

Armazenamento de Energia para Maior Aproveitamento da Margem de Transmissão

Camila de Oliveira Dias
MAB Engenharia
Uberaba, Brasil
camila.dias@mab-engenharia.com

Guilherme Borges de Andrade
MAB Engenharia
Uberaba, Brasil
guilherme.andrade@mab-engenharia.com

Pedro Henrique Roesler
MAB Engenharia
Curitiba, Brasil
pedro.roesler@mab-engenharia.com

Pedro Augustho Biasuz Block
MAB Engenharia
São Paulo, Brasil
pedro.block@mab-engenharia.com

Arthur Fernando Bonelli
MAB Engenharia
Ribeirão Preto, Brasil
arthur.bonelli@mab-engenharia.com

Resumo - A transição energética depende da expansão da geração renovável, mas desafios como restrições de transmissão podem limitar seu crescimento. Este estudo investiga o uso de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) para otimizar a injeção de energia e acomodar usinas renováveis maiores sem exceder as margens de transmissão. Dois estudos de caso são conduzidos para o barramento da SE Irecê 230 kV (BA): um considerando uma margem constante de 125 MW do Operador Nacional do Sistema (ONS) e outro com uma margem dinâmica que varia entre dia e noite, definida de acordo com cenários críticos do ONS. Ambos analisam a integração de usinas fotovoltaicas, eólicas e híbridas, todas acopladas ao BESS, para avaliar se o armazenamento permite maior injeção de energia respeitando os limites operacionais. A análise considera a curva de geração máxima média diária e garante um ciclo completo de carga-descarga no mesmo dia. Os resultados indicam que o BESS pode aprimorar a integração renovável, melhorando a flexibilidade e a eficiência do sistema, especialmente para geração fotovoltaica.

Palavras-Chave – Baterias, Eólica, Energia, Fluxo de Potência, Fotovoltaica.

I. INTRODUÇÃO

É inquestionável que a expansão da geração de energia renovável desempenha um papel crucial na transição para uma matriz energética mais sustentável em todo o mundo. Atualmente, a capacidade instalada brasileira é composta em sua maioria por fontes hidrelétricas, que representam 46,3% do total, seguida por 15,5% de micro e minigeração distribuída, na sequência a energia eólica com 14,2% e a solar representando 7,3% [1]. Embora a geração eólica tenha apresentado um crescimento expressivo até 2023, desde o ano passado, o setor tem enfrentado uma desaceleração no ritmo de expansão devido a uma conjuntura desfavorável. Entretanto, a demanda por energia tende a crescer nos próximos anos, impulsionada pela construção de *data centers* e pela indústria de hidrogênio verde, o que pode criar um cenário mais favorável para a energia renovável.

Esse cenário não é o único desafio enfrentado pela geração eólica no Brasil. A infraestrutura de transmissão ainda apresenta limitações significativas que dificultam o aproveitamento pleno do potencial dessa fonte de energia. A principal dificuldade está na localização das usinas eólicas, que estão concentradas no Nordeste, enquanto o maior consumo de energia se encontra no subsistema Sudeste/Centro-Oeste. Esse descompasso geográfico gera

problemas no escoamento da energia gerada, sobrecarregando as linhas de transmissão e limitando a capacidade de inserção de novas usinas no sistema.

Neste contexto, os sistemas de armazenamento de energia em baterias (BESS, do inglês *Battery Energy Storage Systems*) podem se configurar como uma solução estratégica, particularmente para lidar com a intermitência característica da geração eólica ou solar. Ao armazenar energia durante períodos de alta produção ou baixa demanda, os BESS permitem a liberação controlada dessa energia quando a demanda é maior, ajudando a otimizar o escoamento e melhorando a flexibilidade da rede. Além disso, os BESS têm o potencial de mitigar sobrecargas em transformadores e outros pontos críticos da rede, facilitando a conexão de novas usinas e melhorando a eficiência no uso da capacidade de transmissão disponível.

