



SISTEMAS ENERGÉTICOS DO FUTURO:

RESUMO EXECUTIVO

Integração de Fontes Variáveis de Energia
Renovável na Matriz Energética do Brasil



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA



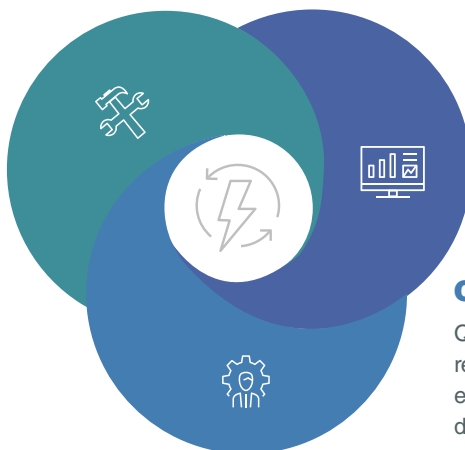
OBJETIVO PRINCIPAL

O projeto “Sistemas Energéticos do Futuro: Integrando Fontes Variáveis de Energia Renovável na Matriz Energética do Brasil” visa estudar os impactos da integração de grandes parcelas de fontes renováveis variáveis (FRV) ao Sistema Interligado Brasileiro (SIN).

► As principais questões respondidas neste projeto são:

FERRAMENTAS & METODOLOGIAS

Quais são as ferramentas e metodologias necessárias para planejar o SIN para alta penetração de FRV?



COMPORTAMENTO DO SISTEMA

Como o SIN se comportaria sob alta penetração de FRVs?

CAPACITAÇÃO TÉCNICA

Qual a expertise necessária para que os recursos humanos da EPE e do ONS estejam preparados para lidar com um futuro de alta penetração de FRVs no SIN?

► O projeto é estruturado em 8 produtos:

P0: LANÇAMENTO DO PROJETO

Reunião de lançamento do projeto, coleta de dados e relatório inicial (metodologia, cronograma de trabalho, plano de gestão e abordagem de capacitação).

P1: REGULAMENTAÇÃO TÉCNICA

Análise dos códigos de rede brasileiro e internacionais para diagnosticar possíveis pontos de aprimoramento, indicando possíveis soluções para regulamentações técnicas no que diz respeito à integração do VRE.

P2: ESTUDOS ENERGÉTICOS

Avaliação da adequação ou necessidade de adaptação do sistema elétrico brasileiro para uma participação crescente de FRVs do ponto de vista energético.

P3: ESTUDOS ELÉTRICOS

Avaliação da adequação ou necessidade de adaptação do sistema elétrico brasileiro para uma participação crescente de FRVs do ponto de vista elétrico.



P4: ASPECTOS METODOLÓGICOS

Recomendações para diretrizes, metodologias e critérios para estudos energéticos e elétricos. Elaboração de banco de dados de referência para realizar tais atividades.

P5: ESTUDOS TECNOLÓGICOS

Explorar tendências de evolução tecnológica das FRVs e seus impactos no potencial energético dessas fontes no Brasil.

P6: FINALIZAÇÃO DO PROJETO

Síntese dos principais resultados dos produtos 1 a 5 de forma resumida e didática (Relatório Final e Resumo Executivo).

P7: CAPACITAÇÃO

Fomentar o aprendizado e a inovação nos níveis organizacional e corporativo via implementação de Grupos de Trabalho, Oficinas Técnicas e Sessões de Treinamento.

► O projeto foi executado por um Consórcio de Consultores composto por:

ASPECTOS METODOLÓGICOS E DE CAPACITAÇÃO TÉCNICA

► Estudos de planejamento da expansão de médio e longo prazo devem ser baseados em três pilares principais:



EQUILÍBRIO



Equilíbrio tecno-econômico entre investimentos e custos de operação, confiabilidade e segurança da operação do sistema, complexidade da operação e bem-estar social.

QUANTIFICAÇÃO



Quantificação dos custos, benefícios e impactos por meio do uso de metodologias e ferramentas analíticas de planejamento de sistemas de potência de última geração.

QUALIFICAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO



Qualificação e identificação dos impactos das diferentes decisões de planejamento nos custos de investimento e operação e no desempenho técnico do sistema.

