



**BESS E AUMENTO DA RESILIÊNCIA DO SIN: ESTRATÉGIA PARA INIBIÇÃO DE CORTE
DE CARGA EM ESQUEMAS ANTI-ILHAMENTO**
**BESS AND SIN RESILIENCE ENHANCEMENT: STRATEGY FOR LOAD SHEDDING
INHIBITION IN ANTI-ISLANDING SCHEMES**

Autores: Carlos Henrique dos Santos Silva¹, Lina Paola Garces Negrete²

¹UFG – eng.eletricista.carlos@gmail.com; ²UFG – lina_negrete@ufg.br

RESUMO

Este trabalho propõe e avalia uma solução inovadora para aumentar a resiliência e a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN) em áreas com alta penetração de geração intermitente. O foco do estudo é o Esquema Anti-Ilhamento na Subestação Santa Vitória do Palmar 2, região onde a contingência de desligamento das Linhas de Transmissão (LT) de 525 kV exige o corte da geração eólica e a interrupção de uma carga crítica de 20 MW para evitar instabilidade e danos aos equipamentos.

A metodologia empregada utiliza o software Organon para simulações de estabilidade dinâmica, comparando o cenário original de corte de carga com um cenário aprimorado. Nele, um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) de 20 MW é alocado no barramento de 138 kV. O BESS é modelado com controle de Formação de Rede (Grid-Forming) e recursos de Suporte Rápido de Frequência, integrando sua atuação à lógica do Esquema Especial de Proteção. Ao detectar a contingência, a atuação de corte de carga é inibida, e o BESS assume o suprimento integral da carga, transformando o evento em uma operação controlada de microrrede.

Os resultados esperados demonstrarão que a inclusão do BESS estabiliza a frequência e a tensão do sistema isolado, provando a viabilidade técnica da estratégia. Como conclusão, o estudo comprova que a alocação estratégica de BESS pode cessar o corte de carga de 20 MW, mitigando o impacto social e econômico das contingências e estabelecendo um novo paradigma para a segurança e otimização do SIN.

Palavras-chave: BESS; Anti-Ilhamento; Estabilidade Dinâmica; Organon; Resiliência.

ABSTRACT

This paper proposes and evaluates an innovative solution to increase the resilience and reliability of the National Interconnected System (SIN) in areas with high intermittent generation penetration. The study focuses on the Anti-Islanding Scheme at the Santa Vitória do Palmar 2 Substation, a region where the 525 kV Transmission Line (TL) shutdown contingency requires the shutdown of wind generation and the interruption of a critical 20 MW load to avoid instability and equipment damage.

The methodology uses Organon software for dynamic stability simulations, comparing the original load shedding scenario with an improved scenario. In this scenario, a 20 MW Battery Energy Storage System (BESS) is located on the 138 kV bus. The BESS is modeled with Grid-Forming control and Fast Frequency Support capabilities, integrating its operation with the logic of the Special Protection Scheme. Upon detecting a contingency, load shedding is inhibited, and the BESS assumes full load supply, transforming the event into a controlled microgrid operation.



The expected results will demonstrate that the inclusion of the BESS stabilizes the frequency and voltage of the isolated system, demonstrating the technical feasibility of the strategy. In conclusion, the study proves that the strategic allocation of BESS can halt a 20 MW load shedding, mitigating the social and economic impact of contingencies and establishing a new paradigm for the safety and optimization of the SIN.

Keywords: BESS; Anti-Islanding; Dynamic Stability; Organon; Resilience.

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é uma complexa e vasta rede que, pela sua própria dimensão, está constantemente sujeita a perturbações e falhas. É nesse contexto que os Esquemas Especiais de Proteção (SEP), também conhecidos como esquemas especiais (englobando os Esquemas de Controle de Emergência - ECE e os Esquemas de Controle de Segurança - ECS), assumem um papel de crucial importância para a segurança e estabilidade da operação do sistema elétrico brasileiro.

