



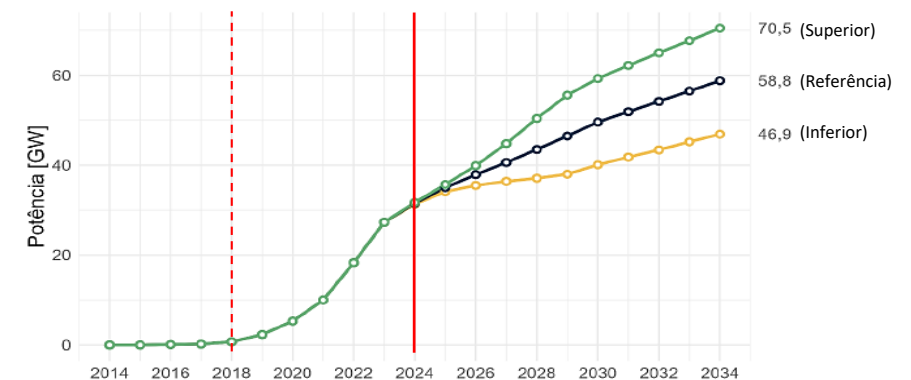
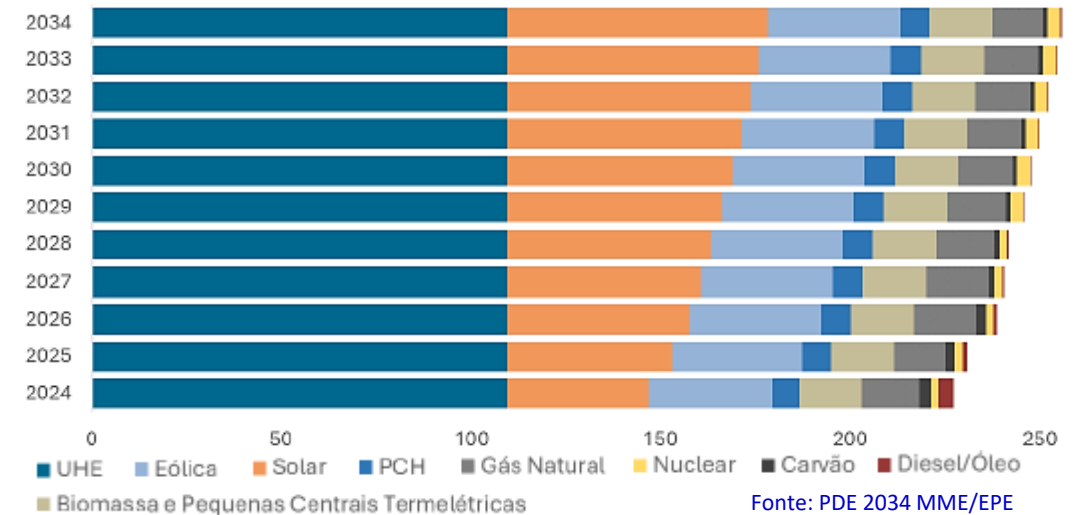
Impactos das Novas Tecnologias de Geração e Armazenamento no Sistema Elétrico Brasileiro

