

Alocação de bancos de baterias em redes aéreas de baixa tensão: análise de compatibilidade estrutural e elétrica

Elidiane Cristina de Aguiar
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
elidiane.aguiar@ufu.br

José Rubens Macedo Junior
Faculdade de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia, Brasil
jrubens.macedo@gmail.com

Resumo—Este artigo aborda uma análise de compatibilidade física e mecânica entre postes convencionais de distribuição de energia elétrica e bancos de baterias para aplicação em circuitos secundários de baixa tensão. Os bancos de baterias podem atuar como dispositivos de suporte nesses circuitos, proporcionando controle da tensão em regime permanente e alívio de carregamento dos transformadores de distribuição, principalmente em cenários de grandes variações de demanda ou de geração intermitente, como no caso dos sistemas de geração distribuída por fonte fotovoltaica. Todavia, para implementação desse tipo de solução em redes de distribuição, torna-se necessária uma análise de viabilidade, contemplando as limitações geométricas e mecânicas das estruturas de distribuição existentes para acomodação dos bancos de baterias, representadas por postes de distribuição com seção circular ou duplo T. Os resultados obtidos correlacionam a potência e a capacidade máxima de bancos de baterias possíveis de serem instalados em diferentes estruturas de rede de distribuição. Na sequência, com base nos resultados obtidos, serão realizados estudos de fluxo de potência em um circuito secundário de distribuição com o objetivo de quantificar os benefícios possíveis até o limite de capacidade mecânica e geométrica de cada estrutura, proporcionando diretrizes para a implementação eficaz dessa nova tecnologia, contribuindo para redes elétricas mais resilientes e sustentáveis.

Palavras-chave— *Armazenamento de energia, Confiabilidade do sistema de distribuição, compatibilidade elétrica.*

Abstract—This paper deals with an analysis of the physical and mechanical compatibility between conventional electricity distribution poles and battery banks for application in low-voltage secondary circuits. Battery banks can act as support devices in these circuits, providing permanent voltage control and load relief for distribution transformers, especially in scenarios of large variations in demand or intermittent generation, as in the case of photovoltaic distributed generation systems. However, in order to implement this type of solution in distribution networks, a feasibility analysis is required, taking into account the geometric and mechanical limitations of existing distribution structures for accommodating battery banks, represented by distribution poles with a circular or double T section. The results obtained correlate the maximum power and capacity of battery banks that can be installed in different distribution network structures. Next, based on the results obtained, power flow studies will be carried out on a secondary distribution circuit with the aim of quantifying the possible benefits up to the limit of the mechanical and geometric

capacity of each structure, providing guidelines for the effective implementation of this new technology, contributing to more resilient and sustainable electricity networks.

Keywords- *Energy storage, Distribution system reliability, Electrical compatibility.*

1 INTRODUÇÃO

A alocação de banco de baterias em circuitos secundários de baixa tensão oferece diversas oportunidades para otimizar a operação e a estabilidade da rede. Esses sistemas podem atuar no alívio de carregamento durante picos de demanda, melhorando a qualidade da energia fornecida ao reduzir quedas de tensão e os impactos de sobrecargas. Além disso, ajudam no controle de tensão em regime permanente, garantindo um fornecimento mais estável e confiável. A instalação de bancos de baterias em redes aéreas de baixa tensão pode aumentar a resiliência da rede, proporcionando backup de energia em caso de falhas ou interrupções temporárias, reduzindo o tempo de inatividade. Também contribui para a otimização da operação da rede ao permitir o armazenamento de energia durante períodos de baixa demanda (ou quando a geração excede a demanda) e liberando-a quando necessário [1]. Esse processo pode ajudar a aumentar o fator de carga do circuito e reduzir a necessidade de investimentos em infraestrutura de distribuição. A implementação dessas soluções pode, ainda, reduzir perdas elétricas e promover maior eficiência.