Esses esquemas são sistemas de controle e proteção automáticos, projetados para detectar condições operativas pré-determinadas ou ocorrência de contingências (como o desligamento de linhas de transmissão ou geradores) e executar ações corretivas rápidas, muitas vezes em tempos muito inferiores à capacidade de resposta humana.

A principal função dos esquemas especiais é preservar a integridade do SIN, limitando o impacto de falhas e evitando que uma perturbação simples se alastre, causando a perda de estabilidade, grandes colapsos de tensão ou até mesmo um blecaute em cascata.

Principais Contribuições dos Esquemas Especiais:

- **Mitigação de Riscos:** Atuam como uma camada de segurança adicional, complementando as proteções de componentes individuais. Eles realizam ações como desligamento de geração, corte de carga ou manobras de chaves para reequilibrar o sistema após uma contingência, minimizando o risco de interrupções de grande porte.
- **Confiabilidade e Desempenho:** Permitem que o sistema opere de forma mais otimizada e próxima dos seus limites de capacidade, garantindo a confiabilidade mesmo em pontos onde o critério tradicional de segurança (o N-1, que garante a operação após a falha de um único componente) não seria suficiente.

Em suma, os esquemas especiais são ferramentas indispensáveis na coordenação e controle do ONS, assegurando que, mesmo diante da complexidade e da inevitabilidade de falhas em um sistema tão extenso, o fornecimento de energia seja mantido com a máxima segurança e qualidade para o consumidor.

1.1 Esquema Anti-Ilhamento no Complexo Eólico de Santa Vitória do Palmar

A integração de grandes parques de energia eólica em regiões com menor densidade de carga e conexões longas de transmissão exige soluções de proteção especializadas. Um exemplo notório é o esquema de anti-ilhamento aplicado ao Conjunto Eólico Marmeleiro 2 e/ou Conjunto Eólico Santa Vitória do Palmar em relação à carga local atendida pela Subestação (SE) Santa Vitória do Palmar 2 [1].

Finalidade do Esquema

O objetivo primário deste esquema é evitar a operação em ilha (ilhado) dos complexos eólicos juntamente com a carga da distribuidora (CEEE-D) que é suprida pelos transformadores TF1 e TF2 (525/138/13,8 kV) da SE Santa Vitória do Palmar 2 [1].



A condição crítica para atuação ocorre quando há o desligamento das Linhas de Transmissão (LT) de 525 kV que conectam a SE Povo Novo e a SE Santa Vitória do Palmar 2. Nesses casos, a geração eólica (Marmeleiro 2 e Santa Vitória do Palmar) poderia ficar isolada do restante do SIN, alimentando a carga local. Essa condição é perigosa, pois a ausência de controle sistêmico pode levar a sérios problemas operacionais, como a perda de estabilidade, grandes sobretensões e sobrecorrentes que danificariam equipamentos sensíveis, como os transformadores das subestações a jusante (Chuí, Hermenegildo e Geribatu) e os próprios aerogeradores.

Mecanismos de Atuação

Para prevenir o ilhamento e proteger os equipamentos, o esquema atua de forma coordenada em duas grandes categorias de contingência:

Desligamento das LT 525 kV Marmeleiro 2 / Santa Vitória do Palmar 2 (C1 e C2)

A abertura desses circuitos de transmissão deflagra um conjunto de ações automáticas e simultâneas para garantir o desligamento total da geração eólica e o isolamento da carga:

Localização	Atuação do Esquema	Efeito
SE Santa Vitória do Palmar 2	Abertura das LT 138 kV Chuí, Geribatu e Hermenegildo / Santa Vitória do Palmar 2.	Corte total da Geração Eólica Santa Vitória do Palmar.
SE Chuí, Geribatu e Hermenegildo	Abertura das LT 138 kV (ligadas a SVP2) e do lado de 138 kV dos transformadores.	Corte da geração eólica ligada a essas subestações.
SE Santa Vitória do Palmar 2	Abertura do lado de 525 kV e 138 kV dos transformadores TF1 e TF2 (525/138/13,8 kV).	Interrupção das cargas supridas pelo barramento de 138 kV.

