57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

Operação Isolada e Integrada Estática de Sistemas de Armazenamento em Baterias e Reconfiguração de Redes de Distribuição com Alta Penetração de Geração Distribuída

Yanick R. Gomes, Liliane Alice R. P., Edmarcio A. Belati
Universidade Federal do ABC
Av. dos Estados, 5001 - Bangú, Santo André - SP, 09210-580, São Paulo, Brasil
yanick.rodolfo@ufabc.edu.br, resende.alice@ufabc.edu.br,
edmarcio.belati@ufabc.edu.br

RESUMO

Este trabalho propõe uma análise da operação isolada e integrada estática de Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) com a Reconfiguração de Redes de Distribuição (RRD), considerando alta penetração de Geração Distribuída (GD) solar e eólica. A metodologia utiliza modelos de otimizações baseado na meta-heurística *Differential Evolution* (DE) para RRD Dinâmica e em *Mathematical Programming Language* (AMPL), resolvido pelo solucionador KNITRO para BESS e integração estática, com o objetivo de minimizar perdas de energia, mitigar fluxo reverso, melhorar o perfil de tensão e gerenciar GDs ao longo de 24 horas. Os testes foram realizados em um sistema de 33 barras sob diferentes cenários operacionais. Os resultados demonstraram o potencial da integração entre BESS e RRD na modernização das redes, promovendo uma transição energética mais segura e sustentável. A aplicação conjunta ou isolada dessas estratégias mostrou-se eficaz para tornar as redes mais resilientes e adaptadas às demandas de sistemas com alta inserção de fontes renováveis.

PALAVRAS CHAVE. Reconfiguração de Rede de Distribuição; Armazenamento de Energia por Bateria; Perdas; Otimização; Fluxo Reverso.

Tópicos: Planejamento; Operação; Energias Renováveis; Sistemas de Distribuição

ABSTRACT

This work proposes an analysis of the static, isolated, and integrated operation of Battery Energy Storage Systems (BESS) with Distribution Network Reconfiguration (DNR), considering a high penetration of solar and wind Distributed Generation (DG). The methodology uses optimization models based on the meta-heuristic Differential Evolution (DE) for Dynamic DNR and on Mathematical Programming Language (AMPL), solved with the KNITRO solver for BESS and static integration, aiming to minimize energy losses, mitigate reverse power flow, improve voltage profiles, and manage DGs over a 24-hour period. Tests were conducted on a 33-bus system under different operational scenarios. The results demonstrated the potential of integrating BESS and DNR in network modernization, promoting a safer and more sustainable energy transition. The joint or isolated application of these strategies proved effective in making networks more resilient and adapted to systems with high penetration of renewable sources.

KEYWORDS. Distribution Network Reconfiguration; Battery Energy Storage; Losses; Optimization; Reverse Power Flow.

Topics: Planning; Operation; Renewable Energy; Distribution Systems

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

1. Introdução

A crescente penetração de fontes de GD, especialmente as renováveis como Geração Fotovoltaica (GF) e Geração Eólica (GE), tem transformado significativamente a dinâmica operacional das redes de distribuição de energia elétrica. Embora tragam benefícios ambientais e contribuam para a diversificação da matriz energética, essas fontes também introduzem desafios relacionados à intermitência, variação de tensão e sobrecarga de componentes da rede [ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2024].

Recentemente, a Península Ibérica sofreu um dos maiores apagões dos últimos vinte anos, quando cerca de 60% da demanda elétrica da Espanha e Portugal caiu repentinamente, gerando interrupções em transporte, comunicações e serviços essenciais [Times, 2025; Associated Press, 2025]. Esses eventos mostram que desequilíbrios súbitos entre geração e consumo, agravados pela alta penetração de fontes renováveis com baixa inércia elétrica, reforçam a necessidade de soluções rápidas de resposta, como BESS, capazes de atuar imediatamente para preservar a estabilidade da rede.

No Brasil, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é considerado um dos mais robustos e confiáveis do mundo, com elevada capacidade de transferência entre regiões e alta participação renovável, cerca de 85% da capacidade instalada em 2024 [Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2025]. Contudo, a forte dependência de hidrelétricas o torna vulnerável a eventos climáticos extremos como secas prolongadas, que já levaram a crises energéticas no passado [International Energy Agency, 2025].

Nesse contexto, os BESS surgem como solução promissora para mitigar os impactos operacionais da GD [da Silva et al., 2023], permitindo o armazenamento de excedentes energéticos e seu fornecimento em momentos de maior demanda ou menor geração. Paralelamente, a RRD através da mudança no estado de chaves seccionadoras permite adaptar o fluxo de potência em tempo real [Silva et al., 2020], otimizando a eficiência operativa e reduzindo perdas técnicas [Gomes et al., 2022].

Entretanto, a operação coordenada entre sistemas BESS e RRD ainda apresenta limitações no estado da arte [Gomes et al., 2023], principalmente devido à complexidade envolvida na modelagem conjunta dos dispositivos, das restrições operacionais e do horizonte temporal necessário para um planejamento eficiente. Além disso, poucos estudos abordam a integração dessas duas abordagens de forma sinérgica em redes com alta penetração de GD [Zhang et al., 2023].