O objetivo deste trabalho é realizar um estudo de caso que avalie como a implementação de BESS pode aumentar a margem de transmissão e viabilizar a inserção de mais energia renovável por meio da combinação de fontes eólica, fotovoltaica e híbrida com sistemas de armazenamento. Assim como analisar a possibilidade de se adotar uma margem de escoamento dinâmica ao longo da operação diária. O ponto de conexão analisado será o barramento da Subestação Irecê (BA) com tensão nominal de 230 kV; potência instalada de geração renovável em 303 MW [2] e margem remanescente de 125 MW para 2030 [3].

II. DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE TRANSMISSÃO

Nas análises realizadas são consideradas as margens de geração remanescentes dos barramentos do SIN definidas pelo ONS, podendo elas serem visualizadas em [3]. Além disso, na referência mencionada estão indicados os pontos críticos, ou limitantes, que proporcionam cada uma das margens remanescentes, indicando também o cenário em que o ponto crítico ocorre. Para entender como foram definidas as referidas margens, o operador do sistema disponibiliza a nota técnica e os arquivos de simulação (cenários) no formato ANAREDE em [4].

Para os barramentos presentes na região Norte e Nordeste, os três cenários estabelecidos para a análise de margem são: Nordeste exportador máximo diurno (Cenário 1); Nordeste exportador mínimo noturno (Cenário 2); Norte exportador

máximo diurno (Cenário 3). Referente às definições consideradas nos cenários, quando no cenário é considerado o Nordeste exportando, significa que a geração das centrais presentes na região nordeste está sendo priorizada. Já quando no cenário é considerado o Norte exportando, significa que as centrais hidrelétricas da região Norte são consideradas com o despacho elevado. Referente aos níveis de carga considerados nos cenários, quando no cenário é considerado carga máxima diurna, significa que é aplicado a maior carga global entre as 7h e as 18h, considerando dia útil [5]. Por outro lado, quando no cenário é considerado carga mínima noturna significa que é aplicado a maior carga global de dois intervalos de horários, entre a 1h e as 6h e entre as 19h e as 24h, considerando dia útil [6].

Dessa forma, as aplicações do BESS serão analisadas considerando os arquivos de simulação utilizados para a definição das margens remanescentes das barras presentes na região Norte e Nordeste, como também o valor das margens disponibilizadas em [3]. Importante mencionar que no procedimento de acesso de novas centrais geradoras na região Nordeste, o agente deve utilizar os mesmos três cenários utilizados na análise de margem, no entanto, ajustando esses cenários conforme estabelecido em [6].

Sabendo o ponto crítico que limita o aumento de margem em uma determinada barra, o cenário que o ponto crítico ocorre e sabendo a faixa de horários que cada um dos cenários se refere, propõem-se uma operação de carga do BESS no cenário crítico e uma operação de descarga no cenário que representa o horário complementar ao representado pelo cenário crítico. A ideia dessa operação é utilizar a carga do BESS para aliviar trechos sobrecarregados no cenário crítico, proporcionando um aumento da margem. Para completar o ciclo de carga e descarga do equipamento, a descarga do BESS precisa ser analisada em um cenário que compreende a faixa de horários oposta ao cenário crítico. Se as margens dos cenários forem iguais é dito que a análise da operação diária, no contexto da operação do BESS proposta, é feita considerando uma margem constante, ou seja, tem um valor constante nas 24 horas do dia. Por outro lado, se as margens dos cenários forem diferentes é dito que a análise da operação diária é feita considerando uma margem dinâmica, ou seja, tem dois valores diferentes durante o dia. Tanto a aplicação da margem constante quanto a aplicação da margem dinâmica são analisados no caso estudado.

Para determinar a potência de carga, a potência de descarga e a capacidade energética do BESS é necessário analisar as curvas de geração na barra analisada ou nas proximidades. Considerando uma abordagem conservadora, propõem-se no dimensionamento do BESS a utilização do valor máximo gerado em cada hora do dia, obtendo como resultando uma curva de geração diária para fontes solares e outra para fontes eólicas. Os dados de geração utilizados nas aplicações do BESS foram obtidos em [7], sendo ela uma base de dados aberta disponibilizada pelo ONS.