Djalma Falcão

COPPE
UFRJ

Cenários de Mudanças no SEB

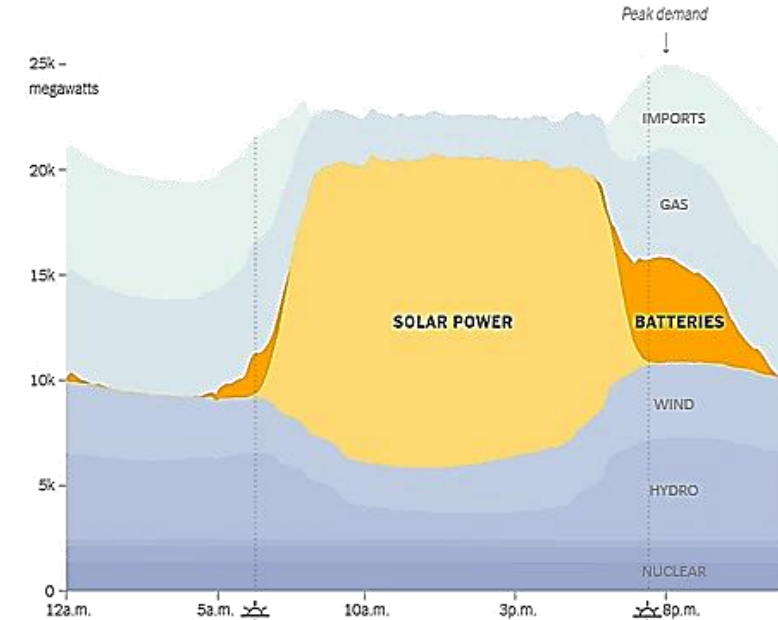
- **Grandes alterações na estrutura física nos últimos 25 anos**
 - Crescimento acentuado da Geração Renovável Variável (GRV)
 - Crescimento explosivo da Mini e Micro Geração Distribuída (MMGD)
- **Novas Tecnologia Chegando**
 - Eólica Offshore
 - Hidrogênio
 - Data Centers
 - Veículos Elétricos
 - Liberalização do Mercado Varejista de Energia
- **Problemas**
 - Atendimento à ponta e rampas de carga
 - *Curtailment*
 - Controle e estabilidade de sistemas dominados por inversores eletrônicos



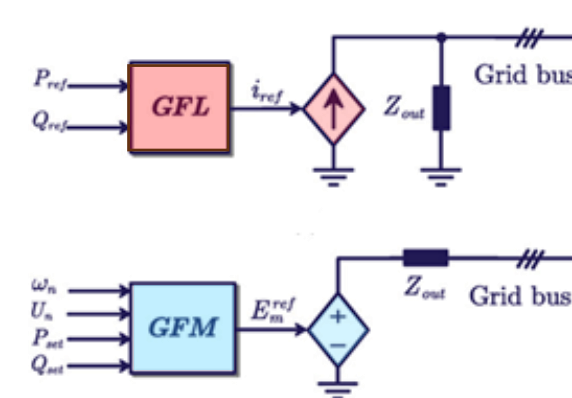
Capacidade Instalada de MMGD por cenário (Fonte: PDE 2034 MME/EPE)

Tecnologias Mitigatórias

- **Armazenamento**
 - Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS)
 - Larga escala
 - Atrás dos medidores
 - Usinas Hidrelétricas Reversíveis (UHR)
 - Outros (?)
- **Eletrônica de Potência**
 - Conversores
 - *Grid Following (GFL)*
 - *Grid Forming (GFM)*
 - Compensadores Estáticos com Armazenamento
 - STATCOM
 - HVDC-VSC
- **Operador dos Sistemas de Distribuição (OSD/DSO)**
 - Agregadores
 - Microrredes e VPPs



Fonte: B. Plumer and N. Popovich, "Giant Batteries Are Transforming the Way the U.S. Uses Electricity", *New York Times*, May 7, 2024.



Fonte: X. Ji, D. Liu, K. Jiang, Z. Zhang, and Y. Yang, "Small-Signal Stability of Hybrid Inverters with Grid-Following and Grid-Forming Controls", *Energies*, March 2024.

Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) no Sistema de Transmissão



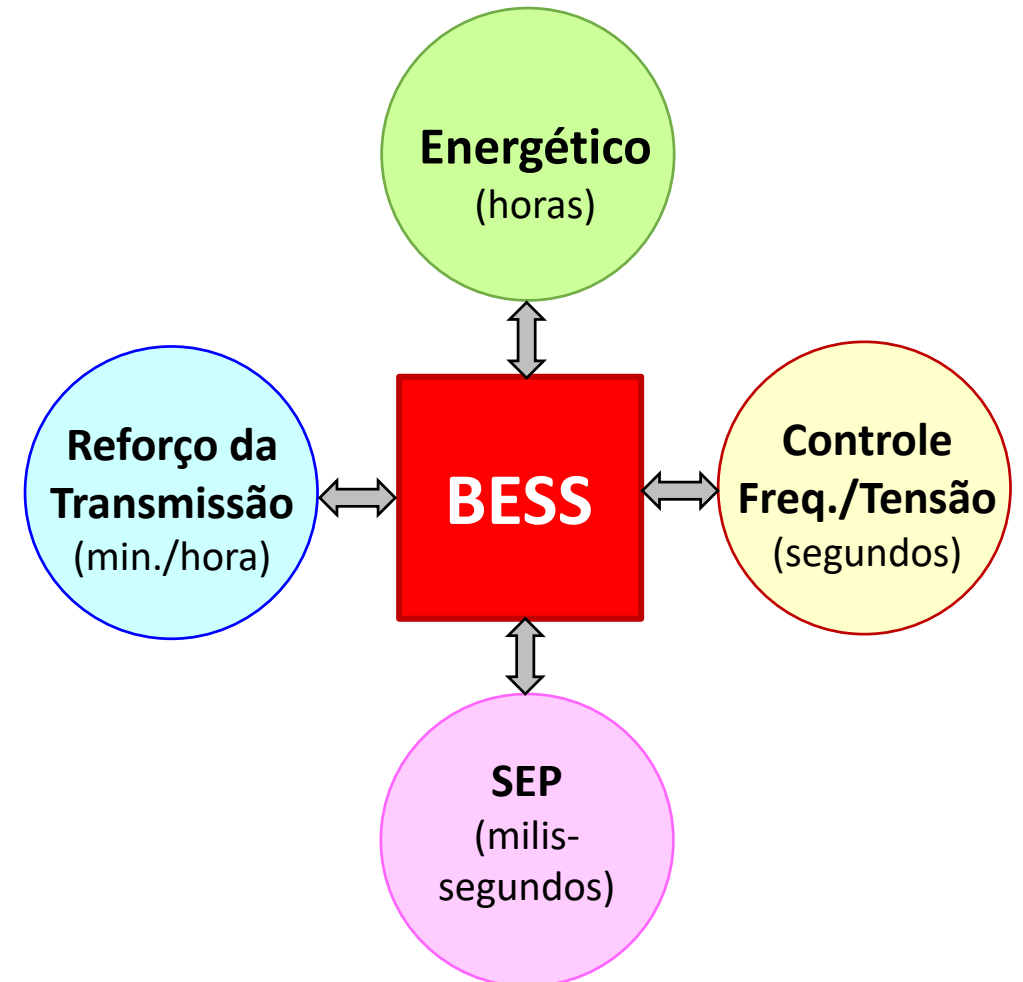
- Patrocinador



STATE GRID
BRAZIL HOLDING S.A.
国家电网巴西控股公司

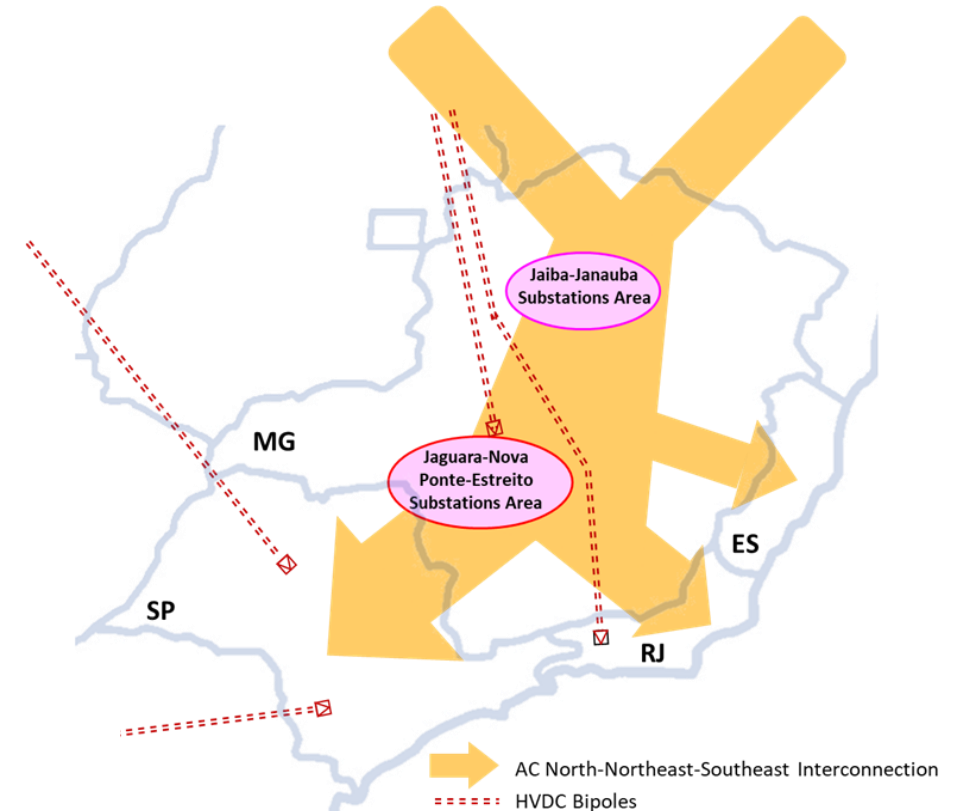
- Executores:

