorre de seus menores custos de investimento e de potência instalada, aliados à ampla consolidação de sua cadeia produtiva. Em contrapartida, a Li-ion apresentou o menor desempenho econômico em função dos elevados valores de CAPEX identificados na literatura.

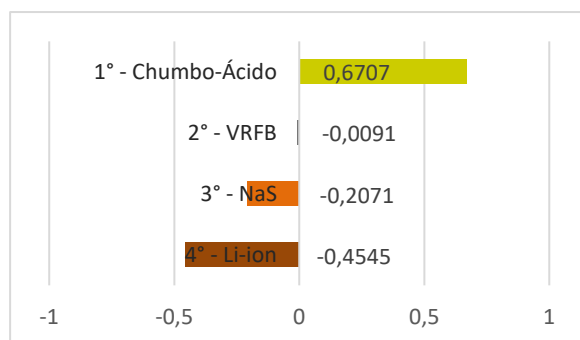


Figura 7. Ranking consolidado do desempenho econômico.

Sustentabilidade Ambiental

Na avaliação ambiental, a tecnologia Li-ion apresentou o maior fluxo líquido consolidado (0,2323), seguida por NaS (0,1808), Chumbo-Ácido (0,0752) e VRFB (-0,4883), conforme apresentado na Figura 8.

Diferentemente das demais categorias, esta apresentou maior sensibilidade ao método de ponderação. Enquanto os métodos M1 e M2 mantiveram a Li-ion na primeira posição, o método M3 promoveu a tecnologia NaS à liderança, evidenciando que critérios com maior capacidade discriminatória alteram parcialmente a classificação das alternativas. Ainda assim, a consolidação dos resultados confirmou a superioridade ambiental da tecnologia Li-ion.

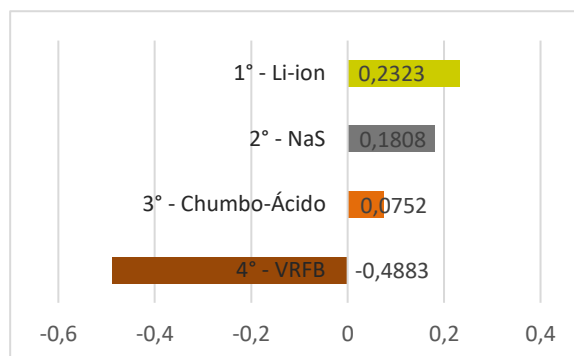


Figura 8. Ranking consolidado de sustentabilidade ambiental.

5.4 Aspectos de Aplicabilidade

Os resultados consolidados para os aspectos de aplicabilidade são apresentados na Figura 9. A tecnologia Li-ion obteve o maior fluxo líquido (0,2353), seguida por Chumbo-Ácido (0,2159), NaS (0,1421) e VRFB (-0,5933).

A proximidade entre os fluxos líquidos de Li-ion e Chumbo-Ácido indica que ambas apresentam elevada aplicabilidade prática. Entretanto, a liderança da Li-ion é explicada principalmente por sua elevada maturidade tecnológica, ampla disponibilidade comercial e elevada escalabilidade. A tecnologia Chumbo-Ácido também apresentou desempenho expressivo devido à sua consolidação industrial, enquanto a VRFB foi limitada pela menor maturidade comercial e maior complexidade de implantação.

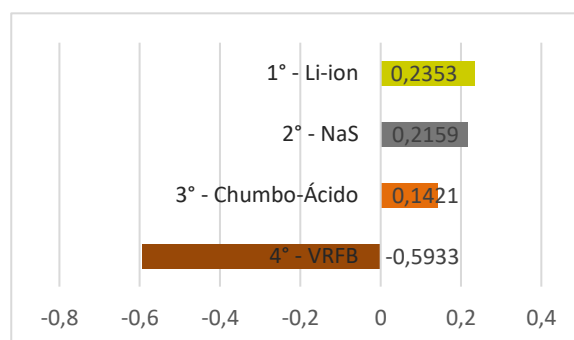


Figura 9. Ranking consolidado de aspectos de aplicabilidade.

