



Programa  
Cátedras Brasil

Caderno 121

---

# Sumário Executivo

Otimização multiobjetivo da configuração de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas com sistema de armazenamento de energia: situação atual e possíveis alterações regulatórias

---

Autor  
Luiz Célio Souza Rocha

**Coleção:** *Regulação*  
■■■■■■■■■■□

---

# Sumário

## Executivo

---

Nas últimas décadas, o consumo de energia aumentou significativamente devido ao aumento da população mundial e do padrão de vida. Em 2018 foi registrado o crescimento mais rápido do consumo de energia nesta década, com um aumento de 2,3% da demanda de energia mundial. Por ser o principal vetor de energia disponível hoje, a energia elétrica representa grande parte desse aumento no consumo.

Entretanto, os combustíveis fósseis não podem ser considerados uma solução para atender à crescente demanda de energia devido aos seus efeitos negativos críticos sobre o meio ambiente. Assim, um dos principais impulsionadores da transformação do setor de energia elétrica é a necessidade de mudar para uma produção de eletricidade mais limpa e diversificada.

Essa diversificação das fontes de energia está estritamente relacionada à inserção de fontes de energia renováveis (FER) no setor de geração de eletricidade. Na última década, a parcela de eletricidade proveniente de fontes renováveis registrou um crescimento notável no mundo, principalmente de fontes eólica e solar.

Entretanto, a participação cada vez mais relevante de FER na matriz elétrica, sobretudo de energia eólica e solar, traz novos desafios

para os gestores das redes elétricas. A disponibilidade das FER é de natureza intermitente, ou seja, são não contínuas e, diferentemente das fontes tradicionais de produção elétrica, como as hidrelétricas e a geração térmica, fornecem energia de maneira variável e não-controlável para a rede.

No Brasil, assim como no resto do mundo, o crescimento da participação de FER na matriz energética e sua natureza intermitente faz com que a flexibilidade oferecida por recursos de armazenamento ganhe relevância, a tal ponto que a capacidade de armazenamento de energia poderá ser um importante recurso para atender aos crescentes requisitos de capacidade e flexibilidade do sistema.

Apesar do reconhecimento da importância do armazenamento para a gestão da rede elétrica, inexistente no Brasil regulamentação para sua implementação. De fato, a discussão sobre armazenamento no Brasil foi relegada a segundo plano, principalmente devido à grande capacidade hidrelétrica do país. Contudo, essa situação está prestes a mudar e as discussões acerca das adequações regulatórias necessárias à inserção de sistemas de armazenamento de energia (SAE's) no contexto brasileiro já se iniciaram.

Assim, o objetivo geral do presente estudo é propor um método de otimização para a configuração de projetos de usinas híbridas eólico-fotovoltaicas com SAE em baterias de íon-lítio de grande porte diante do possível impacto das adequações regulatórias necessárias à inserção de SAE's no contexto brasileiro. Para tanto, foi considerado um projeto de uma usina híbrida eólico-fotovoltaica com SAE, com capacidade instalada total de 60 MW, onde os percentuais da quantidade de fonte eólica, fonte solar e armazenamento no projeto são as variáveis de entrada ( $x_i$ ), e as variáveis de resposta ( $y_i$ ) custo nivelado de energia (LCOE), densidade de produção de energia diversificada e valor presente líquido (VPL), foram calculadas para cada configuração da usina, definida pelo arranjo experimental. Os objetivos a serem otimizados foram modelados pela técnica de arranjo de misturas com posterior otimização utilizando a abordagem de interseção normal à fronteira (NBI). A configuração final da planta híbrida foi alcançada pela utilização da medida de entropia de Shannon.

A cidade escolhida para análise no presente estudo foi Caetité na Bahia, local que possui aptidão para a produção tanto de energia eólica, pela característica de alta velocidade dos ventos, quanto de energia solar, pelo alto índice de irradiação. Com base nos custos de investimento, atual e ideal, do SAE em baterias de íon-lítio de grande porte e no nível de remuneração do SAE, atual e ideal, foram gerados 4 cenários de análise, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 1.