A compatibilidade mecânica e elétrica entre os bancos de baterias e a estrutura existente nas redes de distribuição é crucial para garantir a integração segura e eficiente desses sistemas. Do ponto de vista mecânico, os bancos de baterias precisam ser projetados de forma a se ajustar adequadamente aos espaços e suportes disponíveis nos circuitos secundários de baixa tensão, que geralmente possuem uma infraestrutura já estabelecida, como postes e suportes [2]. Do ponto de vista elétrico, a compatibilidade envolve a adequação dos sistemas de controle e proteção das baterias aos parâmetros operacionais da rede, como níveis de tensão e carregamento. A interface entre o banco de baterias e a rede de distribuição deve garantir a sincronização adequada das tensões e evitar sobrecargas ou desequilíbrios, que poderiam comprometer os padrões de qualidade técnico do sistema elétrico. Além disso, o sistema de baterias deve ser capaz de operar de maneira eficiente e segura, respeitando os limites de capacidade da

rede, sem causar distúrbios na qualidade da energia ou falhas em equipamentos conectados [3]. Isso exige uma análise cuidadosa das características da rede e dos componentes do sistema de armazenamento, a fim de assegurar que a integração seja feita de maneira robusta e sem riscos adicionais à operação da rede.

Nesse contexto, o estudo apresentado em [4] descreve o desenvolvimento, a produção e os testes práticos do primeiro sistema de armazenamento de energia instalado em postes no mundo. Projetado para atenuar a curva de carga e minimizar picos de demanda em transformadores de distribuição, esse sistema conta com um mecanismo de programação automática que otimiza a utilização da energia disponível diariamente. Outro trabalho relevante, indicado em [5], propõe uma metodologia para o controle do processo de carga e descarga de baterias integradas a unidades de geração distribuída fotovoltaica. O objetivo é fornecer um serviço auxiliar de regulação de tensão, mitigando sobretensões durante os períodos de alta geração fotovoltaica e elevando a tensão nos horários de pico de consumo. As simulações computacionais demonstram que a inclusão das baterias pode contribuir significativamente para o controle da tensão em diversos circuitos secundários de distribuição de energia elétrica.

Por fim, a pesquisa mencionada em [6] realiza uma revisão abrangente das soluções disponíveis para armazenamento de energia elétrica. O estudo traça um perfil das principais oportunidades e desafios para a implementação dessas tecnologias, considerando aspectos como aplicações, custos e regulamentação. Além disso, o trabalho oferece subsídios para a aplicação de técnicas de tomada de decisão no setor.

Visando uma contribuição nesse contexto das baterias aplicadas em circuitos secundários de baixa tensão, este artigo é organizado em 4 seções distribuídas da seguinte forma: a Seção 1 apresenta uma breve introdução contendo as oportunidades possíveis com a alocação de banco de baterias em redes aéreas de baixa tensão, também aborda a necessidade de compatibilidade mecânica e elétrica entre os bancos de baterias e a estrutura existente nas redes de distribuição. A seção 2 abrange o desenvolvimento do trabalho dividido em duas partes: 2.1 Análise de compatibilidade estrutural: analisando a compatibilidade estrutural da rede de distribuição já existente, correlacionando com capacidade do banco de baterias possível. E 2.2 Análise de compatibilidade elétrica. Na seção 3 é apresentada a conclusão, seguida das referências bibliográficas destacadas na seção 4.

2 DESENVOLVIMENTO

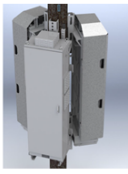
2.1 Análise de compatibilidade estrutural:

Do ponto de vista mecânico, os bancos de baterias precisam ser projetados de forma a se ajustar adequadamente aos espaços e suportes disponíveis nas redes aéreas de baixa tensão, que geralmente possuem uma infraestrutura já estabelecida, como postes e suportes para cabos. A análise de compatibilidade estrutural será realizada analisando a compatibilidade estrutural da rede de distribuição já existente, correlacionando com capacidade do banco de baterias possível. Dessa forma, será realizada uma comparação da capacidade em kgf dos postes alocados no circuito secundário de baixa tensão com a capacidade das baterias suportadas pelo mesmo.