O processo de planejamento deve considerar a natureza estocástica dos custos de operação devido às FRV e à variabilidade hídrica, bem como as incertezas nos parâmetros de planejamento (por exemplo, evolução dos custos das FRV, evolução da geração distribuída, etc.). Mesmo não abordados neste projeto, os aspectos sociais e ambientais devem ser considerados como um componente integrante do processo de planejamento.

Os avanços nas metodologias de planejamento e ferramentas analíticas devem ser complementados por um processo contínuo de capacitação das equipes de planejamento e operação, com uma sobreposição de temas como modelagem probabilística, estudos elétricos avançados, técnicas de quantificação de impactos sociais e ambientais e análises de custo-benefício.

► Equilíbrio entre objetivos de curto prazo (operação) e de longo prazo (expansão) e integração dos estudos energéticos e elétricos são fundamentais.

A integração FRV resulta em desafios (previsão de produção, restrições de flexibilidade, dimensionamento e alocação de reservas operativas, etc.) e custos (aumento do número de commitment, novos serviços ancilares, etc.) adicionais para a operação do sistema. Portanto, os estudos de planejamento de médio e longo prazo devem considerar uma representação detalhada da operação do sistema para garantir um equilíbrio entre um plano de expansão de menor custo (investimento e custos operativos esperados) e a confiabilidade, segurança e complexidade da operação do sistema.

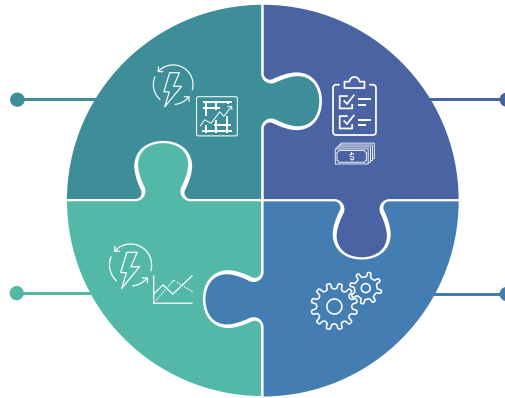
Além disso, os comportamentos energético e elétrico do sistema não podem mais ser analisados de forma independente. Uma metodologia de planejamento estado-da-arte deve considerar uma forte integração entre os estudos energéticos e elétricos.

ESTUDOS ENERGÉTICOS

Avaliação de recursos, planejamento da expansão da geração, planejamento da expansão da transmissão, simulação de custos de produção em alta resolução.

ESTUDOS ELÉTRICOS

Avaliação da inércia do sistema, fluxo de potência, análise de contingências, correntes de curto-circuito, system strength, estabilidade e desempenho dinâmico do sistema, cálculo da capacidade de transferência líquida.



EXPANSÃO DO SISTEMA

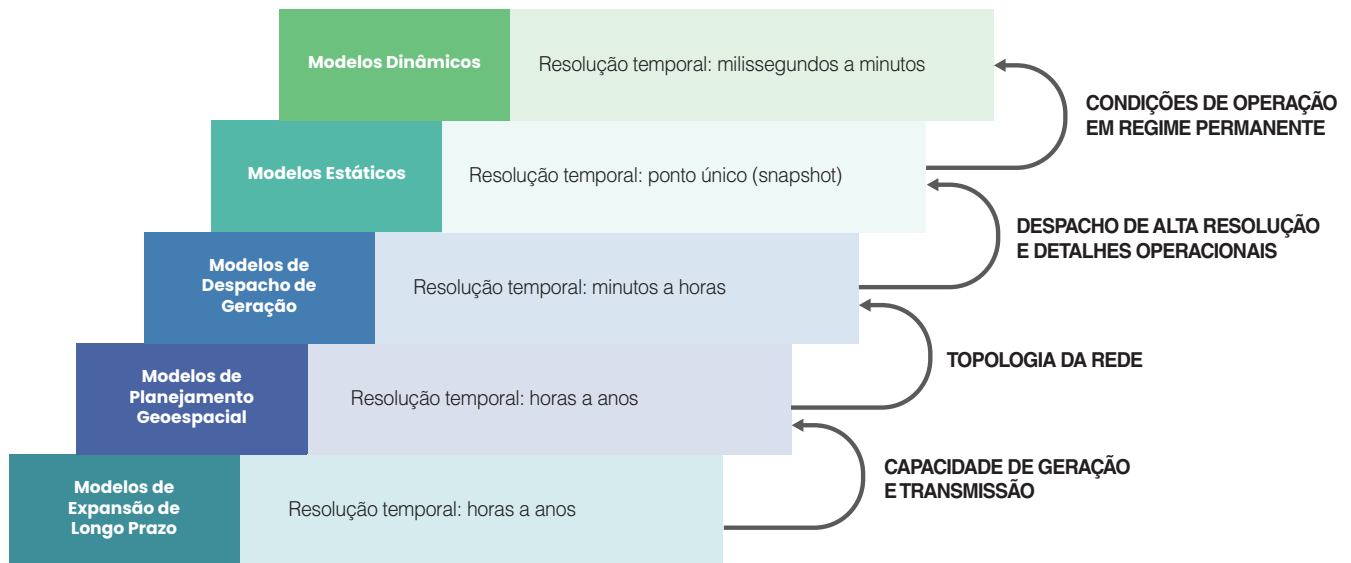
Expansão do sistema a médio e longo prazo, visando suprir a demanda futura atendendo a critérios de planejamento pré-definidos e atingindo o equilíbrio tecno-econômico.