- **GESEL**: coordenação, estudos energéticos, econômicos e regulatórios
 - **COPPE/UFRJ**: estudos elétricos (regime permanente e dinâmicos)
 - **Membros do INERGE**
 - Glauco Taranto
 - Djalma Falcão
 - **EPPEI**: BESS Adjacente a um Centro de Carga e em Black-start com Elos LCC-HVDC
- **Duração**
 - 18 meses
 - Finalização dezembro 2024



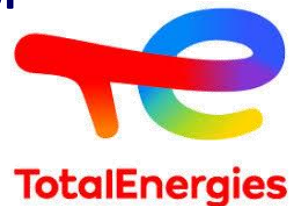
Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) no Sistema de Transmissão (cont.)

- **Estudos de regime permanente**
 - Fluxo Local de Geração Fotovoltaica
 - A Interligação Norte-Nordeste-Sudeste
- **Estudos dinâmicos**
 - Proposta e implementação do modelo genérico para BESS no Anatem
 - Avaliação do modo de controle de frequência do BESS no SIN
 - Avaliação dos modos de controle de tensão e de potência reativa do BESS
 - Avaliação do uso do BESS no sistema HVDC Multi-Infeed do Sudeste
 - Avaliação do uso do BESS para mitigar instabilidades provenientes de desligamento de linhas de transmissão em cascata
- **Minimização dos efeitos da alta geração fotovoltaica na demanda diária da carga do estado de Minas Gerais**



Conexão de Parques Eólicos Offshore ao Sistema Interligado Nacional

- Patrocinador

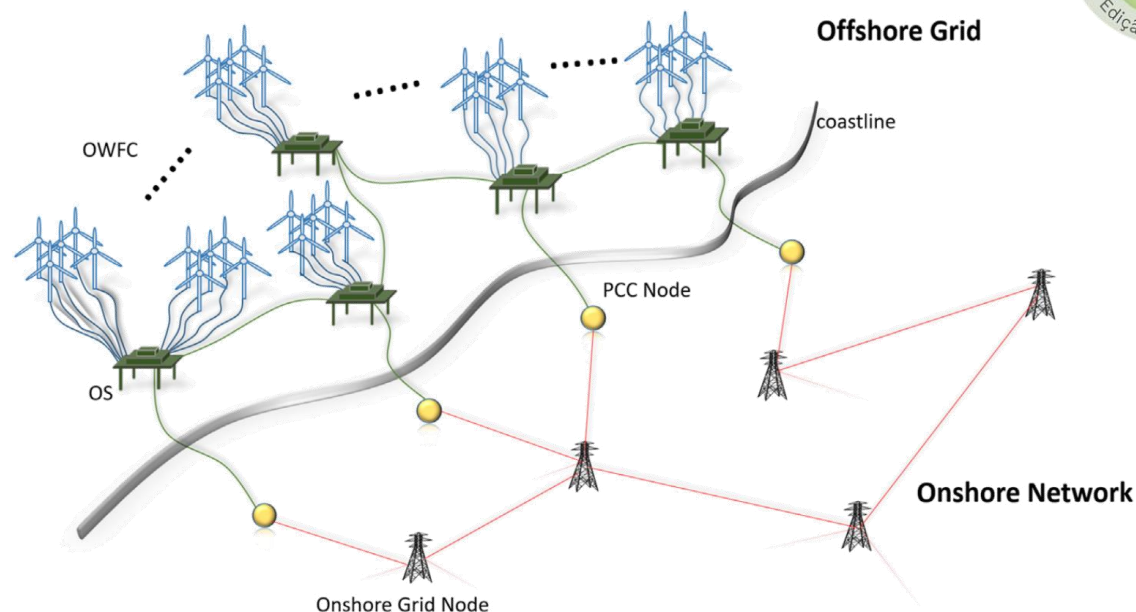


- Executores:

- **COPPE/UFRJ:** estudos elétricos (regime permanente e dinâmicos)
- **Membros do INERGE**
 - Glauco Taranto
 - Djalma Falcão
 - Robson Dias
 - Bráulio Oliveira

- Duração

- Início: maio 2023
- Finalização: maio 2026

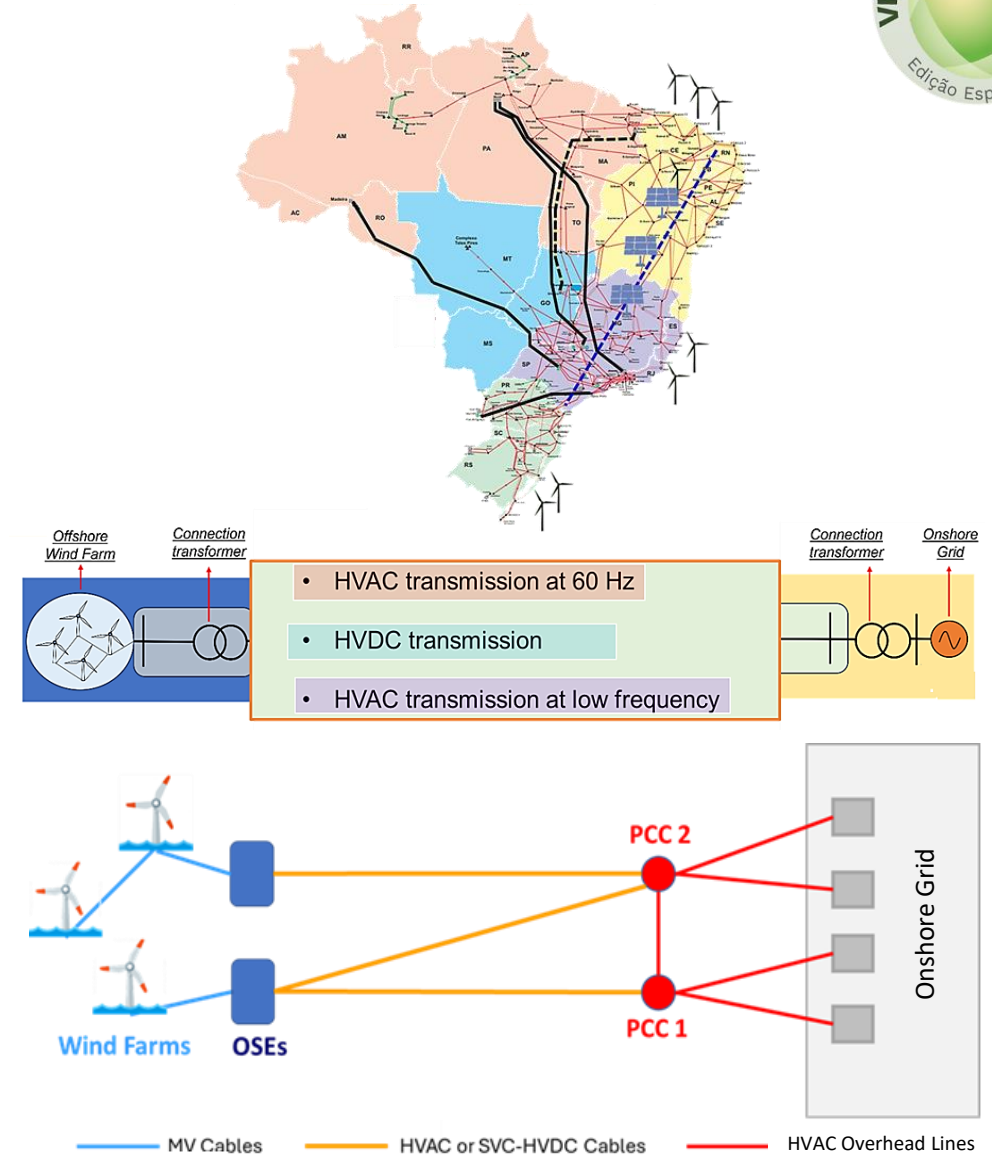


- Tópicos Abordados

- Integração ao Sistema Brasileiro
- Sistema de Transmissão
- Otimização das Redes de Conexões

Conexão de Parques Eólicos Offshore ao Sistema Interligado Nacional (cont.)