III. CASO I: INSERÇÃO DE GERAÇÃO RENOVÁVEL COM MARGEM DE TRANSMISSÃO CONSTANTE

Considerou-se a inserção de uma usina geradora de 155 MW, à qual está conectado um BESS com potência nominal de 30 MW e autonomia de 7 horas, conferindo ao BESS uma capacidade nominal de 210 MWh. Estabeleceu-se que a profundidade de descarga seria de 80%, mantendo-se um

estado de carga (SOC, do inglês *state of charge*) mínimo de 20%.

Para análise, foi considerada a curva diária máxima de geração de energia e a margem constante de 125 MW.

A. Fotovoltaica + BESS

A Fig. 1 apresenta a curva média diária para a máxima geração de energia fotovoltaica do parque considerado. Bem como, a curva de geração resultante com a inserção do BESS. Para essa configuração, toda a energia gerada é transmitida, uma vez que a geração ultrapassaria a margem entre o período das 9h às 16h. Contudo, é viável carregar o BESS durante esse período e descarregá-lo à noite, quando a geração é nula, como pode ser observado na Fig. 2. Assim, mesmo com a limitação da capacidade de transmissão de 125 MW, com a associação do BESS, seria possível instalar uma usina fotovoltaica de 155 MW.

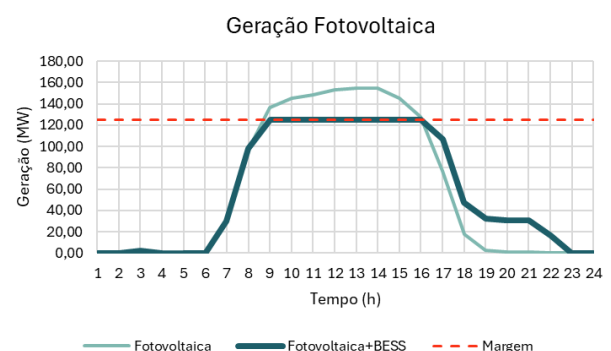


Fig. 1. Inserção de geração fotovoltaica com margem constante.

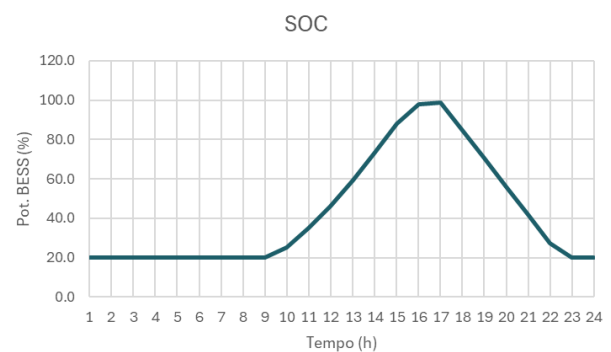


Fig. 2. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração fotovoltaica com margem constante.

B. Eólica + BESS

Da mesma forma que foi realizado para a geração solar, avaliou-se a curva de geração de um parque eólico, tanto com quanto sem o BESS. Os resultados, juntamente com a margem, estão apresentados na Fig. 3.

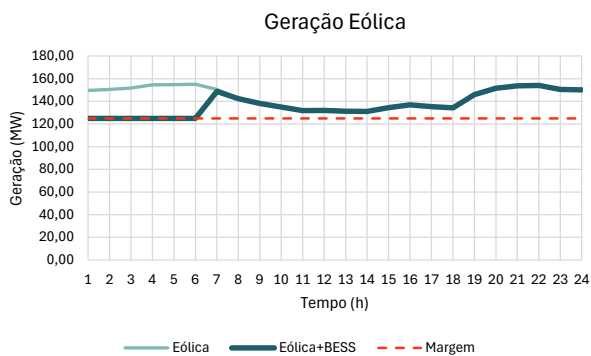


Fig. 3. Inserção de geração eólica com margem constante.

Observa-se que, para as configurações adotadas, a estratégia não se mostra vantajosa. Embora o BESS seja carregado entre uma e seis da manhã, mantendo a geração dentro da margem nesse período, não há outro momento ao longo das 24 horas em que seja possível descarregá-lo na rede sem exceder a margem, uma vez que a geração já é superior à margem durante o restante do dia. De forma que após carregado, não há variação no seu estado de carga, conforme pode ser observado na Fig. 4.