OPERAÇÃO DO SISTEMA

Restrições de curto prazo de operação do sistema, práticas de operação, critérios de operação, margens de segurança, recursos de operação em tempo real, etc.

► Aumento da resolução temporal e espacial dos modelos de planejamento é obrigatório

A avaliação dos impactos das FRV requer maior resolução temporal e espacial nos modelos de planejamento, como representação horária, simulação cronológica e modelagem detalhada das correlações temporais e espaciais dos recursos energéticos primários (velocidade do vento, radiação solar, vazão afluente, disponibilidade de biomassa, etc.). Isso permite aproveitar ao máximo os “efeitos de portfólio” que podem reduzir a variabilidade global das fontes e, portanto, proporcionar ganhos de confiabilidade e custos de operação. A avaliação dos benefícios do efeito de portfólio também requer uma representação mais detalhada da operação e das restrições do sistema de transmissão.



Adaptado de: "Planning from the Renewable Future: Long-Term Modelling and Tools to Expand Variable Renewable Power in Emerging Economies", IRENA, 2017.

► Representação específica dos pontos de conexão da geração (candidatos à expansão e existentes) é a chave para garantir um plano de expansão robusto a longo prazo

A preparação de projetos de FRV candidatos para os estudos de planejamento da expansão consideraram sua localização geográfica com o maior nível de detalhe possível. Isso é necessário para representar adequadamente as correlações temporais e espaciais das fontes e identificar os efeitos de portfólio. Isso foi realizado por meio de:

- 1) Uso de bancos de dados globais de reanálise de radiação solar e velocidade do vento com resolução horária para um horizonte de 30 anos;
- 2) Calibração de dados para sites específicos com base na geração de plantas eólicas e solares existentes;
- 3) Inclusão no modelo de planejamento da expansão de projetos de FRV candidatos para 22 regiões de energia eólica e 9 regiões de energia solar fotovoltaica em locais com projetos de geração cadastrados em leilões.

► **Restrições de flexibilidade devem ser representadas em detalhes, a fim de não superestimar ou subestimar os impactos da alta penetração de VRE nos custos e complexidade da operação do sistema.**

Gerenciar a variabilidade das FRV requer a representação de recursos de flexibilidade nos modelos de planejamento da geração, como os dispositivos de armazenamento (baterias, usinas hidrelétricas reversíveis ou convencionais), geração despachável de resposta rápida, resposta da demanda e reservas operativas. Neste projeto, é proposta uma metodologia que inclui o conceito de “reservas probabilísticas dinâmicas” para a co-otimização da geração, fontes de flexibilidade e dos custos operacionais no planejamento da expansão.

► **Deve ser estabelecido um elo claro entre os modelos de decisão de investimento e os modelos de simulação do custo de operação do sistema, incluindo representação detalhada do sistema de transmissão.**

A modelagem do impacto das FRV requer um acoplamento mais rígido da simulação probabilística de despacho de geração e as restrições da rede de transmissão. Isto se deve ao fato de que as FRV geralmente estão localizadas longe da carga e, portanto, dependem fortemente de uma infraestrutura de transmissão complexa para abastecer a carga. Isso pode causar congestionamentos na transmissão, que devem ser administrados por meio de redespacho de geração e/ou de investimentos em reforços da rede.

