



Sugestões para o Planejamento Baseadas em Resultados de Estudos Elétricos Incluindo BESS

PD 10733-0222/2023

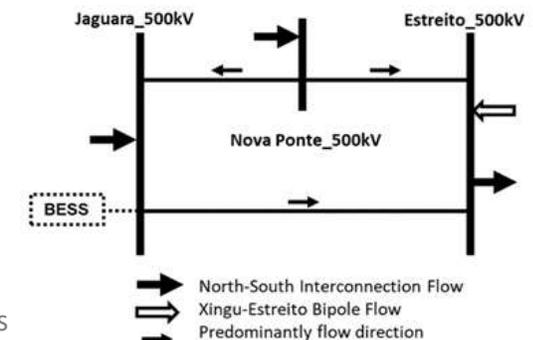
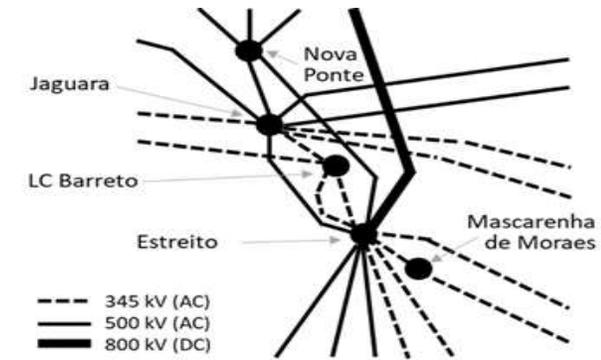
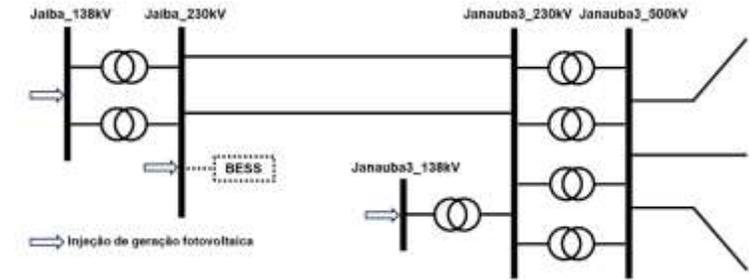
Pesquisa de aplicação de sistemas de armazenamento de energia de baterias (BESS) no sistema de transmissão.

Equipe

Roberto Brandão Fabio Diuana Murilo Miranda

Estudos Realizados - Regime Permanente

- Focado na área do **Norte de MG** (Cenários do horizonte 2028 do PAR/PEL 2023)
- **Fluxo Local de Geração Fotovoltaica:** Como o sistema de transmissão poderia lidar e aumentar a demanda por conexão de nova geração fotovoltaica na área
- **A Interligação Norte-Nordeste-Sudeste:** análise da solução da interação da geração local na região MG com o grande fluxo de energia das regiões N e NE através da Interligação CA e dos bipolos HVDC
- **Resultados:**
 - Uso de BESS para mitigar o efeito de contingências tem potencial para competir com outras soluções, como o redespacho de geração, do fluxo no bipolos e intercâmbios, além da expansão do sistema de transmissão
 - Do ponto de vista econômico, com os custos atuais das baterias, a solução monofuncional ainda não é competitiva
- **Publicação:**
D.M. Falcão, S. Tao, G.N. Taranto, et al., "Case Studies of Battery Energy Storage System Applications in the Brazilian Transmission System", *Energies*, v. 17, p. 5678, 2024.



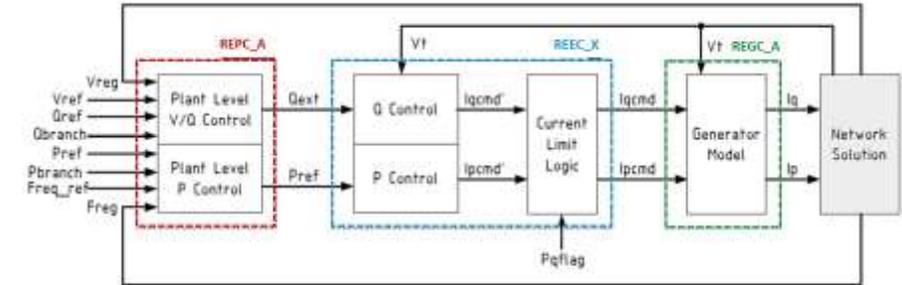
Estudos Realizados – Comportamento Dinâmico