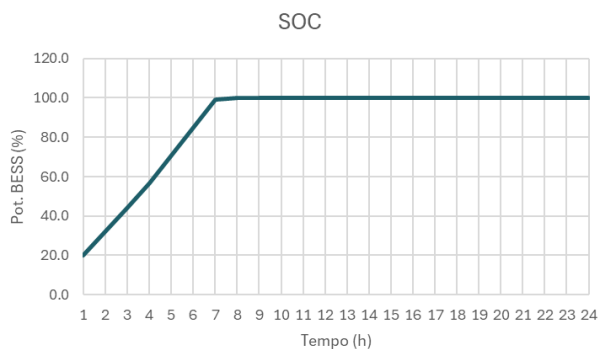


Fig. 4. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração eólica com margem constante.

Considerando que os processos de carga e descarga das baterias ocorrem no mesmo dia, a potência máxima que pode ser injetada pelo parque sem exceder a margem é de 127 MW. Acima desse valor, parte da energia é armazenada no BESS, conforme apresentado na Tabela I. Na qual P_UG representa a potência do parque a ser instalado, energia transmitida é a porcentagem da energia gerada que é injetada na rede, energia armazenada é o percentual de energia que foi armazenado no BESS que não pôde ser injetado na rede devido à restrição de margem e energia perdida é a porcentagem de energia que não seria utilizada nem para o carregamento do BESS, nem para injeção na rede.

TABELA I. DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA EÓLICA PARA MARGEM CONSTANTE

P_UG (MW)	Energia Transmitida (%)	Energia Armazenada (%)	Energia Perdida (%)
127	100,00	0,00	0,00
130	99,58	0,42	0,00
135	98,71	1,29	0,00
140	96,13	3,87	0,00
145	92,81	5,20	1,99

C. Híbrida + BESS

Além das análises conduzidas para geração fotovoltaica e eólica de forma isolada, também foi considerada a inserção de uma usina híbrida de 155 MW, composta por 75% de geração eólica e 25% de geração fotovoltaica. As curvas resultantes dessa configuração são apresentadas na Fig. 5.

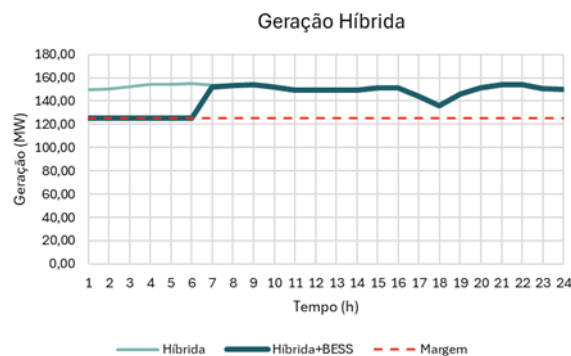


Fig. 5. Inserção de geração híbrida com margem constante.

De forma semelhante ao observado na geração eólica, o carregamento do BESS ocorre para manter a geração dentro da margem no início do período. No entanto, como a geração permanece acima da margem durante todo o intervalo analisado, não é possível realizar a descarga do BESS, conforme ilustrado na Fig. 6.

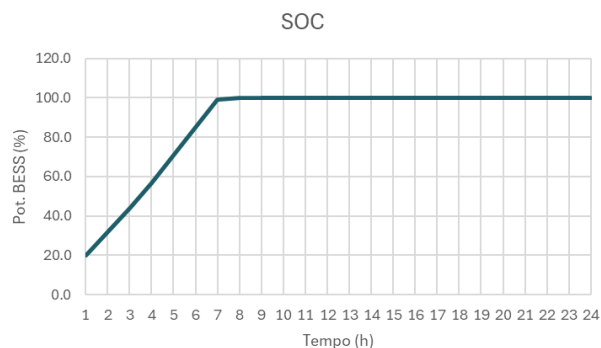


Fig. 6. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração híbrida com margem constante.

Considerando que os processos de carga e descarga devem ocorrer no mesmo dia, a potência máxima injetada na rede sem

ultrapassar a margem também é de 127 MW, assim como para a geração eólica. O que faz sentido, tendo em vista que no início do período, não há geração fotovoltaica e o processo de carga acontece nesse momento. Para geração acima desse valor, não é possível injetar toda a energia na rede, de acordo com a Tabela II.