► **A natureza variável das FRV e a complexidade do SIN exigem que um grande número de condições operativas seja levado em consideração para a realização de estudos elétricos detalhados.**

Neste projeto, foram realizadas simulações probabilísticas cronológicas detalhadas para um grande número de cenários de produção das FRV e de vazões afluentes por meio de um modelo estocástico integrado que representa a dependência temporal e espacial desses recursos. Esta grande quantidade de condições operativas a serem analisadas em estudos elétricos detalhados requer:

- O uso de métodos avançados de análise de dados para identificar as condições operativas mais relevantes para as análises estáticas e dinâmicas;
- Ferramentas de simulação de alto desempenho, capazes de gerenciar com eficiência grandes quantidades de dados de entrada e saída e simular muitas condições operativas em tempos de computação razoáveis.

► **Estudos elétricos detalhados (estáticos e dinâmicos) são uma ferramenta essencial para estudos de expansão de longo prazo.**

A realização de estudos estáticos e dinâmicos detalhados permite a quantificação dos possíveis impactos das FRV na segurança e estabilidade do sistema, bem como a identificação de medidas de mitigação adequadas que possam auxiliar no aumento dos limites de inserção de FRV no sistema. Essas análises incluem, entre outras: fluxo de potência ótimo (FPO); análise de contingências; análise de potência de curto-circuito, análise de estabilidade a pequenas perturbações, estabilidade de frequência e estabilidade transitória.

ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste em uma análise prospectiva do Sistema Interligado Nacional (SIN) considerando uma inserção massiva de FRV em uma configuração futura obtida com a aplicação da metodologia de planejamento proposta neste projeto. Apesar de não ser um estudo de planejamento oficial, ele fornece informações valiosas para o entendimento do comportamento futuro do SIN sob alta penetração de FRV.

O estudo visa a composição de uma matriz elétrica para o Brasil que respeite o equilíbrio tecno-econômico entre os custos de expansão e de operação e o desempenho técnico do sistema. Considerando a redução dos custos das tecnologias das FRV previstos para os próximos anos, espera-se que no futuro haja um predomínio das FRV na matriz elétrica, especificamente eólica onshore e solar fotovoltaica. O estudo não descarta, entretanto, a participação de outras fontes de energia para fornecer requisitos de despacho controlável para mitigar os efeitos energéticos e elétricos da variabilidade das fontes eólica e solar.

► **Tecnologias de geração eólica: tendência para torres mais altas, rotores mais longos e maior capacidade nominal das turbinas. As tecnologias solares fotovoltaicas (FV) permanecerão mais competitivas e viáveis do que a energia solar concentrada (CSP); espera-se que projetos futuros sejam baseados em tecnologias cristalinas e de filme fino (CdTe). Espera-se uma redução significativa de custos dessas tecnologias nos próximos anos.**

A evolução contínua das tecnologias eólica e solar fotovoltaica é acompanhada por uma redução dos seus custos. Esta combinação torna as fontes eólica e solar FV competidoras muito fortes para a expansão do sistema e tende a ser o principal impulsionador de novas adições de capacidade no futuro no Brasil e no resto do mundo. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias que permitem a mitigação dos impactos devido à natureza variável dessas fontes (sistemas de armazenamento de energia, inversores grid-forming, redes inteligentes, resposta da demanda, limites de capacidade dinâmicos, etc.) também contribuem ao aumento da competitividade dessas fontes.