Os dados de estrutura e capacidade dos postes foi obtido da cartilha do Grupo Energisa: “Postes de distribuição em

concreto armado para redes de distribuição até 36,2 kV” - Especificação Técnica Unificada ETU 114.1 – Versão 4.0 outubro/2023, onde a capacidade é dada em daN (decaNewton) convertidos para kgf, onde 1 daN = 1,0197 kgf. A capacidade da bateria pelo peso foi extraída do *datasheet* dos fabricantes: Modelo EcoStore - fabricante EcoJoule Energy, Modelo ChargeCache XS - fabricante Powertec Engineered Solutions, Modelo EcoSTORE V2 - fabricante EcoJoule Energy. Para este estudo foram considerados os seguintes modelos de baterias:

TABELA I. ESPECIFICAÇÃO DE BATERIAS.

Modelo	Especificações	
	Capacidade	10kVA/21.9kWh (1 fase) 30kVA/65kWh (3 fases)
	Tensão de Operação	160 - 270 V
	Tensão Nominal	204 Vdc
	Temperatura	-10°C a 50°C
	Tipo de Bateria	Lithium-ion NMC (LiNiMnCoO2)
	Vida útil	4000 ciclos
	Peso aproximado	300kg (1 fase) 900kg (3 fases)
	Altura	269 cm
	Largura	57,12 cm
	Profundidade	
	Empresa	EcoJoule Energy
	Capacidade	73kVA/72kWh
	Tensão de Operação	415 ou 400 V +10%-6%
	Tensão Nominal	
	Temperatura	0°C a 50°C
	Tipo de Bateria	Lithium-ion NMC (LiNiMnCoO2)
	Vida útil	4000-5000 ciclos >13 anos
	Peso aproximado	1600 kg
	Altura	190 cm
	Largura	110 cm
	Profundidade	110 cm
	Empresa	Powertec Engineered Solutions
	Capacidade	40kVA/85kWh
	Tensão de Operação	180 - 260V (L-N)
	Tensão Nominal	
	Temperatura	-15°C a 50°C
	Tipo de Bateria	Lithium Iron Phosphate (LFP)
	Vida útil	4000 ciclos 15 anos
	Peso aproximado	1000kg (battery) 85kg (EcoVAR)
	Altura	188 cm (battery) 99 cm (EcoVAR)
	Largura	124 cm (battery) 60 cm (EcoVAR)
	Profundidade	66 cm (battery) 45 cm (EcoVAR)
	Empresa	EcoJoule Energy

A partir dos dados da Tabela I foi possível obter uma relação de peso e potência. Considerando os valores médios da Tabela I, expressos em kVA por kg, foram elaboradas as Tabelas II e III.

TABELA II. CAPACIDADE MÁXIMA DE BATERIAS EM POSTES DE DISTRIBUIÇÃO (POSTES DE SEÇÃO CIRCULAR (C)).

Postes de concreto seção circular (C)			
Comprimento (m)	Carga Nominal (daN)	Carga Nominal (kgf)	Capacidade máxima de bateria (kVA/kWh)
10	300,00	305,91	11,32/20,5
	600,00	611,82	22,64/40,99
11	300,00	305,91	11,32/20,5
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48
12	2.000,00	2.039,40	75,46/136,64
	300,00	305,91	11,32/20,5
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48
13	2.000,00	2.039,40	75,46/136,64
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48
14	2.000,00	2.039,40	75,46/136,64
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48
15	2.000,00	2.039,40	75,46/136,64
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48
16	2.000,00	2.039,40	75,46/136,64
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48
17	2.000,00	2.039,40	75,46/136,64
	600,00	611,82	22,64/40,99
	1.000,00	1.019,70	37,73/68,32
	1.500,00	1.529,55	56,59/102,48

TABELA III. CAPACIDADE MÁXIMA DE BATERIAS EM POSTES DE DISTRIBUIÇÃO (POSTES DUPLO T (DT)).