1.2 O Software Organon e a Modelagem de Bancos de Baterias (BESS)

O Organon, desenvolvido pela HPPA (High Performance Power System Applications), é uma plataforma de software de ponta utilizada para o planejamento e a operação de sistemas de energia [2]. No contexto brasileiro, é uma ferramenta crucial para a análise de segurança estática e dinâmica do Sistema Interligado Nacional (SIN), permitindo estudos detalhados de fluxo de potência, estabilidade transitória e regimes de longa duração [3].

O valor do Organon reside na sua capacidade de simular o sistema com modelos detalhados e de alta fidelidade, essenciais para prever o comportamento da rede frente a perturbações e avaliar a eficácia dos Esquemas Especiais de Proteção (SEP).

Modelagem de Baterias (BESS)

A modelagem de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) no Organon vai muito além de representá-lo como uma simples fonte (gerador) ou dreno (carga). Dada a rapidez e a complexidade do controle desses dispositivos, a representação foca principalmente em seus aspectos dinâmicos e de controle:

Modelo do Conversor (PCS): O componente mais importante é o Sistema de Conversão de Potência (PCS), que conecta a bateria à rede. Ele é modelado para capturar sua capacidade de controlar, de forma rápida e independente, a potência ativa (P) injetada ou absorvida e a potência reativa (Q) fornecida ao sistema. O modelo deve incorporar os limites físicos de corrente e tensão do inversor.



Controles de Estabilidade: Para a simulação de estabilidade dinâmica, o Organon utiliza modelos que representam a lógica de controle do BESS. Esses modelos definem como o sistema reage a eventos na rede, simulando recursos essenciais para a segurança do SIN, como:

- I. **Suporte Rápido de Frequência:** A capacidade da bateria de injetar ou absorver potência em milissegundos para conter desvios de frequência.
- II. **Amortecimento de Oscilações:** A atuação da bateria como um Estabilizador de Sistema de Potência (PSS) para mitigar oscilações de baixa frequência.
- III. **Estado de Carga (SOC):** Para simulações de longa duração, o modelo inclui a representação do Estado de Carga (SOC) da bateria, garantindo que os limites de energia armazenada sejam respeitados e que a disponibilidade de potência (P_{max}) do BESS seja corretamente considerada ao longo do tempo de simulação.

Em suma, a modelagem de BESS no Organon permite que os operadores e planejadores avaliem com precisão o potencial dessas tecnologias para aumentar a flexibilidade e a resiliência do SIN, garantindo que o sistema possa absorver grandes contingências sem comprometer a estabilidade.

2 METODOLOGIA

O presente estudo baseia-se na simulação da contingência crítica do esquema anti-ilhamento da SE Santa Vitória do Palmar 2, comparando a atuação do Esquema Especial de Proteção (SEP) original com uma solução aprimorada que incorpora um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) para sustentar a carga. As simulações serão realizadas no software Organon, utilizando modelos de alta fidelidade para a análise de estabilidade dinâmica.

Cenário 1: Atuação do Esquema Especial com o desligamento dos circuitos MRO2/SPA2 C1 e C2 (sem Bateria)

O cenário base simula a topologia da rede na região de Santa Vitória do Palmar, conforme o modelo simplificado apresentado na Figura 1 (Antes).

- **Topologia da Rede:** Foco na SE Santa Vitória do Palmar 2, que conecta o Complexo Eólico (Marmeleiro 2 e Santa Vitória do Palmar) ao SIN via LT 525 kV e supre a carga local.
- **Carga Crítica:** A carga atendida pela distribuidora (CEEE-D), suprida pelos transformadores TF1 e TF2 da SE, será modelada com um valor representativo de 20 MW. No esquema original, esta carga é interrompida após a atuação do SEP.
- **Contingência Crítica:** Será simulado o desligamento das Linhas de Transmissão (LT) 525 kV entre Marmeleiro 2 e Santa Vitória do Palmar 2 (C1 e C2), que é a condição necessária para o ilhamento.
- **Ações do SEP:** O modelo simulará a atuação do SEP original, resultando no corte da geração eólica do Complexo Santa Vitória do Palmar e na subsequente interrupção da carga local. Esta simulação confirmará a instabilidade e o corte de carga como resultado inevitável no cenário tradicional.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