De forma geral, os resultados demonstram que nenhuma tecnologia apresentou desempenho superior em todas as categorias avaliadas. A tecnologia Li-ion destacou-se nas dimensões técnica, ambiental e de aplicabilidade, enquanto a Chumbo-Ácido apresentou ampla vantagem sob a perspectiva econômica. Esses

resultados evidenciam a natureza multicritério do problema e justificam a consolidação das categorias em cenários estratégicos, apresentada na seção seguinte.

Matriz de Fluxos Consolidados

Os fluxos líquidos consolidados obtidos nas quatro categorias de avaliação foram organizados em uma nova matriz de decisão, Tabela 6, denominada Matriz de Fluxos Consolidados.

Cada categoria passou a representar um critério de avaliação, enquanto as tecnologias permaneceram como alternativas. Essa matriz serviu de base para a construção dos cenários estratégicos e para a obtenção dos rankings finais por meio de uma nova aplicação do método PROMETHEE II.

Tabela 6. Matriz de Fluxos Consolidados.

Categ.	Li-ion	NaS	VRFB	Pb-Ácido
Desemp. Tec.	0,4528	-0,1620	0,0005	-0,2913
Desemp. Eco.	-0,4545	-0,2071	-0,0091	0,6707
Sustent. Amb.	0,2323	0,1808	-0,4883	0,0752
Aspec. Apli.	0,2353	0,1421	-0,5933	0,2159

A matriz evidencia que nenhuma tecnologia apresentou desempenho superior em todas as categorias avaliadas. A tecnologia Li-ion destacou-se nas categorias de desempenho técnico, sustentabilidade ambiental e aspectos de aplicabilidade, enquanto a bateria Chumbo-Ácido apresentou ampla vantagem na dimensão econômica. Esse comportamento confirma a natureza multicritério do problema e demonstra que a tecnologia mais adequada depende da importância atribuída a cada categoria. Assim, foram definidos diferentes cenários estratégicos para avaliar a influência dessas prioridades sobre o ranking final.

Avaliação dos Cenários Estratégicos

A avaliação dos cenários estratégicos definidos na metodologia foi realizada por meio de uma nova aplicação do método PROMETHEE II à Matriz de Fluxos Consolidados.

Os resultados demonstraram elevada robustez da tecnologia Li-ion, que ocupou a primeira posição em quatro dos cinco cenários avaliados. Seus fluxos líquidos variaram de 0,2703, no cenário balanceado, a 0,3785, quando o desempenho técnico recebeu maior prioridade, evidenciando desempenho consistente independentemente da estratégia de ponderação

adotada. A única exceção ocorreu no cenário com prioridade ao desempenho econômico, no qual a tecnologia Chumbo-Ácido assumiu a liderança, com fluxo líquido de 0,3108, enquanto a Li-ion obteve 0,1085. Esse resultado reflete a vantagem da tecnologia Chumbo-Ácido em critérios relacionados aos custos de investimento (CAPEX), operação (OPEX) e potência instalada.

A tecnologia NaS apresentou desempenho intermediário em todos os cenários, mantendo a terceira colocação ao longo de toda a análise. Seus fluxos líquidos oscilaram entre -0,0475, no cenário com prioridade ao desempenho técnico, e 0,0724, quando a sustentabilidade ambiental recebeu maior peso, indicando um comportamento relativamente equilibrado, porém insuficiente para superar as tecnologias líderes.

A tecnologia VRFB permaneceu na última posição em todos os cenários estratégicos, apresentando fluxos líquidos sempre negativos, variando de -0,3735 a -0,5646. Esse comportamento está associado principalmente ao menor desempenho observado nas categorias de sustentabilidade ambiental e aspectos de aplicabilidade, que reduziram seu desempenho global mesmo diante de suas vantagens relacionadas à vida útil e à segurança operacional.

A Figura 10 apresenta a comparação dos fluxos líquidos obtidos pelas tecnologias nos cinco cenários estratégicos. Observa-se que as alterações na distribuição dos pesos provocaram apenas pequenas variações nos valores dos fluxos líquidos, sem modificar significativamente a classificação das alternativas. A predominância da tecnologia Li-ion evidencia seu desempenho global equilibrado, enquanto a liderança da tecnologia Chumbo-Ácido no cenário econômico demonstra que a tecnologia mais adequada depende das prioridades estabelecidas no processo decisório.