Postes de concreto seção duplo T (DT)			
Comprimento (m)	Carga Nominal (daN)	Carga Nominal (kgf)	Capacidade máxima de bateria (kVA/kWh)
9	150,00	152,96	5,66/10,25
	300,00	305,91	11,32/20,5
10	75,00	76,48	2,83/5,12
	150,00	152,96	5,66/10,25
	300,00	305,91	11,32/20,5
11	150,00	152,96	5,66/10,25
	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24
12	150,00	152,96	5,66/10,25
	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24
13	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24
14	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24
15	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24
16	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24
17	300,00	305,91	11,32/20,5
	500,00	509,85	18,86/34,16
	750,00	764,78	28,3/51,24

2.2 Análise de compatibilidade elétrica

A compatibilidade elétrica envolve a adequação dos sistemas de controle e proteção das baterias aos parâmetros operacionais já estabelecidos, como níveis de tensão, corrente e frequência.

Para este estudo foi realizada uma simulação utilizando o software OpenDSS controlado via Python. Foi simulado o sistema da Fig. 1, que possui 15 postes e penetração de cargas como carregadores elétricos e geração distribuída (GD). A GD assume no sistema a inversão de fluxo, ora atua como carga e ora como geração no sistema.

Para a análise do caso, considerou-se um BESS de 40 kW/85 kWh instalado no poste P13, utilizando apenas uma bateria.

Inicialmente, o circuito foi simulado sem a inserção do BESS, e a tensão por fase no poste P13 pode ser observada no gráfico apresentado na Fig. 2.

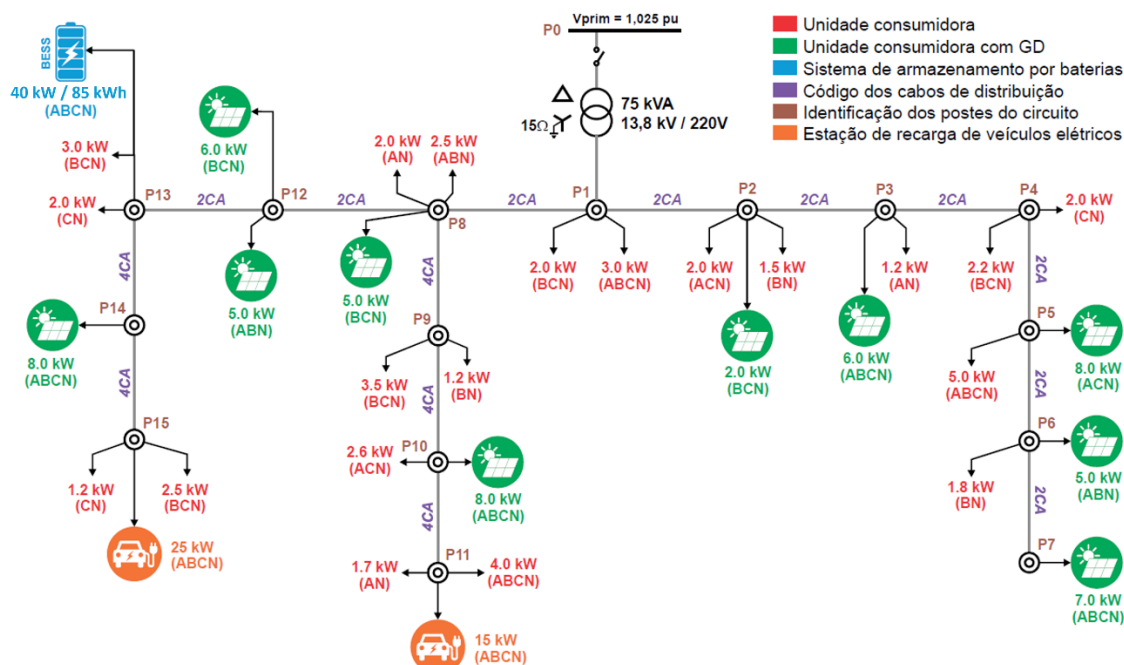


FIGURA 1. CIRCUITO DE ANÁLISE DE CASO.

