

ANÁLISE DO PONTO DE EQUILÍBRIO ECONÔMICO PARA SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM PARQUES EÓLICOS NO MERCADO LIVRE DE ENERGIA

André Mota Pinheiro¹

¹Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Brasil (andre.mpinheiro@yahoo.com)

Resumo: Avalia-se a viabilidade técnico-econômica da integração de BESS a parques eólicos no ACL brasileiro para mitigar perdas por constrained-off. Foi desenvolvido um modelo MILP em Pyomo para despacho ótimo anual com revenue stacking e, a partir dos resultados, um módulo financeiro para cálculo de VPL, TIR e payback. Os cenários simulados indicaram viabilidade econômica e folga em relação à condição de equilíbrio $VPL = 0$.

Palavras-chave: Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias; Geração eólica; Constrained-off; Ambiente de Contratação Livre; Viabilidade econômico-financeira

INTRODUÇÃO

A expansão da geração eólica no Brasil elevou a relevância das restrições operativas de escoamento, especialmente em ambientes de contratação livre, nos quais cortes por constrained-off podem reduzir de forma significativa a receita dos geradores. Nesse contexto, sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS) surgem como alternativa para absorver energia não escoada, deslocar a injeção para períodos economicamente mais favoráveis e ampliar a flexibilidade operacional do ativo. O trabalho analisa a integração de BESS a parques eólicos no ACL brasileiro com foco na otimização do despacho e na avaliação do ponto de equilíbrio econômico do investimento. O objetivo foi avaliar a viabilidade técnico-econômica dessa integração, considerando simultaneamente desempenho operacional e indicadores financeiros do projeto.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi desenvolvido um modelo de Programação Linear Inteira Mista (MILP), implementado em Python com a biblioteca Pyomo, para simular o despacho horário do BESS acoplado à usina eólica ao longo de 8.760 horas. A formulação considerou a estratégia de revenue stacking, contemplando cumprimento de PPA, liquidação de excedentes e déficits ao PLD, prestação de serviços ancilares e recuperação parcial da energia vertida. Em etapa complementar, os resultados operacionais foram convertidos em fluxo de caixa anual para cálculo de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), payback simples e payback descontado, permitindo interpretar a condição de equilíbrio econômico definida por $VPL = 0$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados mostraram que o BESS atua como ativo de flexibilidade, reduzindo perdas associadas ao constrained-off e criando novas oportunidades de receita por arbitragem, reserva e aproveitamento de energia antes vertida. Nos três cenários de fator de contratação de PPA avaliados, os indicadores permaneceram positivos e robustos. O lucro líquido anual variou de R\$ 93,36 milhões a R\$ 111,59 milhões, enquanto o VPL oscilou entre R\$ 358,45 milhões e R\$ 457,93 milhões. A TIR variou de 67,41% a 82,40%, e os paybacks simples e descontado permaneceram em dois anos, indicando forte atratividade econômica nas premissas adotadas.

A análise evidencia que a atratividade do investimento não depende de um único benefício isolado, mas da combinação entre despacho ótimo, diversificação de receitas e internalização dos custos do projeto. Além disso, a sensibilidade em função do fator de contratação de PPA e do CAPEX mostrou que o aumento da contratação eleva lucro, VPL e TIR, enquanto o projeto permanece afastado da fronteira de inviabilidade. Esses resultados reforçam o papel do BESS como instrumento de mitigação de risco operacional e de geração de valor econômico em parques eólicos sujeitos a restrições recorrentes de escoamento.

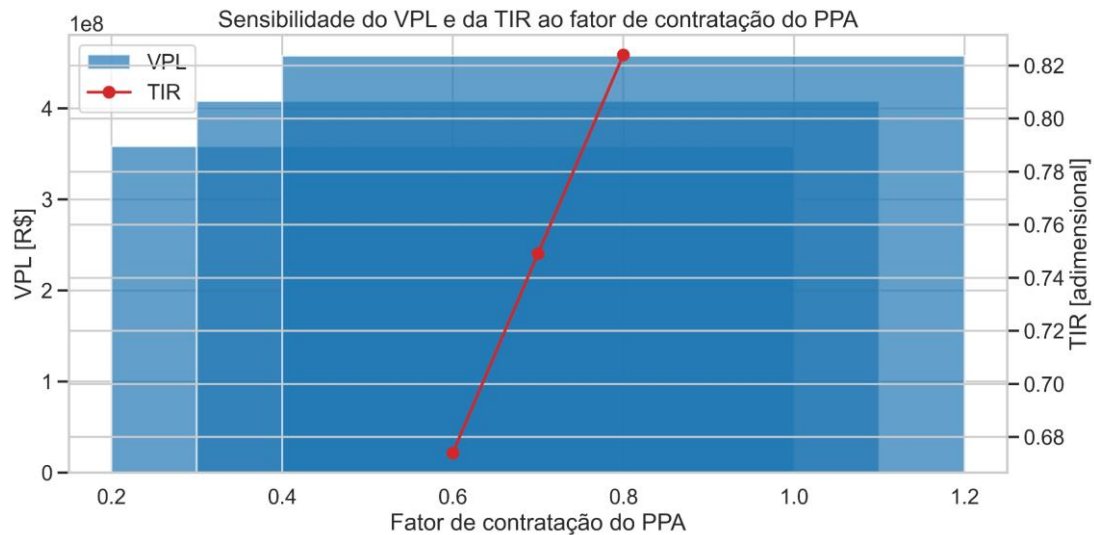


Figura 1. Análise de sensibilidade do Valor Presente Líquido (VPL) em função do fator de contratação de PPA e do CAPEX unitário.

Tabela 1. Indicadores econômico-financeiros por fator de contratação do PPA.

Fator de contratação do PPA	Lucro líquido anual (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)	Payback simples (anos)	Payback descontado (anos)
0,60	93.360.980,34	376.864.968,84	69,94	2	2
0,70	102.473.033,68	426.608.085,20	77,44	2	2
0,80	111.585.087,01	476.351.201,56	84,92	2	2

Os valores da Tabela 1 evidenciam crescimento progressivo do lucro líquido anual, do VPL e da TIR à medida que o fator de contratação de PPA aumenta de 0,60 para 0,80, enquanto os indicadores de payback permanecem constantes em dois anos. Em conjunto, os resultados operacionais e financeiros mostram que o investimento permanece economicamente atrativo e com folga em relação à condição $VPL = 0$ nas premissas analisadas.

CONCLUSÃO

Conclui-se que a implantação de BESS em parques eólicos no ACL brasileiro, sob as hipóteses adotadas, é tecnicamente pertinente e economicamente consistente. A ferramenta desenvolvida contribui para aproximar a modelagem acadêmica dos critérios práticos de decisão de investimento ao explicitar a folga dos cenários simulados em relação à condição formal de equilíbrio econômico.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pelo suporte institucional ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Baterias e sistemas de armazenamento de energia: panorama regulatório e aplicações. Brasília: EPE, 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Dados e informes operacionais sobre restrições de escoamento e geração frustrada. Rio de Janeiro: ONS, 2025.

SANTOS, A.; ROCHA, E. P. Integração de armazenamento em baterias e fontes renováveis: aspectos operacionais e econômicos. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 2, p. 45-63, 2024.