- **Modelo de BESS**, desenvolvido pela equipe do projeto, baseado no modelo WECC genérico, implementado no programa ANATEM via controlador definido pelo usuário
- Avaliação do Modo de **Controle de Frequência**
- Avaliação dos Modos de **Controle de Tensão** e de Potência Reativa
- Avaliação do uso do BESS no sistema HVDC **Multi-Infeed** do Sudeste
- Análise de **Contingências Múltiplas nas Interligações** entre os Subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste do SIN
- Avaliação do uso do BESS para Minimizar os Efeitos da Alta Geração Fotovoltaica na Demanda Diária da Carga

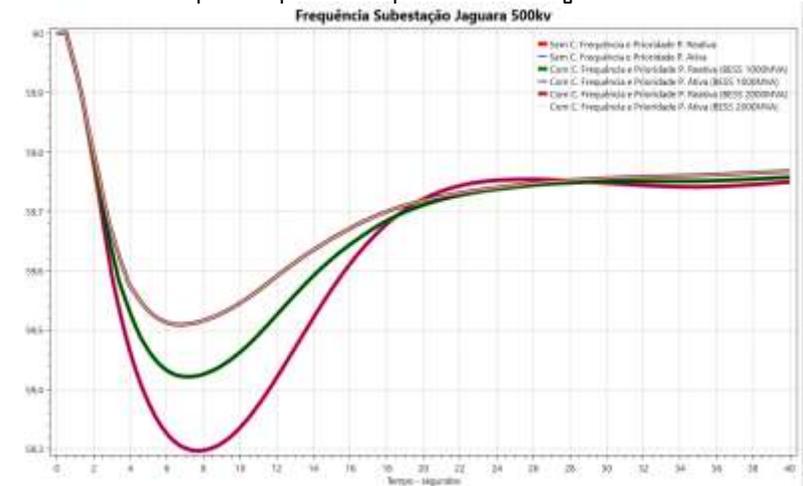
Publicações:

G.N. Taranto, S. Tao, D.M. Falcão, et al., "Value Stacking BESS Grid Services in Hybrid AC/DC Bulk Power Systems", em preparação para submissão ao *Sustainable Energy, Grid and Networks Journal*.

G.N. Taranto, S. Tao, D.M. Falcão, et al., "Utilização de Sistema Especial de Proteção Baseado em Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias para Solucionar Contingências HVAC/HVDC no Sistema Interligado Nacional", resumo submetido ao *SNPTEE 2025*.



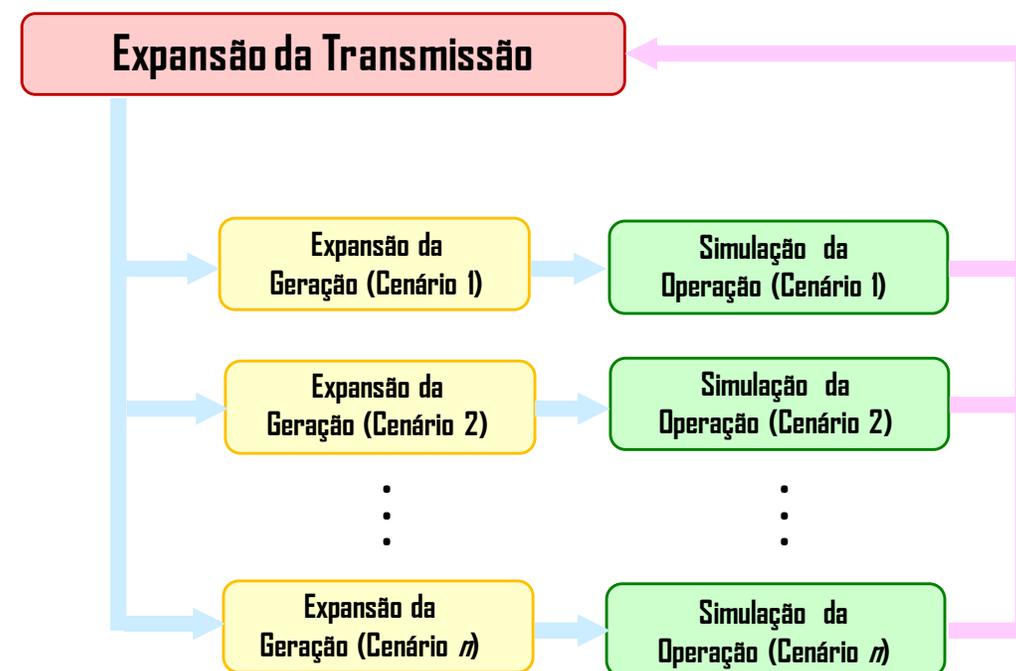
Resposta rápida da frequência na SE Jaguarua 500kv