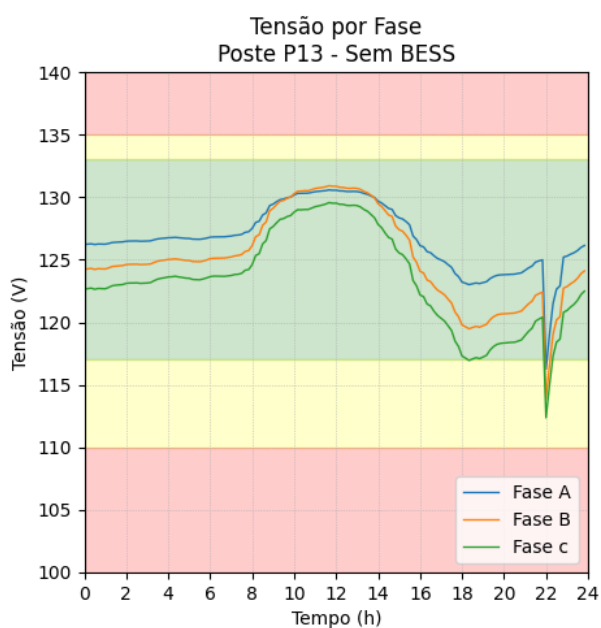


FIGURA 2. TENSÃO POR FASE NO POSTE P13 SEM O BESS.

Observa-se que a tensão ultrapassou o limite de operação precário nas três fases por volta das 22 horas. Também foram

obtidas as tensões na fase A em todos os postes do circuito, conforme apresentado na Fig. 3.

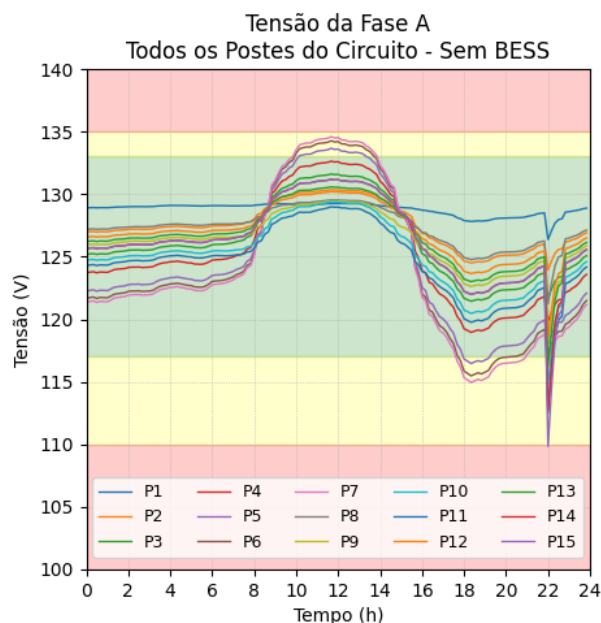


FIGURA 3. TENSÃO NA FASE A SEM O BESS.

Conforme já observado na Fig. 2, a Fig. 3 também apresenta uma violação de tensão no limite precário por volta das 22 horas em todos os postes. Esse fenômeno ocorre devido à inserção dos carregadores rápidos nos postes P11 e P15 nesse horário, ocasionando um afundamento de tensão. Além disso, no intervalo entre 8h e 16h, observa-se uma sobretensão causada pela elevada penetração das GDs.

Foram analisadas as distorções com o objetivo de comparar o desempenho do sistema com e sem o BESS, a fim

de validar o impacto da inserção de baterias circuitos secundários de baixa tensão.

Utilizou-se uma bateria de 40 kW/85 kWh, conforme especificado na Tabela I, instalada no poste P13. A curva de operação da bateria é apresentada na Fig. 4.



FIGURA 4. CURVA DA BATERIA.

Após inserção do BESS, foi realizada nova simulação, cujos resultados são mostrados nas figuras seguintes.