TABELA II. DISTRIBUIÇÃO DE GERAÇÃO HÍBRIDA PARA MARGEM CONSTANTE

P_UG (MW)	Energia Transmitida (%)	Energia Armazenada (%)	Energia Perdida (%)
127	100,00	0,00	0,00
130	98,92	1,08	0,00
135	95,26	4,74	0,00
140	91,86	5,14	3,00
145	88,69	4,97	6,34

IV. CASO II: INSERÇÃO DE GERAÇÃO RENOVÁVEL COM MARGEM DE TRANSMISSÃO DINÂMICA

Para análise, foi considerada a curva média diária de máxima de geração de energia, assim como no caso anterior. Entretanto, para o caso II, é utilizada uma proposição de margem de transmissão dinâmica, definida neste artigo como aquela que varia conforme o horário. Durante o dia, a margem é limitada pelo Cenário 1, com um limite de 125 MW, enquanto à noite é ajustada conforme o Cenário 2, com limite de 165 MW. Em todos os casos, foi utilizado um BESS de 30 MW.

A. Fotovoltaica + BESS

Considerando a geradora com a mesma potência do estudo anterior, 155 MW, como esperado, a transmissão da energia gerada pela fotovoltaica é beneficiada pela inclusão do BESS, tendo em vista que, devido à característica horária de geração, é possível armazenar energia no período de máxima geração, mantendo a mesma dentro da margem requisitada e injetar na rede essa energia armazenada no período noturno, como mostrado nas figuras 7 e 8.

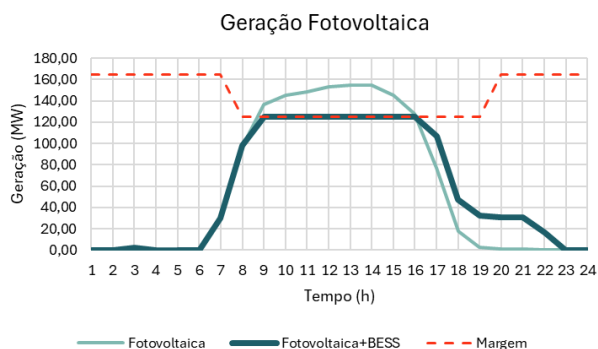


Fig. 7. Inserção de geração fotovoltaica com margem dinâmica.

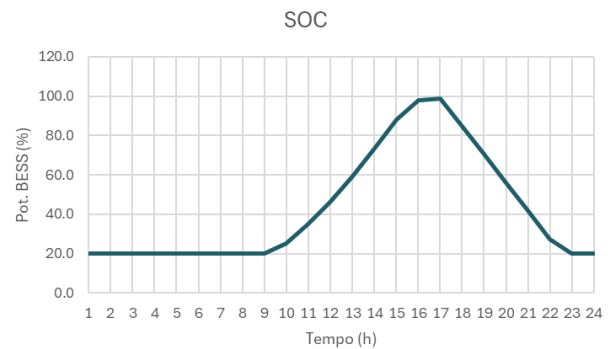


Fig. 8. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração fotovoltaica com margem dinâmica.

B. Eólica + BESS

Na Fig. 9 são apresentadas as curvas de geração eólica para um complexo de 155 MW, da combinação da geração com o BESS e a margem dinâmica.

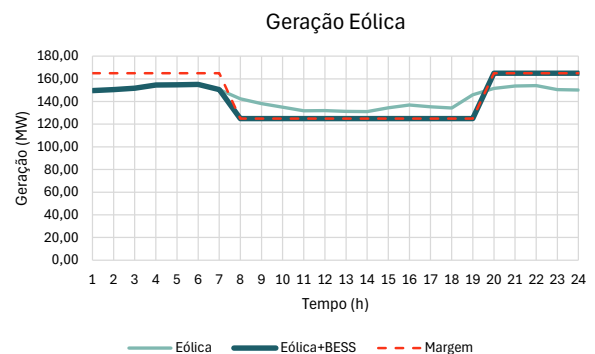


Fig. 9. Inserção de geração eólica com potência nominal de 155 MW e margem dinâmica.