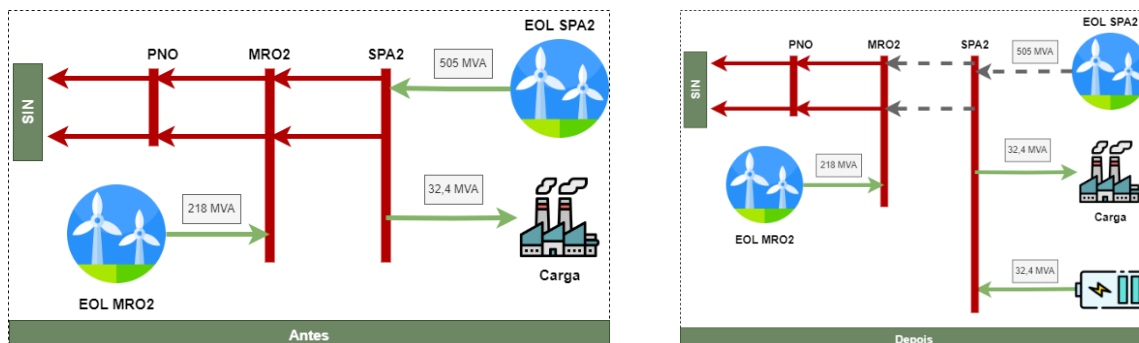


Figura 1 - Modelo simplificado do Sistema considerando condição pré e pós atuação do Esquema Especial

Cenário 2: Atuação do Esquema Especial com o desligamento dos circuitos MRO2/SPA2 C1 e C2 (com Bateria)

Para otimizar a resiliência do sistema e evitar o corte de carga, será integrado um BESS no barramento de 138 kV da SE Santa Vitória do Palmar 2, conforme ilustrado na Figura 1 (Depois).

- Capacidade do BESS: O banco de baterias será dimensionado com uma potência ativa mínima de 20 MW, além de potência reativa (Q) e capacidade de energia (SOC) suficientes para manter a operação em ilha da carga durante o tempo de análise.
- Modelagem Dinâmica: O BESS será representado no Organon através de modelos detalhados, incluindo o Sistema de Conversão de Potência (PCS), que permite o controle rápido e independente de potência ativa (P) e reativa (Q).
- Lógica de Controle e Operação em Ilha: O principal diferencial metodológico reside na alteração da lógica de atuação do SEP.
- Transição Controlada: Após o desligamento das LT 525 kV, o BESS será imediatamente ativado com controle de formação de rede (Grid-Forming) no barramento de 138 kV.
- Inibição do Corte de Carga: A lógica do SEP será modificada para inibir a abertura dos transformadores TF1 e TF2 (corte de carga), mantendo os 20 MW conectados e sob o suprimento do BESS.

O fluxograma simplificado da nova atuação coordenada é detalhado na Figura 2.

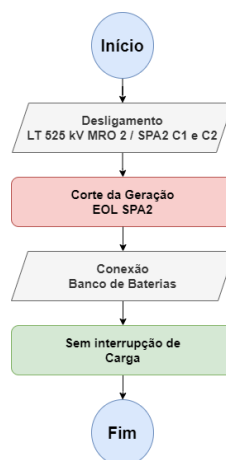


Figura 2 - Fluxograma simplificado da atuação do Esquema Especial



3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados das simulações de estabilidade dinâmica realizadas no software Organon. O objetivo é comparar o comportamento do sistema sob a contingência crítica do esquema anti-ilhamento (desligamento dos circuitos LT 525 kV MRO2/SPA2 C1 e C2), contrastando o cenário original de corte de carga com a solução proposta de integração do BESS.