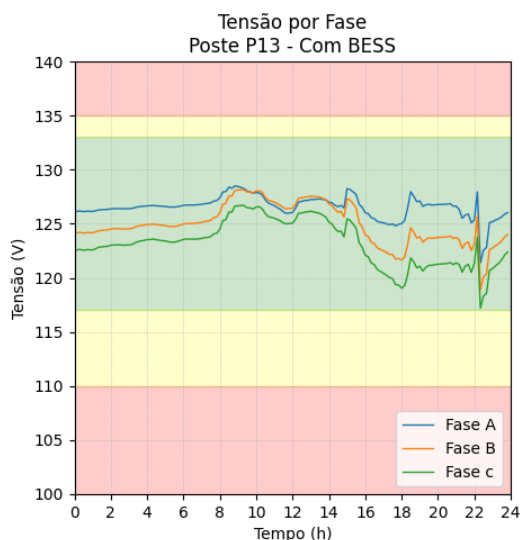


FIGURA 5. TENSÃO POR FASE NO POSTE P13 COM BESS.

Ao se comparar a Fig. 5 com a Fig. 2, observa-se que, com a inserção do BESS, a tensão não ultrapassa mais o limite precário nas três fases por volta das 22 horas. As tensões da fase A em todos os postes do circuito com o BESS são mostradas na Fig. 6.

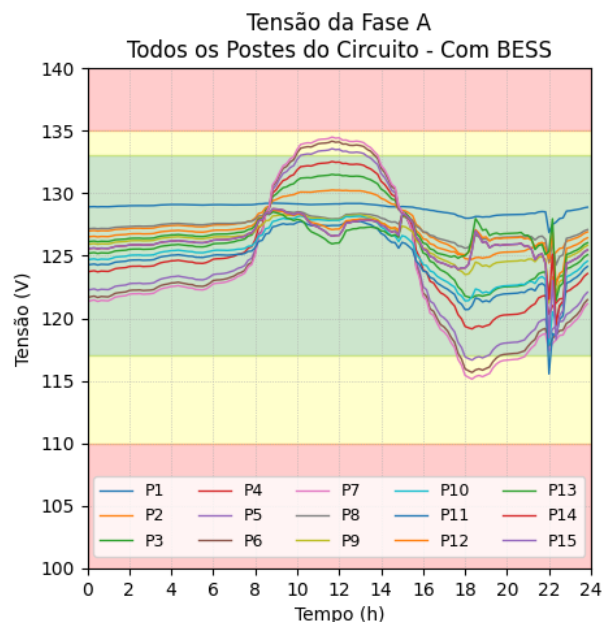


FIGURA 6. TENSÃO NA FASE A DE TODOS OS POSTES COM O BESS

Comparando a Fig. 3 com a Fig. 6, que mostram a tensão da fase A com e sem o BESS, observa-se que, mesmo os postes que violaram os limites precários de tensão, a violação foi menor, tanto nos períodos de redução de tensão por volta das 22 horas, quanto nos horários de maior penetração da geração fotovoltaica, entre 08h e 16h.

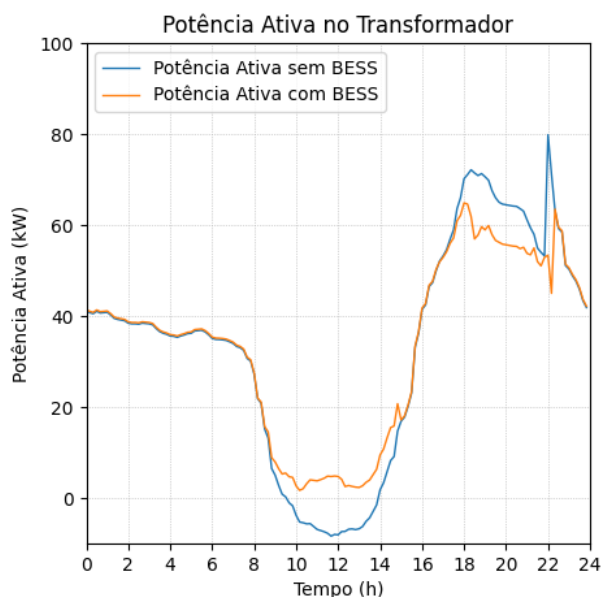


FIGURA 7. POTÊNCIA ATIVA NO TRANSFORMADOR COM E SEM O BESS.