Neste caso, apesar de a margem ser ampliada no período noturno, não há tempo suficiente para a descarga completa da bateria no mesmo dia, conforme ilustrado na Fig. 10, pois a maior geração eólica também ocorre durante a noite.

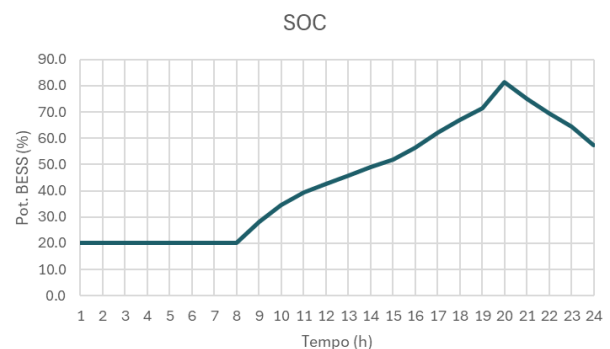


Fig. 10. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração híbrida com margem dinâmica.

Fazendo a mesma análise da Tabela I, tem-se que, com a margem dinâmica, é possível instalar um parque eólico com potência 150 MW transmitindo 100% da energia gerada, conforme a Tabela III.

TABELA III. DISTRIBUIÇÃO DE GERAÇÃO EÓLICA PARA MARGEM DINÂMICA

P_UG (MW)	Energia Transmitida (%)	Energia Armazenada (%)	Energia Perdida (%)
135	100,00	0,00	0,00
140	100,00	0,00	0,00
145	100,00	0,00	0,00
150	100,00	0,00	0,00
155	98,16	1,84	0,00
160	96,06	3,57	0,37

A Fig. 11 mostra como ficaria a curva de geração caso essa fosse a estratégia adotada.

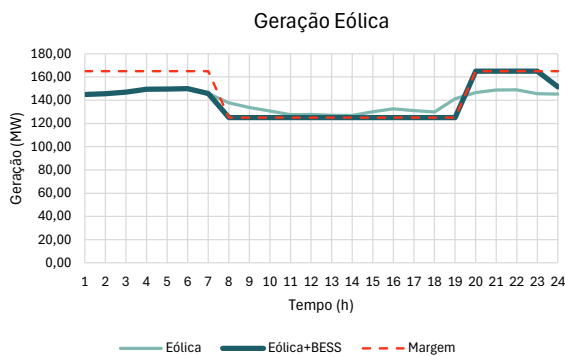


Fig. 11. Inserção de geração eólica com potência nominal de 150 MW e margem dinâmica.

É possível observar que, durante o período com margem menor, a geração eólica a ultrapassa, mas como há o carregamento do BESS, o limite não é transgredido. Essa energia armazenada é transmitida posteriormente, durante o período de margem maior, descarregando o BESS conforme a Fig. 12.

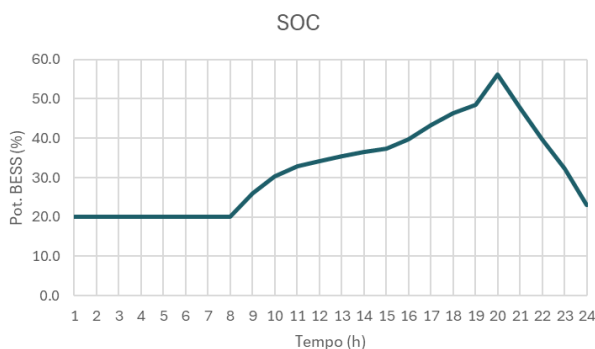


Fig. 12. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração eólica com margem dinâmica.

C. Híbrida + BESS

A geração híbrida de 155 MW também foi analisada. A Fig. 13 demonstra que a inserção do BESS de 30MW não é suficiente para transmitir toda a energia produzida ao longo do dia sem ultrapassar o limite de 125 MW.