Planejamento Proativo da Transmissão

- O planejamento determinativo da expansão da transmissão deve ser tal que **acomode múltiplos cenários** de expansão da geração e, se possível, induza positivamente as opções de geração
- Antecipar a expansão da infraestrutura de transmissão promovendo um **ambiente competitivo e imparcial** para a conexão dos geradores à rede de transmissão
- Requisito Básico: **Flexibilidade**
 - Armazenamento (UHR e **BESS**)
 - HVDC
 - FACTS, Compensadores Estáticos e Síncronos
 - Dynamic line rating
 - Controle topológico
 - Etc.
- Modelos usados nos estudos de expansão da transmissão devem conter as opções de flexibilidades para permitir uma otimização abrangente de possibilidades

Co-otimização



Redução do Congestionamento do Sistema de Transmissão

- Particularmente adequado para **atendimento de contingências**
- Estudos de regime permanente e dinâmico indicaram efetividade do BESS para garantir desempenho adequado no caso de contingências (N-1) do sistemas de transmissão
- Tempo de descarga das baterias relativamente baixo (1h a 2h), enquanto o operador atende a contingencia por outros meios
- Pode representar economia na expansão dos sistema de transmissão em muitos cenários

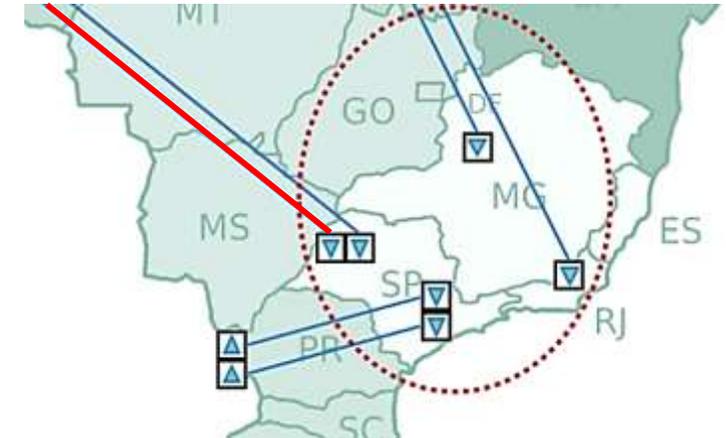
Netzbooster (Grid Booster)

TransnetBW GmbH, Alemanha

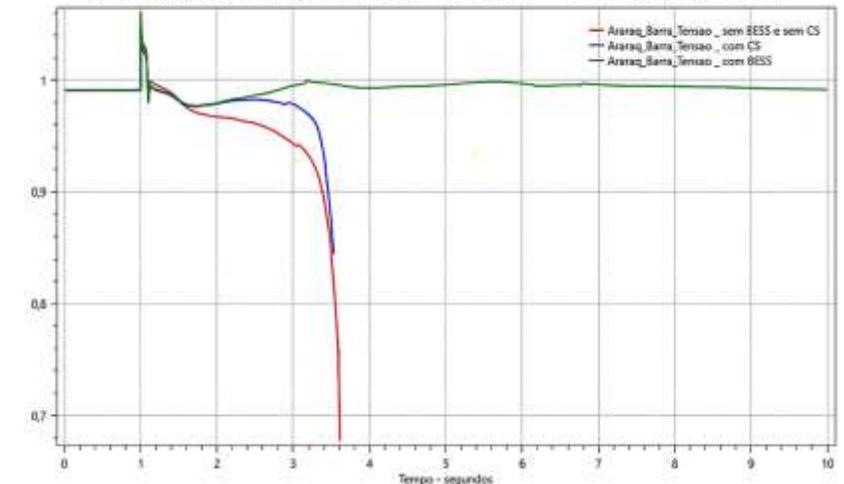
- 250 MW / 250 MWh, lithium-ion
- Localizado em Kupferzell, Baden-Württemberg,
- Previsão de conclusão em **janeiro de 2025**
- O maior projeto de armazenamento de energia do mundo como ativo de transmissão
- Implantado pela Fluence Energy GmbH (uma empresa Siemens e AES)
- Vantagens
 - Reduz a necessidade de reforço de rede convencional e custos operacionais
 - Aliviar os estrangulamentos decorrentes do transporte de energia eólica do norte da Alemanha para os centros de carga do sul do país
 - Reação em milissegundos para fornecer capacidade de backup para manter a estabilidade do sistema de energia em caso de falha na rede de transmissão (N-1)