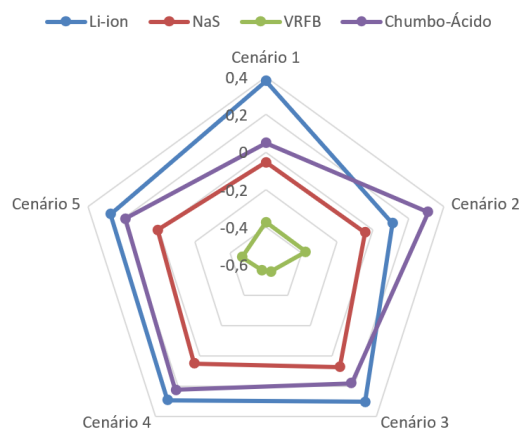


Figura 10. Comparação dos Fluxos Líquidos das Tecnologias nos Cinco Cenários Estratégicos.



CONCLUSÃO

Este trabalho aplicou o método multicritério PROMETHEE II para avaliar e classificar quatro tecnologias de armazenamento eletroquímico de energia (Li-ion, NaS, Chumbo-Ácido e VRFB), considerando critérios de desempenho técnico, desempenho econômico, sustentabilidade ambiental e aspectos de aplicabilidade. A utilização de diferentes métodos de atribuição de pesos e de cenários estratégicos permitiu analisar a influência das prioridades de decisão sobre a classificação das tecnologias.

Os resultados indicaram que a tecnologia Li-ion apresentou o melhor desempenho global, ocupando a primeira posição em quatro dos cinco cenários estratégicos avaliados. Esse desempenho está associado ao equilíbrio entre eficiência energética, densidade de energia, maturidade tecnológica e aplicabilidade. Por outro lado, a tecnologia Chumbo-Ácido destacou-se na dimensão econômica, assumindo a liderança quando os critérios de custo receberam maior prioridade. As tecnologias NaS e VRFB apresentaram desempenho intermediário e inferior, respectivamente, evidenciando vantagens específicas, mas também limitações que reduziram sua competitividade global.

A análise dos diferentes cenários demonstrou que a classificação das tecnologias depende das prioridades adotadas no processo decisório, reforçando a importância da abordagem multicritério na seleção de sistemas de armazenamento de energia.

O método PROMETHEE II mostrou-se adequado para integrar critérios quantitativos e qualitativos, permitindo comparar alternativas de forma estruturada e transparente.

Como limitações do estudo, destacam-se a dependência dos dados disponíveis na literatura e a influência da seleção dos critérios e dos métodos de ponderação sobre os resultados obtidos. Dessa forma, a inclusão de novas tecnologias, critérios ou bases de dados poderá modificar a classificação das alternativas.

Como trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de tecnologias emergentes, como baterias de estado sólido e sódio-íon, bem como a inclusão de critérios regulatórios, geopolíticos e relacionados à disponibilidade de matérias-primas críticas. Também se sugere a comparação do PROMETHEE II com outros métodos multicritério e o desenvolvimento de ferramentas computacionais que automatizem as etapas de avaliação e geração dos rankings.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e do CNPq, processos 309026/2022-9 e 406544/2023-9.

REFERÊNCIAS

BORTOLUZZI, M. et al. Combining Value-Focused Thinking and PROMETHEE Techniques for Selecting a Portfolio of Distributed Energy Generation Projects in the Brazilian Electricity Sector. *Sustainability*, v. 13, n. 19, p. 11091, 2021.

BOWEN, T. et al. *USAID Grid-Scale Energy Storage Technologies Primer*. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2021. DOI: 10.2172/1808490.

BRANS, J. P.; MARESCHAL, B. PROMETHEE methods. In: FIGUEIRA, J.; GRECO, S.; EHRGOTT, M. (org.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. Boston: Springer, 2005. p. 163–195.