- **Integração ao Sistema Brasileiro**
 - Avaliação do impacto da conexão de parque eólicos de grande porte ao sistema interligado nacional utilizando os modelos reais fornecidos pelo ONS e EPE os softwares **Anafas**, **Anarede** e **Anatem**
- **Sistema de Transmissão**
 - Comparação do desempenho de diferentes tipos de transmissão
 - Transmissão em CA 60Hz
 - Transmissão CC com tecnologia VSC
 - Transmissão em CA em baixa frequência
- **Otimização das Redes de Conexões**
 - Otimização do layout, tecnologia e dimensionamento da rede de transmissão, dos pontos de acoplamento comum (PCC) e da conexão e ampliação da rede *onshore*, utilizando **Algoritmos Genéticos** e **PowerFactory** (DiGSILENT)



Confiabilidade no Planejamento e na Operação do Sistema de Transmissão



- Patrocinador



- Executores:

- COPPE/UFRJ

- Membros do INERGE

- Carmen Borges

- Djalma Falcão

- Bráulio Oliveira

- POWERCONSULT

- CEPEL

- Duração

- Início: janeiro 2025

- Duração: 24 meses

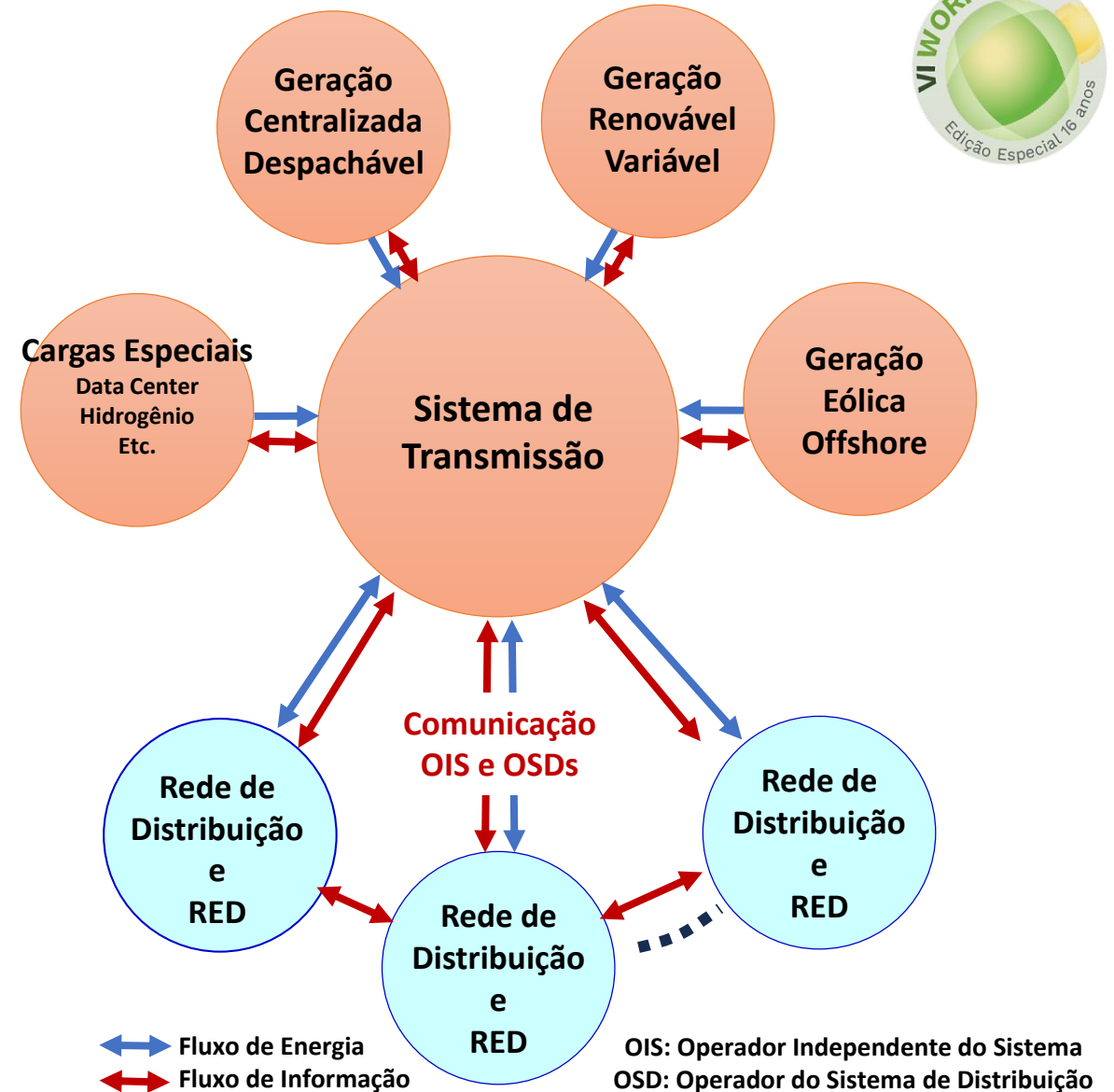
Objetivo

Desenvolver metodologia e modelos para estudos de confiabilidade composta do Sistema Interligado Nacional, do ponto de vista de adequação, utilizando modelos que representem as incertezas inerentes às fontes renováveis de energia de natureza intermitente (**eólica**, **solar**, usinas a fio d'água, etc.), bem como ao crescimento da **geração distribuída**, armazenamento (**BESS** e **UHR**), links de HVDC e dos equipamentos FACTS (SVC, TCSC, *back-to-back*).

Conclusões

A nova estrutura do sistema elétrico exige

- **Nova estrutura operacional, de mercado e de planejamento**
 - OIS: Operador Independente do Sistema
 - OSD: Operadores do Sistema de Distribuição
- **Novas Ferramentas Computacionais**
 - Regime permanente e dinâmica eletromecânica
 - Simulação eletromagnética
 - Hardware-in-the-loop (HIL)
 - Inclusão de modelos dos novos componentes (GFM, GFL, etc.)
- **Nova formação e reciclagem**