Cenário 1: Atuação do Esquema Especial com o desligamento dos circuitos MRO2/SPA2 C1 e C2 (sem Bateria)

O Cenário 1 reproduz a atuação do Esquema Especial de Proteção (SEP) sem a otimização do BESS. A simulação aplica um curto-circuito no barramento no momento $t=0.2$ s e, posteriormente, simula o desligamento dos dois circuitos de 525 kV no momento $t=0.3$ s.

- **Corte de Geração Eólica:** A Figura 3 ilustra o comportamento da potência ativa gerada pelo Complexo Eólico SPA2. Antes do evento, a geração eólica operava em aproximadamente $P(MW)_{EOL\ SPA2} = 368\ MW$. Após o desligamento dos circuitos, o SEP atua, levando a geração a $P(MW)_{EOL\ SPA2} \approx 0\ MW$, cumprindo seu papel de eliminar o potencial de ilhamento através do corte total da geração.

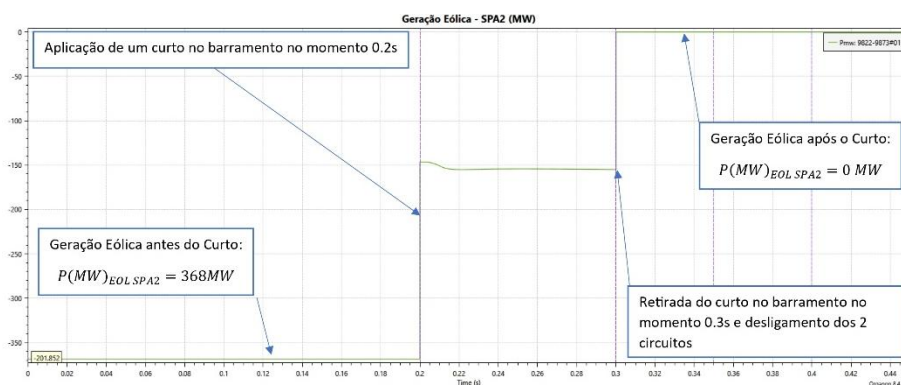


Figura 3 - Corte de Geração Eólica em SPA2 após atuação do Esquema Especial

- **Consequência na Carga (Corte Imediato):** Em paralelo à atuação de corte de geração, o SEP original executa a interrupção da carga crítica suprida pelo barramento de 138 kV. Conforme detalhado na Figura 4, a carga inicial de $P(MW)_{Carga\ SPA2} = 16.31\ MW$ é totalmente cortada, caindo para $P(MW)_{Carga\ SPA2} \approx 0\ MW$. Este resultado confirma a necessidade de interrupção da carga local para proteger o sistema contra a instabilidade decorrente do ilhamento.

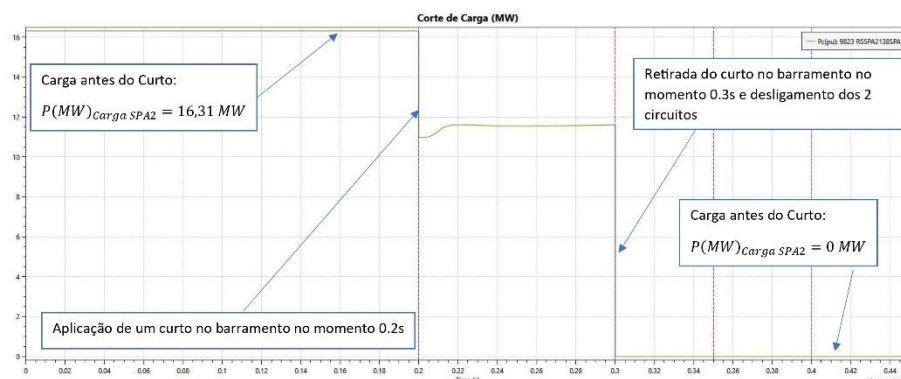


Figura 4 - Corte de Carga após atuação do Esquema Especial

Cenário 2: Atuação do Esquema Especial com o desligamento dos circuitos MRO2/SPA2 C1 e C2 (com Bateria)

O Cenário 2 integra o BESS de 20 MW no barramento de 138 kV com o objetivo de inibir o corte da carga. A lógica do SEP é modificada para que, após a contingência (desligamento das LT 525 kV), o BESS seja ativado com controle de Formação de Rede (Grid-Forming), assumindo o suprimento da carga local. O fluxograma simplificado desta nova atuação é visto na Figura 2.