BRANS, J. P.; VINCKE, P. A preference ranking organisation method: the PROMETHEE method for multiple criteria decision-making. *Management Science*, v. 31, n. 6, p. 647–656, 1985.

BULUT, M.; ÖZCAN, E. Integration of battery energy storage systems into natural gas combined cycle power plants in fuzzy environment. *Journal of Energy Storage*, v. 36, p. 102376, 2021.

CHAKRABORTY, M. R. et al. A comparative review on energy storage systems and their application in deregulated systems. *Batteries*, v. 8, n. 9, p. 124, 2022.

DUNN, B.; KAMATH, H.; TARASCON, J.-M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, v. 334, n. 6058, p. 928–935, 2011.

FAN, X. et al. Battery technologies for grid-level large-scale electrical energy storage. *Transactions of Tianjin University*, v. 26, n. 2, p. 92–103, 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. Paris: IEA, 2021a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. Paris: IEA, 2021b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Electricity 2024*. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Electricity Mid-Year Update 2025*. Paris: IEA, 2025.



Disponível em:
<https://www.iea.org/reports/electricity-mid-year-update-2025>. Acesso em: 22 jun. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Electricity Storage Valuation Framework*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_storage_valuation_2020.pdf. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *World Energy Transitions Outlook 2023*. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_summary_2023.pdf. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Sodium-ion Batteries: A Technology Brief*. Abu Dhabi: IRENA, 2025a. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Nov/IRENA_TEC_Sodium-ion_batteries_2025.pdf. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Energy Storage Cost-of-Service Tool 2.01*. Abu Dhabi: IRENA, 2025b. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_DAT_Cost-of-service_Tool_2025.pdf. Acesso em: 17 jun. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 17 jun. 2026.

LIAQAT, M. et al. Hybrid Multi-Criteria Decision Framework for Prosumers Energy Storage Systems in Smart Grids. *IEEE Access*, v. 12, 2024.

LIU, X. et al. Advancements in energy-storage technologies: a review of current developments and applications. *Sustainability*, v. 17, n. 18, p. 8316, 2025.

LUO, X. et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, v. 137, p. 511–536, 2015.

MAHADEVAN, V. et al. Critical review of energy storage systems: a comparative assessment of mechanisms, advantages, challenges, and integration with renewable energy. *Results in Engineering*, v. 26, p. 105589, 2025.

MANDAL, P. et al. Multicriteria Group Decision Making Based on TODIM and PROMETHEE II Approaches. *Mathematics*, v. 12, n. 23, p. 3790, 2024.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). *Raw Materials Critical for the Green Transition: Production, International Trade and Export Restrictions*. Paris: OECD Publishing, 2023. (OECD Trade Policy Papers, n. 269). Disponível em: https://www.oecd.org/en/publications/raw-materials-critical-for-the-green-transition_c6bb598b-en.html. Acesso em: 17 jun. 2026.

RAHMAN, M. M. et al. The development of techno-economic models for the assessment of utility-scale electro-chemical battery storage systems. *Applied Energy*, v. 283, p. 116343, 2021a.

RAHMAN, M. M. et al. The greenhouse gas emissions' footprint and net energy ratio of utility-scale electro-chemical energy storage systems. *Energy Conversion and Management*, v. 244, p. 114497, 2021b.

REZK, H. et al. Energy storage systems: comparisons, environmental impacts, selection criteria, and bibliometric analysis for large-scale applications. *Sustainable Horizons*, v. 16, p. 100162, 2025.

ROSTAMI, F. et al. Comparative sustainability study of energy storage technologies using data envelopment analysis. *Energy Storage Materials*, v. 48, p. 412–438, 2022.

SKYLLAS-KAZACOS, M.; RYCHCIK, M.; ROBINS, R. G.; FANE, A. G.; GREEN, M. A. New all-vanadium redox flow cell. *Journal of the Electrochemical Society*, v. 133, n. 5, p. 1057–1058, 1986.

ŠIMIĆ, Z. et al. Battery energy storage technologies overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, v. 12, n. 1, p. 53–65, 2021.

WANG, W. et al. Application of energy storage in integrated energy systems. *Journal of Energy Storage*, v. 52, Art. 104812, 2022.