Em relação à potência ativa no transformador, com e sem o BESS, conforme mostrado na Fig. 7, pode-se verificar que, ao inserir o BESS, a potência ativa máxima reduz de 80 kW para menos de 70 kW, enquanto a potência ativa mínima aumenta de quase -10 kW para cerca de 5 kW.

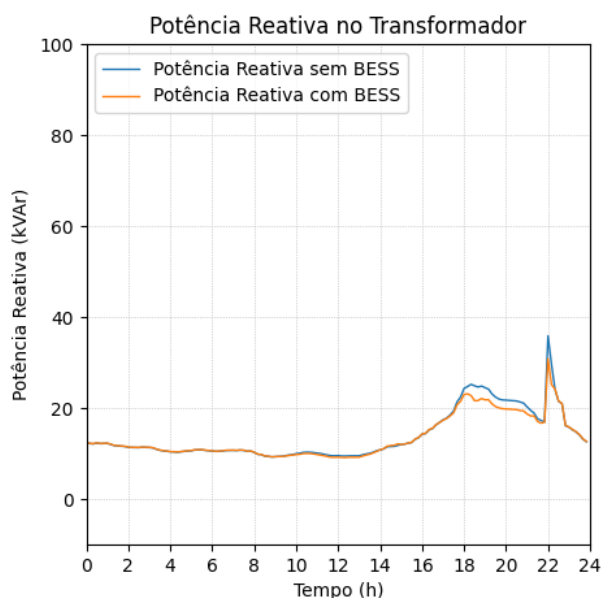


FIGURA 8. POTÊNCIA REATIVA NO TRANSFORMADOR COM E SEM O BESS.

Em relação à potência reativa no transformador, com e sem o BESS, conforme mostrado na Fig. 8, pode-se observar que, ao inserir o BESS, a potência reativa diminui significativamente no período entre 18h e 22h.

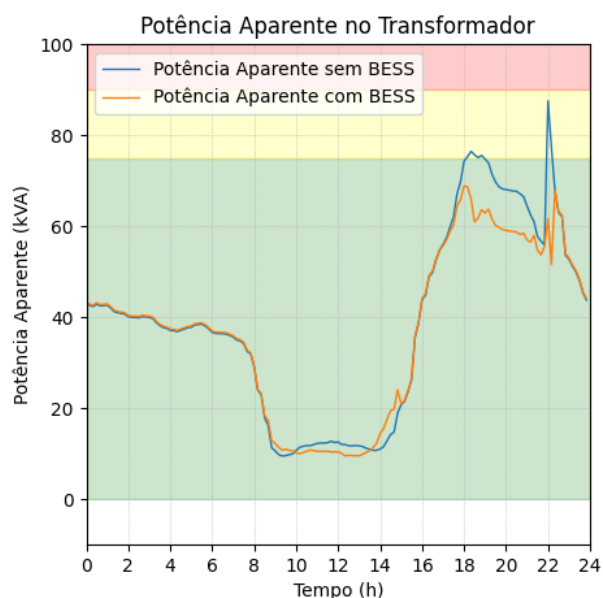


FIGURA 9. POTÊNCIA APARENTE NO TRANSFORMADOR COM E SEM O BESS.

Em relação à potência aparente no transformador, com e sem o BESS, conforme mostrado na Fig. 9, pode-se observar que, ao inserir o BESS, a potência máxima é reduzida de quase 100 kVA para cerca de 70 kVA.

Durante a simulação, foi possível calcular os indicadores DRP e DRC no poste P13, onde a bateria foi alocada. Esses indicadores expressam o percentual do tempo total da medição em que a tensão permaneceu nas faixas precária e crítica, respectivamente. Os limites para os indicadores individuais de DRP e DRC são de 3% e 0,5%, respectivamente.

Os valores dos indicadores DRP e DRC, com e sem o BESS, são apresentados na Tabela IV abaixo:

TABELA IV - COMPARATIVO DRP E DRC COM E SEM O BESS

Fase	Sem BESS		Com BESS	
	DRP (%)	DRC (%)	DRP (%)	DRC (%)
VA	0,69 %	0 %	0 %	0 %
VB	1,39 %	0 %	0 %	0 %
VC	2,08 %	0 %	0 %	0 %

Pode-se notar que, mesmo sem o BESS, os valores obtidos na simulação dos indicadores DRP e DRC não violaram os limites estipulados. Com a inserção do BESS, ambos os indicadores DRP e DRC foram totalmente eliminados.