Estabilização do Sistema HVDC Multi-Infeed

- Os resultados obtidos mostram que o desempenho de Compensadores Síncronos e BESS são equivalentes no desempenho do sistema para **falhas de comutação**
- Simulações do **desligamento de um bipolo** do elo de corrente contínua das usinas do Rio Madeira:
 - O objetivo dessa simulação foi causar um déficit de geração de carga de 3GW de potência ativa na região sudeste
 - Foram comparados: **sistema original**, **sistema com BESS** e **sistema com CS**. Esses equipamentos estavam instalados das subestações inversoras dos Elos HVDC (Ibiúna, Araraquara, Estreito e Terminal Rio). Foram utilizados quatro equipamentos (BESS ou CS) de 250MVA, totalizando 1000MVA.
 - Apenas os BESS são capazes de realizar a injeção de potência ativa que o SIN precisou após a contingência, uma vez que esses equipamentos possuem a capacidade de fornecimento de potência ativa por certo período de tempo (enquanto possuem carga).

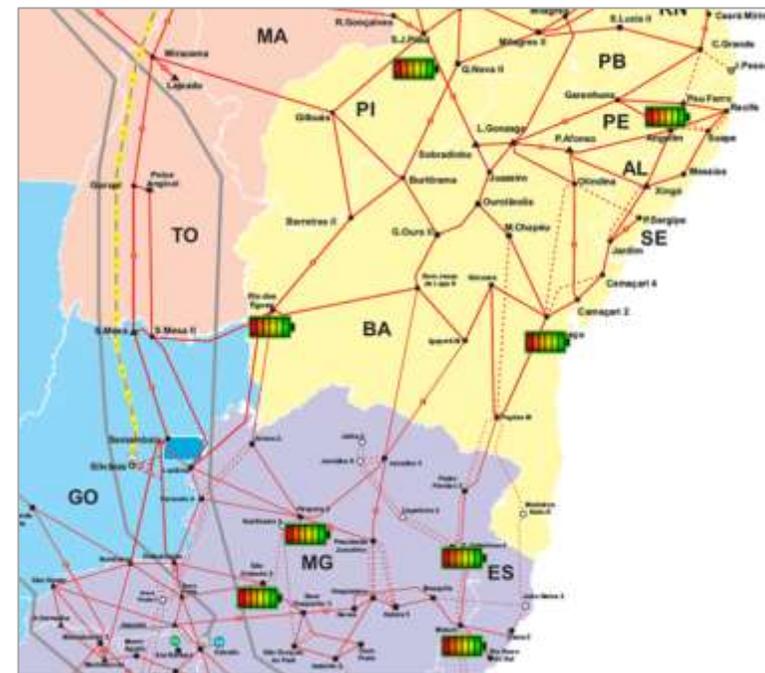


Perda de Bipolo P. Velho – Araraquara



Análise de Contingências Múltiplas nas Interligações

- Simulação de contingências múltiplas, que podem levar à separação parcial dos subsistemas Norte, Nordeste e Sudeste/Centro-Oeste, exemplificando um colapso do sistema ou até um blecaute
- Soluções analisadas incluem:
 - Instalações de compensadores síncronos em subestações de 500 kV
 - Instalações de BESS em algumas subestações
 - Solução instalando **BESS** e ativando **SEPs** em algumas subestações de 500 kV (após 200 ms do desligamento da última LT, as baterias localizadas no SE injetam potência máxima)
- A implementação de BESS, associado ao conceito dos SEPs, demonstra ser uma solução técnica interessante para a mitigação de falhas severas em linhas de transmissão críticas, oferecendo uma estratégia robusta e flexível para dar suporte à operação segura e estável do sistema