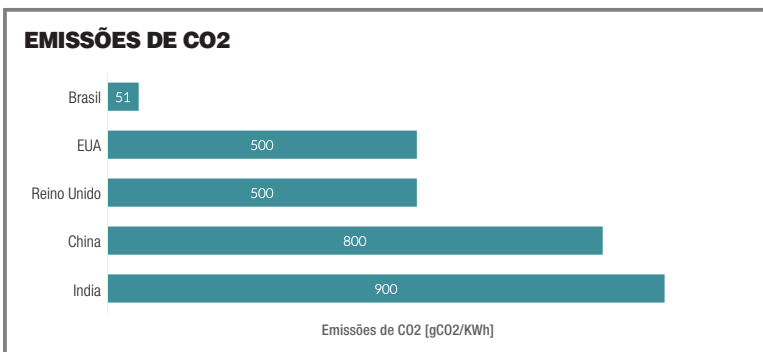
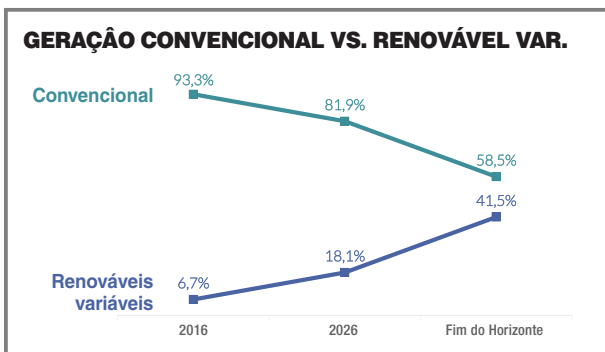
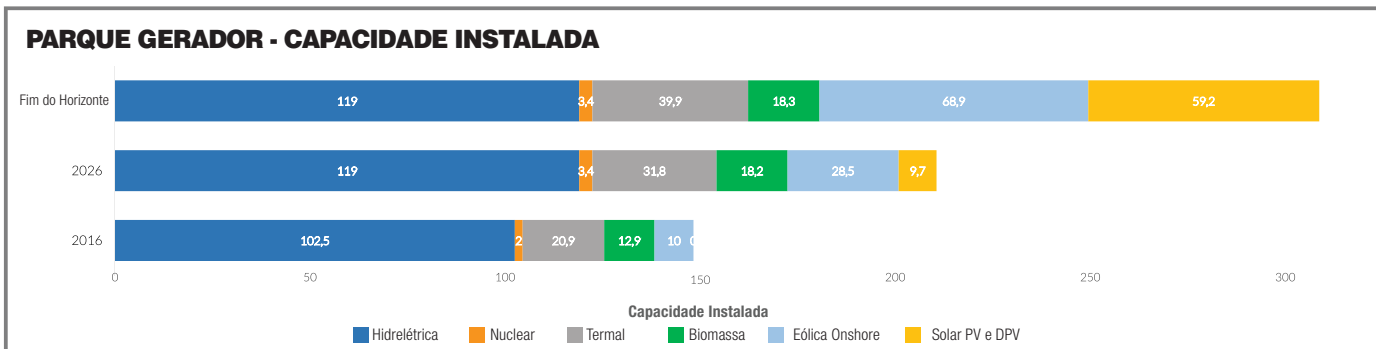
PARÂMETRO	Eólica Onshore	Solar FV m-Si	Solar FV CdTe	Solar CSP (PT)
CAPEX 2018 [USD/kW]	1,350	1.0 - 1.1	0.9 - 1.0	4.5 - 6.0
OPEX 2018 [USD/kW]	50	10 - 18	10 - 18	45
Redução Potencial de CAPEX em 2025 [%]	↓ 12%	↓ 20%	↓ 20%	↓ 15%
Redução Potencial de CAPEX – Fim do Horizonte	↓ 30%	↓ 40%	↓ 40%	↓ 36%

► **Considerando as evoluções de desempenho e custos das FRV, a metodologia de planejamento da expansão proposta tende a maximizar a inserção dessas fontes sob a perspectiva de equilíbrio técnico-econômico.**

A metodologia de planejamento empregada no estudo de caso captura intrinsecamente o equilíbrio entre os custos (CAPEX e OPEX) e os desafios técnicos da operação do sistema, empregando um processo multinível que determina um plano de investimento ótimo que leva em consideração restrições detalhadas da operação do sistema. Os planos de expansão da geração e da transmissão resultantes refletem a conciliação de dois interesses conflitantes: minimização dos custos totais de expansão e operação e desempenho técnico do sistema (confiabilidade, segurança e estabilidade do sistema).