- **Comportamento da Carga com BESS:** A Figura 5 demonstra o desempenho do sistema sob a nova lógica. Embora o processo de corte de geração eólica ocorra conforme o Cenário 1, a interrupção da carga é evitada.
- **Sustentação da Carga:** O gráfico mostra que, após a retirada do curto-circuito no momento $t=0.3$ s e o desligamento dos circuitos, o banco de baterias assume o suprimento de forma imediata e controlada. A potência da carga, após um breve transiente, retorna ao seu nível original de $P(MW)_{Carga\ SPA2} = 16.31\ MW$. Este resultado demonstra o sucesso da estratégia em cessar o corte de carga, mantendo o fornecimento de energia à carga crítica local.

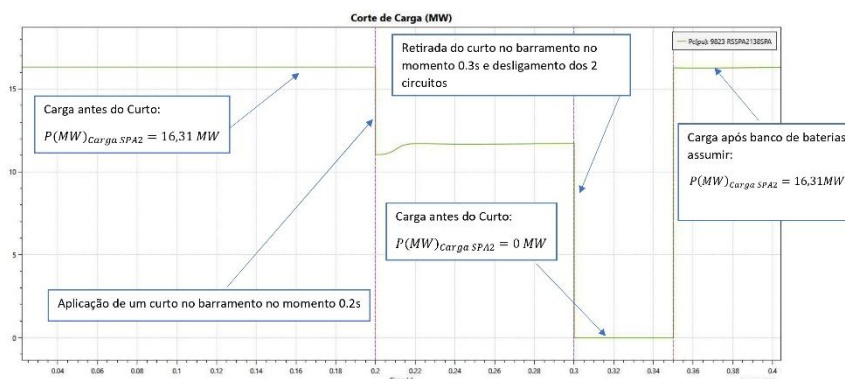


Figura 5 - Comportamento da Carga com Bateria

O BESS atua como um sistema de suporte dinâmico, garantindo que os parâmetros de frequência e tensão se mantenham dentro dos limites operacionais no barramento de 138 kV durante a operação em microrrede, evitando os problemas de instabilidade que motivavam a atuação do SEP tradicional.



4 CONCLUSÕES

Este trabalho alcançou seu principal objetivo ao comprovar a viabilidade técnica da integração de um Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) para mitigar o corte de carga em Esquemas Especiais de Proteção (SEP) de anti-ilhamento. As simulações realizadas no software Organon demonstraram que, após a contingência crítica de desligamento das LT 525 kV, o BESS de 20 MW com controle Grid-Forming assume o suprimento da carga local de 16.31 MW, inibindo a interrupção de energia que seria mandatória no cenário original. Este resultado valida o BESS como uma ferramenta crucial para aumentar a resiliência e a segurança operacional do SIN.

Como próximos passos, o estudo se concentrará no aprofundamento da modelagem dinâmica do BESS no software Organon. Será conduzida uma análise detalhada do comportamento da frequência do sistema isolado, garantindo que a atuação coordenada do BESS e do SEP mantenha este parâmetro dentro dos limites regulatórios após a ocorrência da contingência.

REFERÊNCIAS

- [1] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. IO-EE.S.5SU - Esquemas Especiais da Área 525 kV da Região Sul. Rio de Janeiro: ONS, [S.d.]. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-ons/procedimentos-de-rede/mpo>. Acesso em: 28 set. 2025.
- [2] ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. RT-CT.BR.01 - Conceitos e entendimento da Região de Segurança para uso em Tempo Real. Rio de Janeiro: ONS, [S.d.]. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-ons/procedimentos-de-rede/mpo>. Acesso em: 28 set. 2025.
- [3] OLIVEIRA, Amanda Fernandes de. Abordagem probabilística para análise de estabilidade transitória em sistemas de grande porte. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2019.