3 CONCLUSÃO

A temática das baterias é extremamente relevante e atual nas discussões acadêmicas e técnicas do setor elétrico brasileiro, embora ainda careça de regulamentação adequada por parte das instituições competentes.

O setor elétrico convive com grande inserção de fontes renováveis, as quais possuem a variabilidade de atendimento como uma de suas características. A variabilidade dessas fontes impacta a estabilidade e segurança do sistema do elétrico, à medida que sua participação aumenta. Desta forma, não se pode depender exclusivamente dessas fontes para atender às cargas dentro do sistema. Por essa razão, o armazenamento se mostra uma solução importante para otimizar o aproveitamento das fontes naturais [7].

Este trabalho apresentou uma análise da relação entre peso e potência das baterias, destacando a capacidade máxima que pode ser suportada pelos postes existentes circuitos secundários de baixa tensão. É fundamental que os bancos de baterias sejam projetados para se integrar adequadamente à infraestrutura já estabelecida, como postes e suportes. Além disso, a pesquisa inclui uma avaliação da compatibilidade elétrica, demonstrando, por meio de simulações, que a inserção de um sistema de armazenamento de energia em bateria (BESS) pode proporcionar maior estabilidade e melhorar a qualidade da energia fornecida.

Os resultados das simulações computacionais indicaram que a inclusão das baterias pode contribuir significativamente para o alívio de carga durante picos de demanda e para o controle da tensão em circuitos secundários de baixa tensão. Além disso, as baterias ajudaram a reduzir a elevação de tensão causada pelas GDs e a diminuição provocada pelos carregadores rápidos, absorvendo parte da potência gerada que seria despachada para a rede. Também forneceram um reforço positivo na tensão, injetando na rede a energia que foi armazenada ao longo do dia.

4 REFERÊNCIAS

- [1] C. Venu, Y. Riffonneau, S. Bacha and Y. Baghzouz, "Battery Storage System sizing in distribution feeders with distributed photovoltaic systems," 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1-5,
- [2] AMARAL,D.H.do;SINOHARA,R.Y.TCC(TrabalhodeConclusãodeCurso), Estudo de Caso do Banco de Baterias LiFePO4 250kW/500kWh instalada na UHE Sérgio Motta Rosana-SP. Rosana:[s.n.], 2022. 67p.

Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/17c4f5d3-a9f5-48e2-b425-f51149d02a15>.

- [3] SOUZA, J. Dissertação (Mestrado), Análise de sistemas de armazenamento de energia com baterias em uma rede real de distribuição de energia em média tensão. Belo Horizonte:[s.n.], 2020. Orientador:Wallace do Couto Boaventura. Disponível em: <<https://jaolsbdfaubdso>>.
- [4] Mohamed A. Awadallah, Bala Venkatesh, E. Tolentino, G. Thompson. "Pole-mounted battery energy storage for reliability enhancement of local distribution companies". *Journal of Energy Storage*, Vol.13, 2017, pp. 425-434.
- [5] V. M. Buiatti, C. Jose Nogueira Machado, L. B. de Mello, R. Nobis Da Costa Lima and J. R. Macedo, "Análise Técnica do Emprego de Armazenadores de Energia em Circuitos de Baixa Tensão para Realização de Serviço Ancilar de Regulação de Tensão," 2023 XV Brazilian Conference on Quality of Power (CBQEE), São Luiz, Brazil, 2023.
- [6] SILVA, Yáscara FFC; BORTONI, Edson C. Sistemas de armazenamento de energia elétrica em redes inteligentes: Características, oportunidades e barreiras. 2016.
- [7] Pereira, Jorge Magno Alves. "Impactos para a operação do sistema elétrico após a inserção massiva de micro e minigeração distribuída." 2022.