**Tabela 1 – Resultados consolidados**

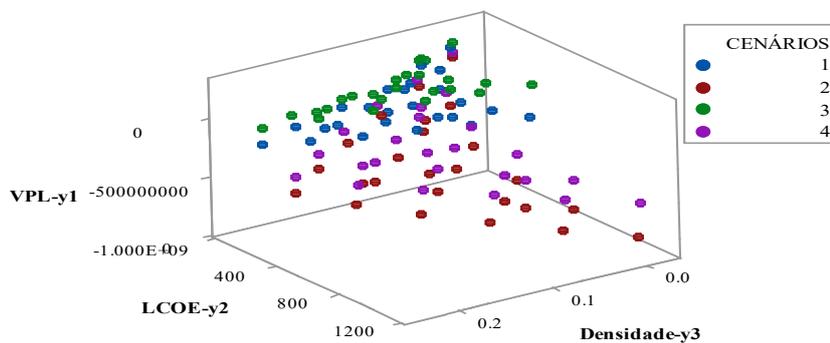
Cenários	Investimento SAE (R\$/MW)	Remuneração SAE (R\$/MWh)	VPL	LCOE	$\rho_e \Delta$	% Eólica ( $x_1$ )	% Solar ( $x_2$ )	% SAE ( $x_3$ )
1	2.000.000,00	0,00	0.00	165.41	0.067	0.304	0.327	0.369
2	8.000.000,00	0,00	0.00	163.30	0.044	0.448	0.374	0.177
3	2.000.000,00	380,12	0.00	341.38	0.050	0.021	0.074	0.905
4	8.000.000,00	380,12	0.00	187.21	0.047	0.406	0.355	0.239

Fonte: elaboração própria (2021).

No Cenário 3, que apresenta um menor custo de investimento e uma significativa remuneração ao serviço prestado pelo SAE, seria quase possível implementar um sistema autônomo de armazenamento designado somente para este fim, ou seja, sem estar conjugado com uma usina de geração de energia. Na situação atual, ou seja, Cenário 2, só seria possível implementar 17,7% da capacidade instalada, de 60 MW, em SAE. Entretanto, é preciso destacar que os preços de venda de energia eólica e solar considerados no presente estudo são os preços-teto do leilão, sendo que nesta situação, como já estaríamos no limite da viabilidade do projeto, não seria possível implementar qualquer deságio no preço da energia. Isto significa que um projeto deste só seria possível com um mecanismo de subsídio no preço da energia que compensasse o déficit econômico causado pelo SAE.

A Figura 1 apresenta as fronteiras de Pareto para os quatro cenários.

**Figura 1 – Fronteiras de Pareto para todos os cenários do estudo**



Fonte: elaboração própria (2021).

Percebe-se que, nos Cenários 2 e 4, onde se empregou um custo de investimento em SAE de R\$ 8.000.000,00, os pontos se mostram mais dispersos na fronteira Pareto-ótima com a maioria dos valores de VPL abaixo de zero, ou seja, inviáveis economicamente. Disto depreende-se que o custo de investimento em SAE, na faixa utilizada, impacta mais a viabilidade do projeto de geração de energia com SAE do que a própria remuneração pelo serviço prestado. Ao se comparar os Cenários 1, (investimento de R\$ 2.000.000,00 por MW instalado com remuneração pelo armazenamento de R\$ 0,00 por MWh) e 4 (investimento de R\$ 8.000.000,00 por MW instalado com remuneração pelo armazenamento de R\$ 380,12 por MWh), percebe-se que o Cenário 1 possui mais pontos Pareto-ótimos na área de viabilidade, o que gera maior flexibilidade para uma possível composição da usina híbrida eólico-fotovoltaica com SAE em bateria de íon-lítio de grande porte, em comparação ao Cenário 4. Além disso, apesar da solução final para o problema estar bem próxima nos dois cenários, o que é compreensível pelas restrições adotadas (máxima entropia e  $VPL = 0$ ), o Cenário 1 permitiria o emprego de uma maior proporção de SAE no projeto: 36,9% contra 23,9% do Cenário 4.