Diante disso, este trabalho propõe uma abordagem integrada para a operação conjunta de RRD e BESS, com o objetivo de reduzir perdas de potência ativa, gerenciar GDs e aumentar a confiabilidade do sistema diante da intermitência das fontes renováveis. A principal contribuição reside na formulação de um modelo multiperíodo que considera restrições operacionais realistas, a coordenação entre os elementos do sistema e a representação precisa das condições dinâmicas da rede, além de uma análise comparativa entre três estratégias distintas: I a RRD dinâmica com algoritmo de Evolução Diferencial no MATLAB, II a operação isolada do BESS com o solver Knitro no AMPL, e III a abordagem integrada entre RRD e BESS de forma estática também no AMPL. Essa proposta oferece subsídios relevantes para o planejamento e a operação de redes inteligentes, promovendo maior eficiência energética, confiabilidade e sustentabilidade em cenários futuros com alta penetração de fontes distribuídas.

o trabalho está estruturado nas seguintes seções: na Seção 3, são apresentados os modelos matemáticos do BESS e da RRD, juntamente com suas respectivas restrições 3.2 a 3.9. Além disso, são descritas as curvas de carga e de GDs consideradas na análise. As Seções 4.1 a 4.4 apresentam os resultados obtidos e as análises dos diferentes cenários simulados. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões do estudo e propostas para trabalhos futuros.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

2. Técnicas Meta-heurísticas Aplicadas

2.1. Algoritmo de Evolução Diferencial (DE)

O DE é uma meta-heurística populacional baseada em mutação, cruzamento e seleção. Destaca-se pela eficiência, simplicidade e capacidade de encontrar soluções próximas ao ótimo global Storn e Price [1997]; Das & Suganthan, 2011). A Tabela 1 apresenta as dez estratégias de mutação e cruzamento do algoritmo DE que foram empregadas e testadas neste trabalho.

Tabela 1: Principais estratégias de mutação do algoritmo DE

ID	Expressão de Mutação	Notação
E1	$V^{(q+1)} = X_a^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)})$	DE/rand/1/bin
E2	$V^{(q+1)} = X_a^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)})$	DE/rand/1/exp
E3	$V^{(q+1)} = X_{\text{best}}^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)})$	DE/best/1/bin
E4	$V^{(q+1)} = X_{\text{best}}^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)})$	DE/best/1/exp
E5	$V^{(q+1)} = X_a^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)}) + F(X_d^{(q)} - X_e^{(q)})$	DE/rand/2/bin
E6	$V^{(q+1)} = X_a^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)}) + F(X_d^{(q)} - X_e^{(q)})$	DE/rand/2/exp
E7	$V^{(q+1)} = X_{\text{best}}^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)}) + F(X_d^{(q)} - X_e^{(q)})$	DE/best/2/bin
E8	$V^{(q+1)} = X_{\text{best}}^{(q)} + F(X_b^{(q)} - X_c^{(q)}) + F(X_d^{(q)} - X_e^{(q)})$	DE/best/2/exp
E9	$V^{(q+1)} = X_a^{(q)} + \sum_{i=1}^{3} F(X_{i1}^{(q)} - X_{i2}^{(q)})$	DE/rand/3/bin
E10	$V^{(q+1)} = X_a^{(q)} + \sum_{i=1}^{3} F(X_{i1}^{(q)} - X_{i2}^{(q)})$	DE/rand/3/exp

2.2. Grey Wolf Optimizer (GWO)

Inspirado na hierarquia de lobos-cinzentos, o GWO simula papéis sociais para guiar a busca por soluções. Apresenta boa convergência e evita mínimos locais Mirjalili et al. [2014].

2.3. Particle Swarm Optimization (PSO)

Baseado no comportamento de enxames, o PSO atualiza soluções com base na experiência individual e coletiva. É simples, eficiente e amplamente usado em otimização contínua e combinatória Kennedy e Eberhart [1995].

3. Modelagem matematica Proposta

A modelagem proposta integra a RRD com a operação de BESS em um horizonte multiperíodo de 24 horas. O objetivo é coordenar geração, armazenamento e consumo, minimizando os impactos da intermitência das fontes renováveis e assegurando o atendimento energético. A formulação considera restrições técnicas e operacionais, visando a minimização das perdas de potência ativa e fluxo reverso, conforme expressa a Equação (1).

$$\min J = \sum_{i \in N} \sum_{j \in \Omega_i} R_{ij} I_{ij}^2, \tag{1}$$

onde:

- J: função objetivo que representa as perdas ativas totais na rede elétrica;
- N: conjunto de nós da rede elétrica;
- Ω_i: conjunto dos nós adjacentes ao nó i;
- R_{ij}: resistência elétrica da linha entre os nós i e j e I_{ij}: corrente ativa que circula na linha entre os nós i e j.

A função objetivo está sujeita às seguintes restrições:

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

3.1. Balanço de Potência

O balanço de potência ativa e reativa é fundamental para garantir a operação correta e segura da rede de distribuição em cada instante de tempo i. Para cada barra k, a soma das potências geradas e injetadas pelas baterias, menos a potência consumida pelas cargas, deve ser igual ao fluxo de potência que sai da barra menos o fluxo que chega a ela.