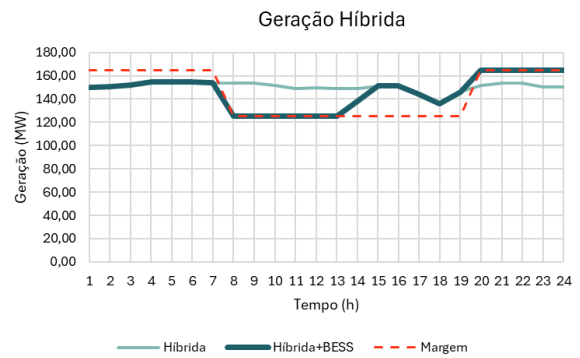


Fig. 13. Inserção de geração híbrida com potência nominal de 155 MW e margem dinâmica.

Nesse caso, o BESS atinge a carga máxima antes do fim do período de margem de 125 MW e não tem tempo suficiente para descarregar completamente no mesmo dia, não completando o ciclo de carga e descarga, como mostrado na Fig. 14

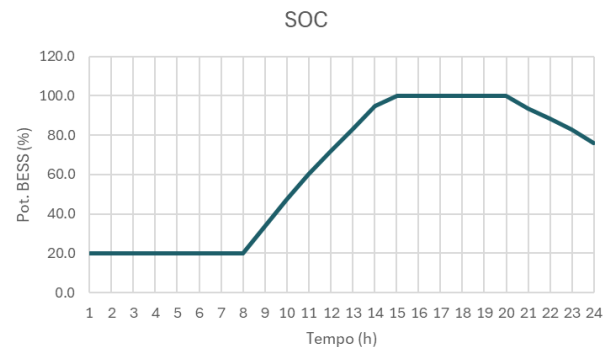


Fig. 14. Variação do estado de carga do BESS ao longo de um dia para geração híbrida com margem dinâmica.

Para a mesma configuração de BESS, 140 MW é a maior potência que pode ser instalada para o complexo de forma a garantir que toda a energia seja transmitida, como pode ser visto na Tabela IV.

TABELA IV. DISTRIBUIÇÃO DE GERAÇÃO HÍBRIDA PARA MARGEM DINÂMICA

P_UG (MW)	Energia Transmitida (%)	Energia Armazenada (%)	Energia Perdida (%)
135	100,00	0,00	0,00
140	100,00	0,00	0,00
145	98,34	1,59	0,07
150	96,05	2,24	1,71
155	93,90	2,85	3,25
160	91,89	3,41	4,69

Para o complexo de 140 MW e o BESS de 30 MW, a geração se mantém dentro da margem estabelecida durante todo o período, de acordo com a Fig. 15.

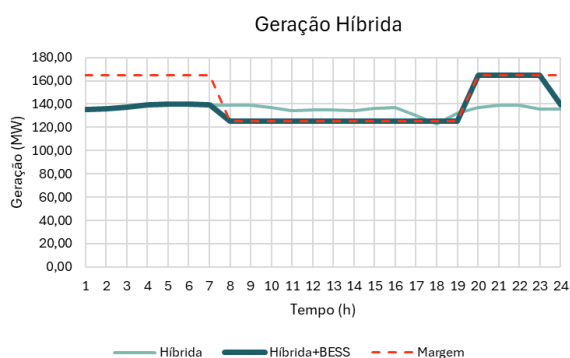


Fig. 15. Inserção de geração híbrida com potência nominal de 140 MW e margem dinâmica.

Dentre todas as configurações analisadas, mantendo a potência do BESS constante, observou-se que sua integração com a geração fotovoltaica proporciona um melhor aproveitamento da energia gerada. Durante o período de máxima geração, as baterias armazenam o excedente, garantindo que a margem estabelecida não seja ultrapassada. Além disso, possibilitam a injeção de energia na rede durante a noite, quando não há geração fotovoltaica.

É importante destacar que todas as análises foram realizadas considerando a curva de carga máxima, um cenário conservador que não reflete a variabilidade da demanda real. Além disso, assumiu-se que o ciclo de carga e descarga do BESS deveria ser completado no mesmo dia. Caso houvesse flexibilidade para estender esse processo por mais de um dia, os resultados indicam que seria possível acomodar uma potência instalada superior aos valores obtidos.