No contexto das adequações regulatórias, a respeito dos mecanismos de remuneração dos SAE's, deve-se buscar um arcabouço regulatório que reconheça o valor do armazenamento para o sistema elétrico, tecendo um mecanismo baseado em maximizar benefícios mais que minimizar custos, de modo que todos os benefícios proporcionados pelo SAE possam ser reconhecidos e compensados. O arcabouço regulatório deve prever se haverá um pagamento mínimo definido para os serviços prestados, a exemplo das políticas de *feed-in tariff* adotadas para incentivar a geração de energia por FER. Outro ponto que precisa de definição é a modalidade de contratação a ser adotada no mercado de armazenamento. Atualmente, a principal forma de contratação de energia no Brasil são os leilões no Ambiente de Contratação Regulada (ACR), utilizando-se o critério de menor tarifa. Entretanto, as estruturas convencionais de licitação podem ter que ser revistas para refletir as restrições operacionais dos recursos.

A possibilidade de aplicação dos SAE's em grande escala em diversos segmentos do mercado, traz à tona a necessidade de se criar a figura do agente armazenador de energia elétrica, fugindo da dicotomia clássica produzida pela classificação gerador/consumidor. Isso permitiria a geração de múltiplas receitas, evitaria a taxa dupla da atividade de armazenamento e permitiria a criação de regras claras para a ampla concorrência no mercado de armazenamento.

Uma maior granularidade temporal associada ao acesso irrestrito ao Ambiente de Contratação Livre (ACL) poderá viabilizar a criação de uma bolsa de valores

de energia no Brasil. Nesse sentido, os SAE's de grande porte poderão ser implementados visando trabalhar com a arbitragem de preços. Além da arbitragem de preços, no intuito de gerar múltiplas receitas para os SAE's em grande escala, faz-se necessária a criação de um mercado de capacidade, o que pode ser atendido com a implementação da proposta de separação entre lastro e energia no mercado brasileiro. Além disso, faz-se necessária uma reavaliação da forma de prestação dos serviços ancilares e de sua forma de remuneração.

No contexto atual, seria possível a criação de um mercado de serviços ancilares, com serviços de resposta rápida e serviços de rampa rápida, que poderiam ser atendidos especificamente por tecnologias mais modernas, como as baterias de íon-lítio. Nas últimas décadas, as baterias de íon-lítio tornaram-se a tecnologia dominante para o armazenamento de energia em larga escala, tendo seu custo sido reduzido de maneira acentuada e sua performance tecnológica alcançado níveis satisfatórios. Como vantagens das baterias podem-se citar a maior eficiência, o menor tempo de descarga e a versatilidade, pois permite mobilidade, possui construção mais rápida e fácil, e é facilmente dimensionável.

No presente estudo foi claramente demonstrado que o custo de investimento tem um impacto fundamental para a viabilidade econômica de projetos híbridos eólico-fotovoltaicos com SAE's em baterias de larga escala. Nesse contexto, um ponto negligenciado na nascente literatura sobre armazenamento no Brasil e que poderia ser objeto das discussões acerca das adequações regulatórias, seriam as políticas industriais para o desenvolvimento da cadeia produtiva que envolva o armazenamento de energia. Outra possibilidade seria a criação de incentivos fiscais para a importação de equipamentos, visando baratear seu custo.

Por fim, conforme demonstrado no presente estudo, os SAE's apresentam balanço energético total negativo, o que implica em aumento de carga para o sistema como um todo. Essa característica precisa ser considerada ao se elaborar um planejamento de longo prazo visando a criação de um mercado de armazenamento de eletricidade no Brasil.



**Clique aqui** para baixar  
o **Sumário Executivo** separado.  
Compartilhe!