Matematicamente, para a potência ativa, temos:

$$P_{G_{k,i}} + P_{B_{k,i}} - P_{D_{k,i}} = \sum_{l \in \Omega_k^{\text{out}}} P_{kl,i} - \sum_{l \in \Omega_k^{\text{in}}} P_{lk,i}, \quad \forall k, \forall i \tag{2}$$

De forma análoga, para a potência reativa:

$$Q_{G_{k,i}} + Q_{B_{k,i}} - Q_{D_{k,i}} = \sum_{l \in \Omega_k^{\text{out}}} Q_{kl,i} - \sum_{l \in \Omega_k^{\text{in}}} Q_{lk,i}, \quad \forall k, \forall i \tag{3}$$

Onde:

- $P_{G_{k,i}}$ e $Q_{G_{k,i}}$ representam as potências ativa e reativa geradas na barra k no instante i;
- $P_{B_{k,i}}$ e $Q_{B_{k,i}}$ são as potências ativa e reativa associadas ao BESS na barra k;
- $P_{D_{k,i}}$ e $Q_{D_{k,i}}$ são as cargas ativa e reativa demandadas na barra k;
- $P_{kl,i}$ e $Q_{kl,i}$ representam os fluxos de potência ativa e reativa da barra k para a barra l;
- Ω_k^{out} é o conjunto das barras à quais a barra k está conectada e para onde há fluxo de potência saindo, por exemplo, se $k = 3$ está conectada às barras 5 e 7, então $\Omega_3^{\text{out}} = \{5, 7\}$;
- Ω_k^{in} é o conjunto das barras das quais a barra k recebe fluxo de potência, por exemplo, se $k = 3$ recebe fluxo das barras 1 e 2, então $\Omega_3^{\text{in}} = \{1, 2\}$.

Essas equações asseguram que, em cada instante, a potência ativa e reativa está balanceada na rede, respeitando as leis de conservação de energia e as restrições físicas do sistema.

3.2. Restrição de Capacidade da Bateria

O estado de carga do BESS (E_t) deve permanecer dentro dos limites técnicos de capacidade durante todos os períodos:

$$E_{\text{min}} \leq E_t \leq E_{\text{max}}, \quad \forall t, \tag{4}$$

onde E_{min} e E_{max} representam os limites inferior e superior da capacidade do BESS.

3.3. Restrição de Dinâmica do Estado de Carga

A evolução do estado de carga do BESS é descrita por:

$$E_{t+1} = E_t + \eta_c P_t^{\text{carga}} \Delta t - \frac{1}{\eta_d} P_t^{\text{descarga}} \Delta t, \quad \forall t, \tag{5}$$

onde:

- η_c e η_d: eficiências de carga e descarga do BESS;
- Δt: intervalo de tempo entre os períodos.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

3.4. Restrição de Potência do BESS

As potências de carga e descarga devem respeitar os limites de projeto do BESS:

$$0 \leq P_t^{\text{carga}} \leq P_{\text{max}}^{\text{carga}}, \quad 0 \leq P_t^{\text{descarga}} \leq P_{\text{max}}^{\text{descarga}}, \quad \forall t. \tag{6}$$

3.5. Restrição de Operação Unidirecional

Para evitar perdas desnecessárias e conflitos operacionais, o BESS não pode operar simultaneamente nos modos de carga e descarga:

$$P_t^{\text{carga}} \cdot P_t^{\text{descarga}} = 0, \quad \forall t. \tag{7}$$

3.6. Restrição de Estado de Carga Inicial e Final

O estado de carga inicial e final do BESS deve ser pré-definido:

$$E_0 = E_{\text{inicial}}, \quad E_T = E_{\text{final}}, \tag{8}$$

onde E_{inicial} e E_{final} representam as condições impostas no planejamento.

3.7. Restrição de Balanceamento Energético da Rede

O balanceamento energético deve ser garantido em todos os períodos:

$$P_t^{\text{GD}} + P_t^{\text{descarga}} - P_t^{\text{carga}} - P_t^{\text{load}} = 0, \quad \forall t, \tag{9}$$

onde:

- P_t^{GD}: potência gerada pelas fontes distribuídas no instante t;
- P_t^{load}: potência consumida pela carga no instante t.

3.8. Restrição de Radialidade

A restrição de radialidade garante que a rede de distribuiç ao permaneça como uma árvore, ou seja, sem ciclos, mantendo a topologia radial. Essa condiç ao é expressa pela seguinte equaç ao 10:

$$\sum_{k,m \in NL} y_{km} = N - 1, \tag{10}$$

onde:

- $y_{km} \in \{0, 1\}$ indica se a linha entre os nós k e m está ativada (1) ou desativada (0);
- NL é o conjunto de linhas da rede;
- N é o número total de nós da rede.