| Eventos | Valor (MW) | Capacidade Normal (MW) |
|--|-----------------|------------------------|
| Abertura de LT 500 kV Quixadá - Fortaleza II | 415 | 2870 |
| LT 500 kV P. Dutra - B. Esperança em P. Dutra | 331 | 1731 |
| LT 500 kV P. Dutra - Teresina II C1 e C2 e LT | 2646 | 3x2123 |
| LT 500 kV P. Dutra - Imperatriz C2 | 861 | 1993 |
| LT 500 kV Miracema - Gilbués III | 251 | 3541 |
| Seperação 230 kV entre M. Aguiar - Barroquinha C2 e C3 | 68 e 50 | 323 e 174 |
| Seperação 230 kV Teresina II - B. Esperança C1 e C2 | 2167 | 2x239 |
| LT 500 kV Fozes III - Padre Paraisé C1 e C2 | 646 e 632 | 3x2500 |
| Seperação 500 kV entre R. Gonçalves - Colinas C1 e C2 | 421, 403 | 3x1992 |
| LT 500 kV S.S. Piauí - C1 IV Nova Olímpia C1 | 394 | 2346 |
| LT 500 kV Gilbués II - Barroquinha | 404 | 2562 |
| LT 500 kV Gilbués II - S.S. Piauí | 451 | 2400 |
| LT 230 kV Gilbués II - Bom Jesus II | 21 | 227 |
| LT 230 kV Diandara II - Barroquinha II | 21 | 597 |
| LT 500 kV Sapucaia - Itiroze | 305 | 1920 |
| LT 230 kV Sapucaia - Mangabeira C1, C2 e C3 | 302, 110 e 300 | 3x251 |
| LT 230 kV Sapucaia - S. Antônio de Jesus C1 e C2 | 3x388 | 3x319 |
| LT 230 kV Sapucaia - Puntal | 231 | 231 |
| LT 500 kV Gumpi - Pires II | 811 | 2851 |
| Tranço 500 kV Gumpi - Miracema | 990, 250 e 1896 | 2473, 3x2536 |
| TOTAL | 40380 | |

Uso de BESS para Atender a Rampa de Carga Causada por Geração Fotovoltaica em MG

- **Avaliação Energética:** problema de otimização

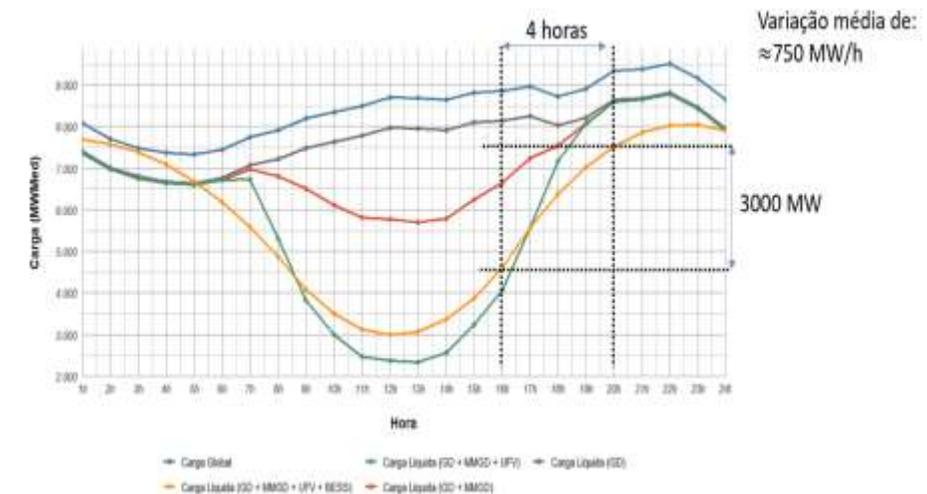
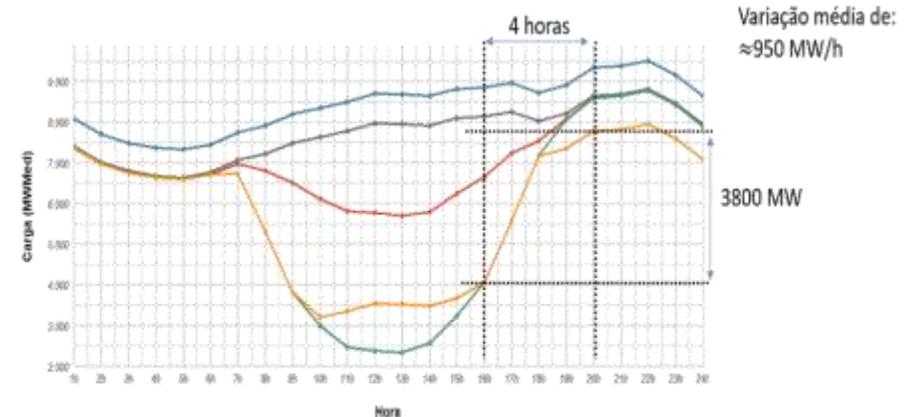
- Compensação da Geração Variável
- Rastreo da Carga Média (*Flat*)
- Compensação da Derivada da Carga