 - Integração à análise tradicional de sistemas elétricos de potência com as novas tecnologias
 - Integração dos estudos elétricos energéticos e e regulatórios



Bibliografia

1. Workshop GESEL de Encerramento do Projeto de P&D *Aplicação de Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) no Sistema de Transmissão*, 2025. Disponível em <https://gesel.ie.ufrj.br/evento/workshop-de-encerramento-do-projeto-de-pd-aplicacao-de-sistemas-de-armazenamento-de-energia-em-baterias-bess-no-sistema-de-transmissao/>.
2. D.M. Falcão, S. Tao, G.N. Taranto, T.J.M. A. Parreiras, M.E.C. Bento, D.H. Huanca, H. Muzitano, P. Esmeraldo, P. Lima, L. Monteath and R. Brandão, "Case Studies of Battery Energy Storage System Applications in the Brazilian Transmission System", *Energies*, 17, 5678, 2024.
3. G.N. Taranto, S. Tao, D.M. Falcão, T.J.M.A. Parreiras, M.E.C. Bento, D. Huanca, H. Muzitano, C.E.V. Pontes, P. Lima, L. Monteath, and R. Brandão, "Value Stacking BESS Grid Services in Hybrid AC/DC Bulk Power Systems", a ser publicado no *Journal Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024.
4. R. Brandão, D. Falcão. G. Taranto, L. Monteath, H. Reis e P. Esmeraldo, "Proposta de Um Sandbox Regulatório para Armazenamento na Transmissão", *Canal Energia*, dezembro de 2023.
5. G. Taranto, D. Falcão, B. Oliveira, T. Campello, and W. Ribeiro, "Impact of Offshore Wind Farms to the Brazilian Interconnected Power System", *23rd Wind & Solar Integration Workshop*, Helsinki, Finland, 08 –11 October 2024.
6. T.M. Campello, G.N. Taranto, D.M. Falcão, B.C. Oliveira, W.R. Ferreira, e H.R. Almeida, "Avaliação da Conexão de Grandes Parques Eólicos Offshore Utilizando Metodologia de Análise Automatizada em Regime Permanente", aceito para apresentação no *XXVIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Recife PE, 19 a 22 Outubro de 2025.

Obrigado!

djalmafalcao@coppe.ufrj.br

COPPE/UFRJ

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