3.9. Restrição de Tensão

A magnitude da tensão nos barramentos conectados ao BESS deve permanecer dentro dos limites regulamentares do PRODIST representada na Equação 11

$$V_{\text{min}} \leq V_k^t \leq V_{\text{max}} \tag{11}$$

onde:

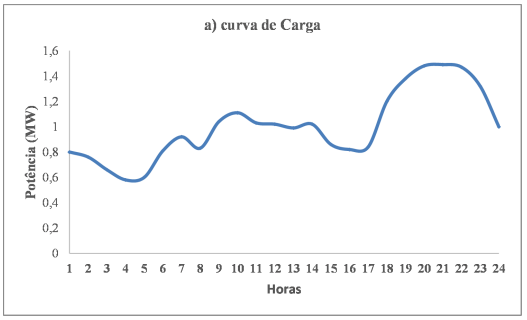
- limite inferior de tensão (p.u.)
- limite superior de tensão (p.u.)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

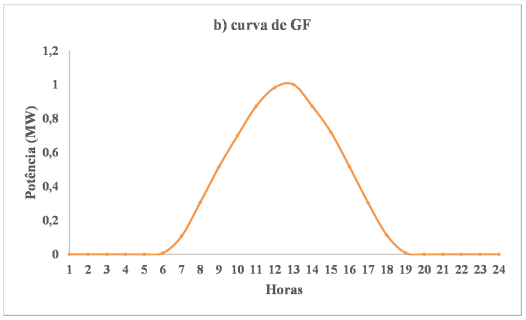
3.10. Curvas de carga e GDs

As Figuras 1 e 2 apresentam os perfis horários de carga, GF, GE e curva de vento, GDs utilizados nas simulações. A curva de carga foi obtida a partir de dados reais disponibilizados pela ENEL Enel Distribuição São Paulo [2023], representando o comportamento típico da demanda residêncial de um sistema de distribuição ao longo de 24 horas, devidamente normalizada em relação ao seu valor máximo. As curvas de geração das GDs também foram construídas a partir de dados reais.

Figura 1: Curvas de carga e GF

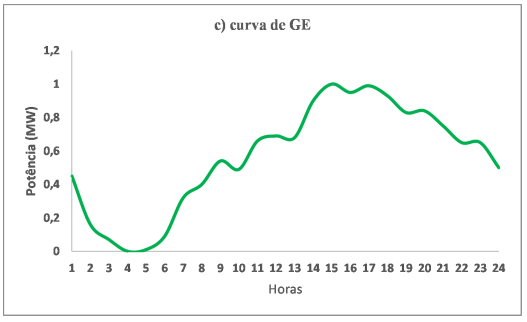


(a) curvas das potências do Cenário I

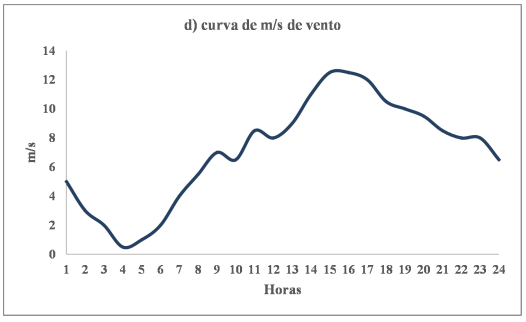


(b) curvas de tensões do Cenário I

Figura 2: Curvas de carga e GE



(a) Curva de carga residencial e GF



(b) Curvas de vento e GE

4. Resultados, Análises e Discussões

Os testes e simulações foram realizados com o objetivo de avaliar o desempenho da rede de distribuição sob diferentes cenários operacionais. Para isso, utilizaram-se os recursos computacionais de um equipamento Dell, com processador Intel Core™ i7 de 11ª geração, 1 TB de armazenamento (HD) acrescido de 256 GB SSD, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11. As simulações foram executadas no Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia (LOSE) da UFABC. A metodologia de RRD foi implementada no ambiente MATLAB®, utilizando o algoritmo de Evolução Diferencial (DE). Por sua vez, o modelo de BESS foi formulado no AMPL®, com utilização do solver *Knitro*. Para a avaliação conjunta de RRD e BESS integrada estática, as simulações também foram realizadas no AMPL. A Figura 3 mostra o diagrama unifilar do sistema de 33 barras, indicando as posições otimizadas das unidades de GD e do BESS. Na Tabela 2 são apresentados descrição do BESS e sua capciadade e de GDS no temporal de 24h. Foram simulados cenários para avaliar o impacto de variáveis como perdas técnicas, estabilidade e integração de GDs

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

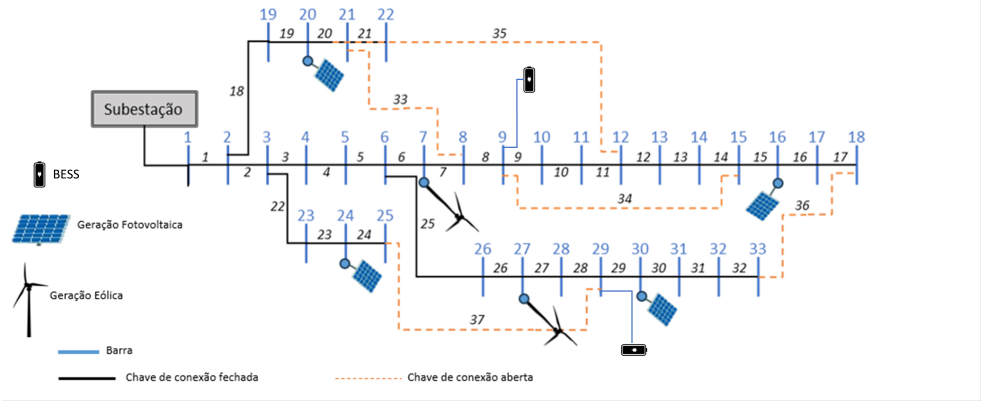
e fontes renováveis. Uma análise de varredura foi realizada para determinar as localizações ótimas do BESS e das unidades de GD.