V. CONCLUSÕES

A utilização do armazenamento de energia possibilitou instalar parques com potência nominal maior que a margem disponível, devido a sua capacidade de deslocar o pico de geração. Entretanto, alguns fatores limitaram a atuação das baterias, como a duração do período em que a geração fica acima da margem. No caso das gerações eólica e híbrida, cujo perfil de geração apresenta menor variação ao longo do dia em comparação com a solar, pode haver desperdício de energia em cenários de máxima geração. Isso ocorre porque a bateria pode não conseguir descarregar quando o parque já estiver operando acima da margem ou por não ter capacidade suficiente para armazenar todo o excedente de energia. Dessa forma, o uso de baterias permite uma melhor otimização da energia fotovoltaica em comparação com a eólica e a híbrida, pois sua geração apresenta um pico mais concentrado, enquanto as demais tendem a uma geração mais constante ao longo do dia. Assim, desde que a diferença entre a geração máxima e a margem não ultrapasse a potência nominal do BESS, e que ele tenha capacidade para armazenar toda a energia excedente durante o período de maior geração, não haverá desperdício.

Todavia, propondo uma margem dinâmica, poderia se ter um aumento da mesma nos períodos mais favoráveis para injeção de energia na rede. No caso em análise, a margem seria definida em 125 MW, por ser o caso mais crítico dentre máxima diurna e mínima noturna, mas uma margem maior

poderia ser adotada, 165 MW, em outros períodos do dia, possibilitando construir parques eólicos e híbridos com maior capacidade, sem perda de energia nos períodos mais críticos. Para a geração fotovoltaica não haveria mudanças significativas, visto que sua geração é durante apenas um período do dia. Entretanto, considerando a energia eólica, foi possível aumentar em 30 MW de potência instalada sem desperdício de energia considerando a margem dinâmica. Visto que não haveria necessidade de carregar o BESS durante todo o dia e haveria margem para que descarregasse ao final do dia. Em relação à híbrida, por ter uma geração mais elevada durante todo o dia seria necessário bancos de baterias maiores para aumentar a potência instalada do parque para 155 MW.

Portanto, o armazenamento de energia pode otimizar o uso da energia fotovoltaica de forma mais pronunciada que a eólica e híbrida. Todavia, considerar uma margem dinâmica, em conjunto com o armazenador de energia poderia otimizar a energia eólica da mesma forma que a fotovoltaica, permitindo um aumento de potência instalada de 30 MW com o acréscimo de um BESS também com 30 MW de potência nominal. A geração híbrida, por ter um perfil de geração mais regular é menos favorecida com o armazenador de energia e margem dinâmica, cujo objetivo é absorver variações de geração ao longo do dia.

Estudos futuros podem explorar formas de otimizar a potência nominal e a capacidade dos sistemas de armazenamento de energia em cenários com diferentes fontes renováveis. Além disso, é interessante investigar estratégias que maximizem o desempenho financeiro na operação de longo prazo do parque, considerando, além dos fatores já analisados neste trabalho, aspectos como o custo de expansão da planta renovável, o valor da energia comercializada e o montante disponível para investimento no BESS.

REFERÊNCIAS

- [1] ONS, "O sistema em números", disponível em "https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros", acessado em 10 de fevereiro de 2025.
- [2] ONS, "Casos de Referência do PAR/PEL 2025, Ciclo 2026-2030", disponível em "https://sintegre.ons.org.br/sites/8/42/60/", acessado em 28 de março de 2025;
- [3] ONS, "Mapa de margens", disponível em "https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/setor-eletrico-conta-nova-ferramenta-interativa-de-informacoes", acessado em 12 de fevereiro de 2025;
- [4] ONS, "Casos de Referência para Definição da Capacidade Remanescente do SIN para escoamento de Geração", disponível em "https://sintegre.ons.org.br/sites/8/42/123/", acessado em 12 de fevereiro de 2025;
- [5] ONS, "NT-ONS DPL 0073/2024", "Capacidade Remanescente do SIN para Escoamento de Geração – Ciclo 2025 a 2029: Metodologia, Premissas e Critérios", julho de 2024;
- [6] ONS, "Orientações para os Estudos de Acesso nas Regiões Norte/Nordeste";
- [7] ONS, "Geração Média diária e horária", disponível em "https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao-media-diaria-horaria.aspx", acessado em 12 de fevereiro de 2025.