- **Avaliação Elétrica**

- Avaliações de **fluxo de potência** em intervalos horários, com 24 avaliações distintas, uma para cada hora do dia

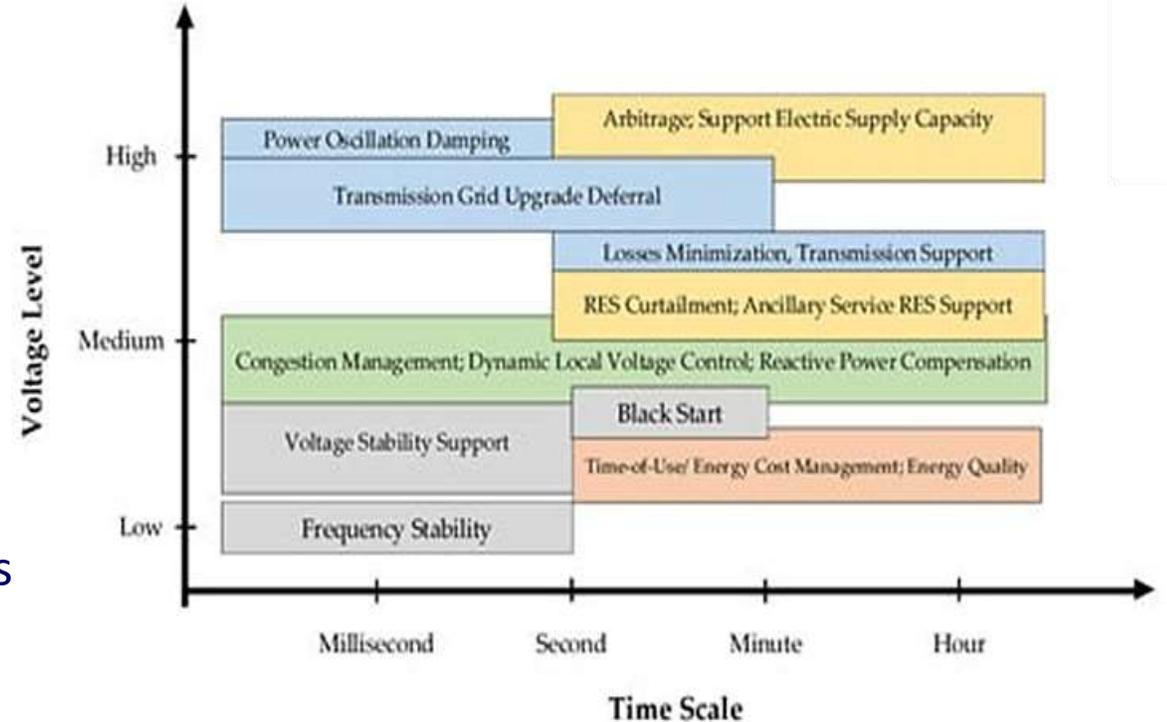
- **Resultados**

- As análises energéticas e elétricas realizadas confirmam que o uso de BESS é uma solução eficaz para atenuar as variações da curva de carga causadas pela inserção crescente de geração fotovoltaica no SIN, notadamente no estado de Minas Gerais.
- A avaliação energética mostrada mais eficiente foi a Compensação da Derivada da Carga



Conclusões

- Os estudos elétricos conduzidos no âmbito deste projeto indicam o **grande potencial** dos BESS como **elemento de reforço e flexibilidade** dos sistemas de transmissão
- Desta forma os BESS devem ser incluídos como opção de expansão
- A comparação de custo ainda é desfavorável aos BESS em uma análise monofuncional
- Deve-se levar em consideração, porém, que os BESS apresentam características de **multifuncionalidade**, que poderia gerar benefícios acumulados que poderiam viabilizar economicamente sua aplicação: **empilhamento de receita**
- **A capacidade, localização e escala de tempo dos BESSs é um desafio a ser vencido.**



DEBATE



Obrigado!

djalmafalcao@coppe.ufrj.br

COPPE/UFRJ

Programa de Engenharia Elétrica
Centro de Tecnologia, Bloco H, Sl. 341
21941-972 Rio de Janeiro RJ