Tabela 2: Dados do sistema de 33 barras e características técnicas do BESS e GDs

Sistema de 33 barras		
Parâmetro	Configuração inicial	Configuração ótima
Perdas (kW)	208,4	139,55
Chaves abertas	33 - 34 - 35 - 36 - 37	7 - 9 - 14 - 32 - 37
Tensão mínima (p.u)	0,912	0,9435
Redução (%)	–	66,96
Características Técnicas do Sistema BESS e Capacidades das GDs		
Parâmetro	**Valor**	**Descrição**
Capacidade do BESS	10 MWh	Energia total armazenada
Carga/descarga	±2,5 MW	Carga e descarga instantânea
Eficiência	genérico%	Rendimento do ciclo completo
Barras	**Potência (MW)**	**GDs/BESS**
7	1,00	GE
16	1,20	GF
20	0,80	GF
24	1,40	GF
27	1,20	GE
30	0,80	GF
9	10,00	BESS
29	10,00	BESS
Total GF (24h)		29,50920 MWh
Total GE (24h)		29,81000 MWh
Carga (24h)		89,27145 MWh

Fonte: Elaborado pelo autor (dados do sistema); adaptado de [Tesla, 2023] (BESS e GDs)

Figura 3: Sistema com GDs e BESS



Duas etapas fundamentais de análise foram realizadas ao longo deste estudo. Na primeira etapa, procedeu-se à avaliação do desempenho da meta-heurística DE, a qual foi comparada com

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

outras duas técnicas, PSO e GWO. O objetivo desta análise foi validar a eficiência da abordagem baseada em DE na resolução do problema de RRD dinâmica. Em seguida, a DE foi aprimorada por meio da seleção da melhor estratégia de mutação dentre dez alternativas identificadas na literatura e apresentada na Tabela1, seguida da aplicação do mecanismo Buca por Malha. Essa etapa teve como finalidade ampliar a capacidade do algoritmo em identificar soluções de elevada qualidade, bem como otimizar seu desempenho computacional. Na segunda etapa, a meta-heurística DE foi aplicada a dois cenários operacionais iniciais, o primeiro considerando a presença de unidades de GDs, e o segundo envolvendo GDs em conjunto com a RRD. Ainda nesta fase, realizou-se a análise da Reconfiguração Dinâmica, modelada no ambiente MATLAB. Adicionalmente, investigaram-se dois cenários complementares, um contemplando exclusivamente o uso de BESS, e outro com uma configuração abrangente, integrando simultaneamente RRD, BESS e GD estática. Estes dois últimos cenários foram implementados e analisados no ambiente AMPL com solver knitro.

Tabela 3: Comparação de Perdas e Geração na Barra Slack para os Quatro Cenários

Hora	**Cenário I**		**Cenário II**		**Cenário III**		**Cenário IV**	
	Perdas (MW)	**Slack (MW)**	**Perdas (MW)**	**Slack (MW)**	**Perdas (MW)**	**Slack (MW)**	**Perdas (MW)**	**Slack (MW)**
1	0,0784	2,0604	0,0576	2,0396	0,0927	2,3400	0,0698	2,3340
2	0,0934	2,5648	0,0672	2,5386	0,0878	2,4692	0,0660	2,4661
3	0,0763	2,3742	0,0543	2,3522	0,0763	2,3751	0,0554	2,3437
4	0,0640	2,2187	0,0451	2,1998	0,0684	2,2983	0,0482	2,2446
5	0,0677	2,2747	0,0477	2,2547	0,0704	2,3224	0,0500	2,2746
6	0,1148	2,8924	0,0812	2,8587	0,0947	2,5759	0,0724	2,5895
7	0,1014	2,3658	0,0730	2,3374	0,1014	2,3658	0,0748	2,3391
8	0,0518	0,9701	0,0385	0,9567	0,0518	0,9701	0,0385	0,9567
9	0,0752	0,5878	0,0561	0,5714	0,0754	0,6121	0,0562	0,5688
10	0,0865	0,1921	0,0609	0,1665	0,0878	0,3850	0,0655	0,1712
11	0,0969	-1,1952	0,0675	-1,2246	0,0914	0,0000	0,0794	0,0100
12	0,1152	-1,7421	0,0794	-1,7779	0,1056	0,0000	0,0980	0,0100
13	0,1173	-1,9009	0,0808	-1,9373	0,1065	0,0000	0,1014	0,0100
14	0,1152	-1,7421	0,0814	-1,7759	0,0996	0,0000	0,0894	0,0100
15	0,1023	-1,9268	0,0748	-1,9543	0,0791	0,0000	0,0728	0,0100
16	0,0706	-1,1403	0,0555	-1,1554	0,0582	0,0000	0,0488	0,0100
17	0,0603	-0,2697	0,0495	-0,2805	0,0595	0,4136	0,0464	0,1246
18	0,1390	2,0764	0,1044	2,0418	0,1200	1,3837	0,1018	1,3118
19	0,2405	3,5034	0,1735	3,4364	0,1673	1,9322	0,1504	1,9850
20	0,2907	3,9409	0,2077	3,8579	0,1939	2,1008	0,1755	2,1936
21	0,3099	4,1953	0,2238	4,1092	0,1959	2,1755	0,1778	2,2771
22	0,3161	4,3472	0,2229	4,2540	0,1903	2,2092	0,1731	2,3094
23	0,2397	3,7135	0,1712	3,6450	0,1526	1,9721	0,1382	2,0192
24	0,1313	2,7463	0,0952	2,7102	0,0869	1,5649	0,0780	1,5111
Total (MWh)	3,1546	—	2,2117	—	2,5137	—	2,1279	—