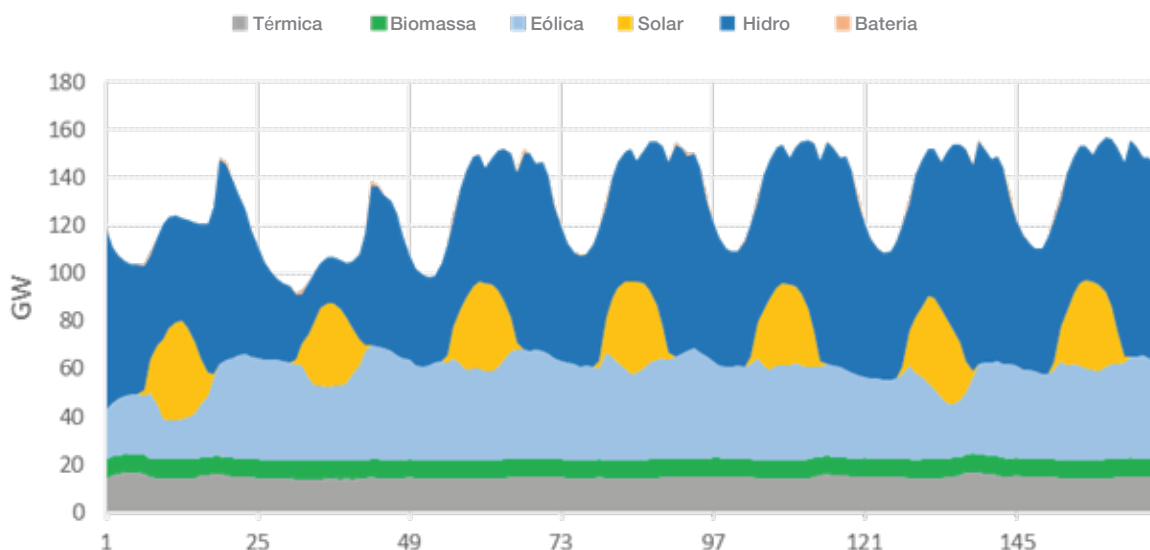
► **As fontes renováveis variáveis (eólica onshore, solar fotovoltaica e solar distribuída) representam cerca de 41% (128 GW) da capacidade instalada total e 36% da geração total de eletricidade no horizonte de planejamento. Cerca de 85% (265 GW) da capacidade instalada de geração é proveniente de fontes renováveis (incluindo hidrelétrica e biomassa).**

A expansão das FRV não é realizada em substituição a unidades geradoras convencionais. Pelo contrário, a forte inserção de FRV resultante do plano de expansão se dá em complemento a um parque de geração convencional bastante significativo. Portanto, mesmo que a capacidade instalada relativa de FRV aumente, ainda há unidades geradoras convencionais suficientes - especialmente hidrelétricas flexíveis e de resposta rápida - para suportar a integração de grandes quantidades de FRV.



► O parque hidrelétrico é um dos fiadores da integração massiva de FRV, aportando flexibilidade essencial para a operação do sistema

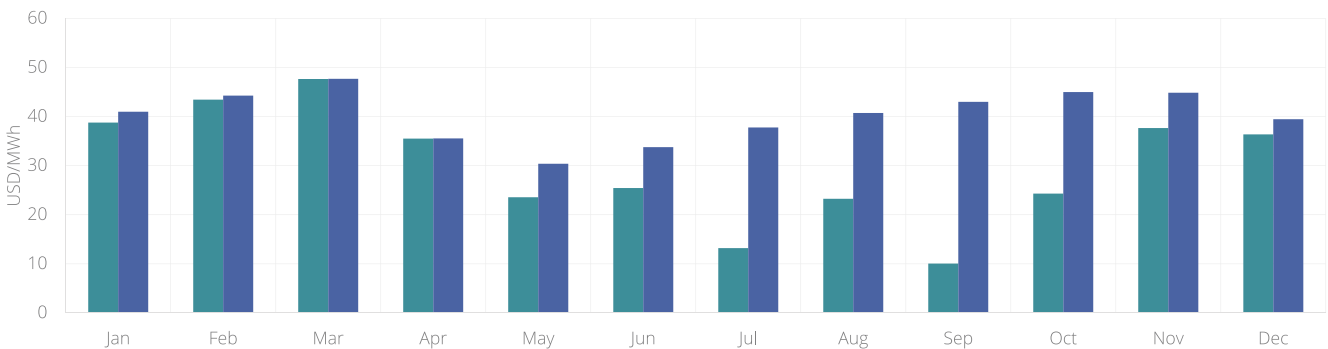
Papel das usinas hidrelétricas e a gás para gerenciar a variabilidade das FRV: o estudo de caso mostra que a base hidrelétrica do Brasil torna a inserção massiva de FRV mais econômica porque reduz a necessidade de usinas a gás usadas para reserva de geração. As usinas hidrelétricas que participam do Controle Automático de Geração (CAG) devem ser complementadas conforme a necessidade por outras hidrelétricas. Uma vez que os recursos hídricos se esgotem, outras fontes serão necessárias, abrindo espaço para unidades a gás flexíveis e/ou dispositivos de armazenamento de energia.