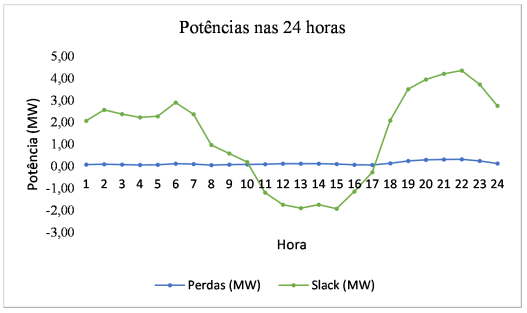
4.1. Cenário I: Sistema com GDs

Este cenário considera a operação da rede com a inserção de unidades de GDs fotovoltaicas e eólicas, alocadas de forma distribuída conforme apresentada na Figura 3. A curva de carga também é considerada, permitindo avaliar o impacto dinâmico da variabilidade de geração ao longo do período analisado, sem a presença de BESS e RRD. A Tabela 3 mostra os resultados do sistema com GDs na coluna 2, destacando as carga, GF, GE, perdas, fluxo reverso (Slack) durante 24h. e chaves incialmente abertas apresentadas na Tabela 2. As perdas totais ao longo do dia foram de 3,1546 MWh. O fluxo reverso, indicado pela variável Slack, apresenta valores negativos em diversos horários, especialmente durante o pico de GDs, o que sugere que a energia gerada excede a carga consumida e é injetada na rede. Esse comportamento ocorre principalmente entre as 11h e 17h, quando as GDs atingem seus picos, gerando energia excedente. A Figura 4 apresenta os perfis

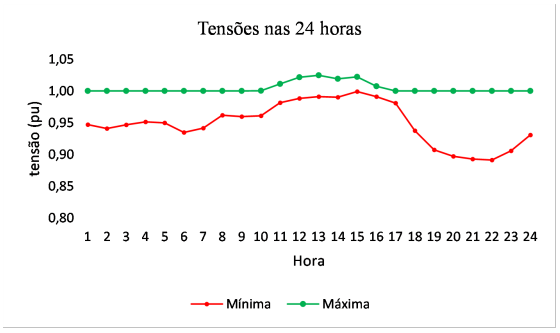
DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

diários de geração, perdas e fluxo reverso (subfigura 4a), bem como as curvas de tensões máxima, mínima e média (subfigura 4b). Destaca-se a melhora no perfil de tensão após a inserção das GDs, com elevação da tensão mínima de 0,88 p.u para valores dentro dos limites operacionais.

Figura 4: Curvas de Cenário I



(a) curvas das potências do Cenário I



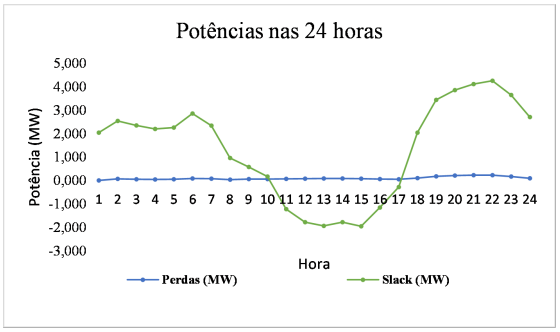
(b) curvas de tensões do Cenário I

As perdas e o fluxo reverso são indesejáveis, indicando a necessidade de metodologias que mitiguem esses efeitos.

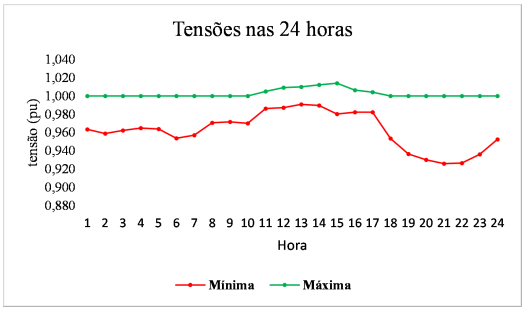
4.2. Cenário II: Sistema com RRD e GDs

Neste cenário, o sistema foi analisado considerando a aplicação da RRD com a presença de GDs. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos ao longo de 24 horas, incluindo as perdas técnicas totais e a ocorrência de fluxo reverso. Além disso, houve alteração nas chaves nos horários de maior geração de GDs, utilizando nove grupos de topologia dinâmica, conforme avaliado no Cenário IV. Observa-se que as perdas foram reduzidas em comparação ao Cenário I, porém ainda persiste preocupação quanto ao fluxo reverso. Embora essa análise detalhada não seja apresentada, foi devidamente realizada e avaliada, e uma das topologias obtidas foi fixada de forma estática com BESS e RRD no Cenário IV. Nesse contexto, torna-se necessário adotar metodologias adicionais

Figura 5: Curvas de Cenário II



(a) Curvas de potências do Cenário II



(b) Curvas de tensões do Cenário II

para mitigar o fluxo reverso e perdas. As curvas de perdas e de fluxo reverso são apresentadas na Figura 5a, enquanto as tensões máximas e mínimas são mostradas na Figura 5b, ambas reunidas na Figura 5.

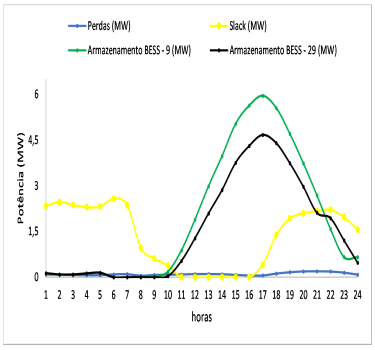
4.3. Cenário III: Sistema com BESS e GDs

Já neste cenário, o BESS foi considerado com GDs. Pode-se perceber na Tabela 3 que o BESS conseguiu mitigar o fluxo reverso, mas houve um aumento nas perdas quando comparado

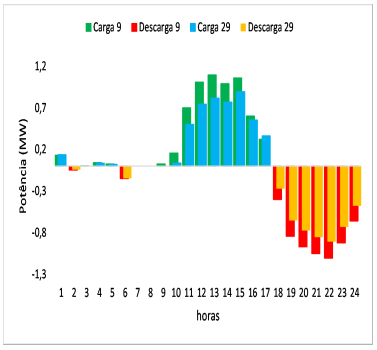
DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

com o Cenário II. O que ainda levanta preocupação quanto à necessidade de equilibrar o controle de fluxo e as perdas operacionais. Este resultado indica que, embora o BESS contribua para a mitigação de fluxo reverso, a sua adoção em algumas condições pode não ser suficiente para reduzir as perdas em níveis aceitáveis, exigindo uma abordagem mais refinada para a gestão da rede. Além disso, a Figura 6 apresenta dois gráficos importantes: a Subfigura 6a mostra as curvas de perdas e do ponto slack ao longo do tempo, enquanto a Subfigura 6b ilustra o comportamento da carga e descarga do BESS alocado nas barras 9 e 29 durante o período de 24 horas. A Figura 6c por sua vez, exibe o comportamento da tensão máxima e mínima nas barras da rede durante o mesmo intervalo de tempo.

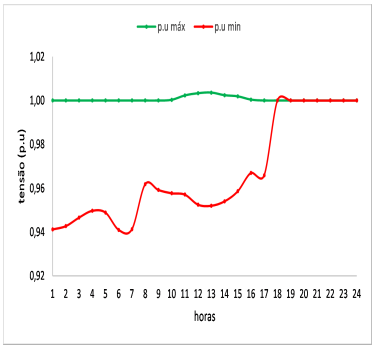
Figura 6: Curvas de Cenário III



(a) Curvas de potências



(b) Carga e descarga nas barras 9 e 29

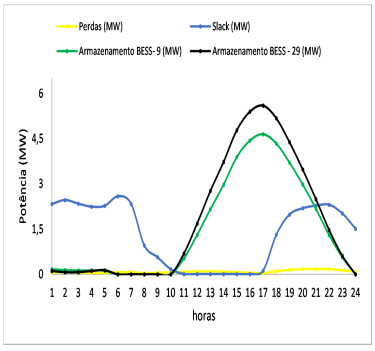


(c) Tensão máxima e mínima

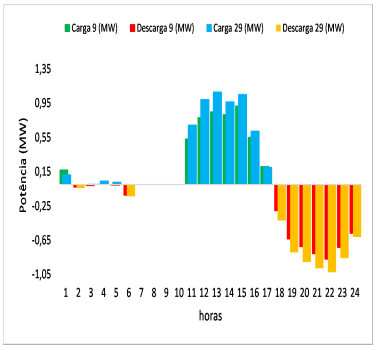
4.4. Cenário IV: Sistema com RRD e BESS

No Cenário IV, a reconfiguração dinâmica foi realizada previamente, antes da aplicação do sistema com BESS. Durante a reconfiguração, foram identificados 9 grupos de diferentes chaves de seccionamento. O grupo de chaves com a menor perda foi selecionado e as chaves desse grupo foram fixadas, com a configuração mantida constante durante a operação subsequente do sistema.

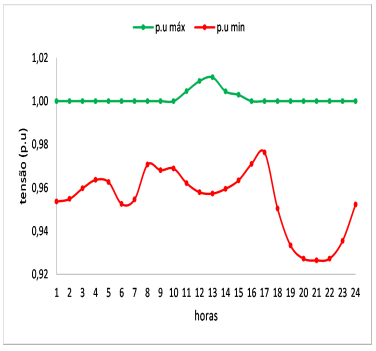
Figura 7: Curvas de cenário IV



(a) Curvas de potências



(b) Carga e descarga nas barras 9 e 29



(c) Tensão máxima e mínima

Neste cenário, a integração entre o BESS e a RRD é realizada de forma estática, combinando a configuração da RRD com o BESS e a presença de GDs. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos ao longo de 24 horas, incluindo as perdas totais, a operação da barra slack e as cargas e descargas do BESS nas barras 9 e 29. Os resultados mostram que a combinação de RRD e BESS foi

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

capaz de mitigar o fluxo reverso e reduzir as perdas em comparação com os demais cenários. Além de gerenciamento de GDs, o BESS contribuiu para estabilizar as tensões nas barras, controlando as flutuações de carga e descarga ao longo do dia.

As Figuras 7(7a, 7b e 7c) ilustram o comportamento das curvas ao longo de 24 horas no cenário IV.

Com base nos resultados apresentados nos diferentes cenários, observa-se que a alocação de GDs sem qualquer estratégia de controle no Cenário 4.1 resulta em perdas elevadas e fluxo reverso significativo, comprometendo a operação segura da rede. A aplicação da RRD no Cenário 6 demonstrou redução das perdas, embora o fluxo reverso ainda persistisse como um problema relevante. Para mitigar esse efeito, foi incorporado o BESS no Cenário 4.3, permitindo o gerenciamento dos excedentes de GDs e, consequentemente, a eliminação do fluxo reverso, embora com aumento relativo nas perdas. Por fim, o Cenário 4.4 combinou as duas abordagens (RRD + BESS), resultando em significativa melhoria da eficiência operacional da rede, ao reduzir perdas e eliminar o fluxo reverso. Portanto, do ponto de vista da concessionária, a decisão sobre a melhor estratégia dependerá do objetivo priorizado: reduzir perdas, evitar fluxo reverso, ou solucionar ambos de forma integrada.

5. Conclusão

A integração estática entre BESS e RRD, demonstrou aumentar significativamente a segurança operacional em redes com alta penetração de GDs. O Cenário IV apresentou a menor perda total ao longo de 24 horas, além de reduzir de forma expressiva o fluxo reverso, conforme mostrado na Tabela 3. Essa configuração mostrou-se a alternativa mais consistente para garantir estabilidade na operação de sistema considerando diferentes GDs. Os resultados comprovam que a metodologia adotada constitui uma solução sólida e confiável para os desafios da modernização das redes de distribuição. Recomenda-se, entretanto, aprofundar análises de otimização dinâmica e estudos econômicos para maximizar o desempenho e a viabilidade das estratégias propostas.

Agradecimentos

Os autores agradecem á Universidade Federal do ABC (UFABC), ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGENE) e á Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

Associated Press (2025). Large iberian blackout linked to grid imbalance from renewable power. *AP News*. URL https://apnews.com/article/f091ffd3e51dfd3612edb2389eac1e11. Acesso em: 09 ago. 2025.

da Silva, D. J., Belati, E. A., e López-Lezama, J. M. (2023). A mathematical programming approach for the optimal operation of storage systems, photovoltaic and wind power generation. *Energies*, 16(3):1–24. URL https://doi.org/10.3390/en16031269.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025). Relatório síntese do balanço energético nacional (ben) 2025 – ano base 2024. https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025. Relatório oficial da EPE, com dados sobre renovabilidade da matriz elétrica e energética brasileira.

Enel Distribuição São Paulo (2023). Perfil de consumo residencial - base horária. Acesso em: mai. 2024. Disponível em: https://www.eneldistribuicaosp.com.br.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br

Gomes, Y. R., Belati, E. A., Vargas, R., e Rossoni, P. (2022). Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica com geração fotovoltaica utilizando fpa. *Sociedade Brasileira de Automática (SBA)*, 2(1):784–791. URL https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2984.

Gomes, Y. R., da Silva, D. J., Belati, E. A., e López-Lezama, J. M. (2023). Daily and weekly operation of battery energy storage systems in networks with high photovoltaic generation penetration: A comprehensive analysis. *International Symposium on Energy (ISE)*, 1(1):1–5.

International Energy Agency (2025). Electricity 2025: Reliability. https://www.iea.org/reports/electricity-2025/reliability. Acesso em: 09 ago. 2025.

Kennedy, J. e Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks*, p. 1942–1948.

Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., e Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69:46–61.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico (2024). Plano de operação elétrica de médio e longo prazo do sistema interligado nacional em 2023. Technical report, ONS. Disponível em: https://www.ons.org.br. Acesso em: 20/12/2024.

Silva, L. I., Belati, E. A., Gerez, C., e Silva Junior, I. C. (2020). Reduced search space combined with particle swarm optimization for distribution system reconfiguration. *Electrical Engineering*. ISSN 1432-0487. URL https://doi.org/10.1007/s00202-020-01150-z.

Storn, R. e Price, K. (1997). Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of Global Optimization*, 11:341–359.

Tesla (2023). Tesla megapack technical specifications. URL https://www.tesla.com/megapack. Acesso em: 12 maio 2025.

Times, F. (2025). Spain and portugal suffer major blackout amid surge in renewable generation. *Financial Times*. URL https://www.ft.com/content/e922cda3-801d-40df-8455-5d3aeae34288. Acesso em: 09 ago. 2025.

Zhang, D., Shafiullah, G. M., Das, C. K., e Wong, K. W. (2023). Optimal allocation of battery energy storage systems to enhance system performance and reliability in unbalanced distribution networks. *Energies*, 16(20):1–35. URL https://doi.org/10.3390/en16207127.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212170
https://proceedings.science/p/212170?lang=pt-br