► A complementaridade sazonal entre vento e aflúências no NE reduz a necessidade de armazenamento sazonal na região.

A maior penetração de FRV no NE modifica a operação dos reservatórios das hidrelétricas da região, uma vez que menos água precisa ser transferida do período úmido para o seco devido à maior geração eólica no período seco. De fato, os resultados mostraram uma inversão dos custos marginais sazonais em relação ao comportamento histórico. Vale ressaltar também que a complementaridade entre a energia eólica - que aumenta à noite - e a solar permite otimizar o uso das instalações de transmissão.

Custo Marginal Médio Mensal



Nordeste (NE)

A penetração de FRVs reduz os custos marginais na estação seca, quando os regimes de vento são mais fortes.



Outros Subistemas

Descolamento do custo marginal em relação à região NE devido à forte produção das FRV no NE, saturando as interconexões já reforçadas.

► A expansão do sistema de transmissão nacional é fundamental para a integração das FRV no Brasil.

Uma forte expansão do sistema de transmissão (cerca de +23% em relação à rede existente e planejada até 2026) é necessária para garantir a operação segura, confiável e estável do SIN como consequência do forte crescimento da demanda e da inserção massiva de FRV. Esta expansão também permite que grandes volumes de energia sejam transferidos entre as regiões, explorando complementaridades espaciais de fontes do mesmo tipo (hidrelétricas) e de diferentes fontes (complementaridade entre eólica e hidrelétrica).

A importância das interconexões entre os subsistemas para a estabilidade do sistema também é destacada neste estudo. O acréscimo da capacidade de sincronização entre os subsistemas também melhora as margens de estabilidade do mesmo. Para contingências de geração em um determinado subsistema, todas as linhas de ligação contribuem para trazer potência adicional de fora do subsistema para compensar a geração perdida. No entanto, para garantir que o sistema se beneficie do compartilhamento de reservas operativas entre os diferentes subsistemas, margens de transmissão adequadas devem ser garantidas durante a operação do sistema.

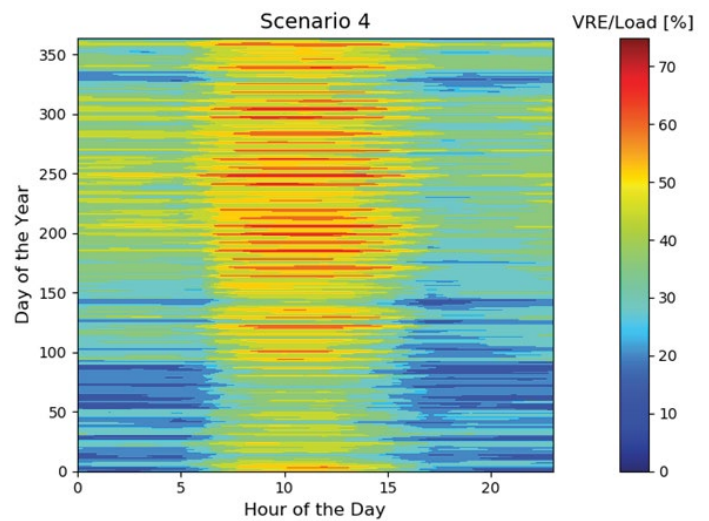


► **Sinergias sazonais entre a geração eólica e as afluências nas regiões N/NE aumentam o valor agregado do sistema HVDC de Belo Monte (maior fator de utilização).**

A sinergia sazonal entre a geração eólica e as afluências na região N/NE eleva o uso do sistema de transmissão de Belo Monte: durante a estação seca, apenas uma pequena fração da capacidade de geração e do sistema de transmissão de Belo Monte é usada. A capacidade ociosa de transmissão é então utilizada para exportar energia renovável do Nordeste para o Sudeste por meio dos elos CC de Belo Monte, aumentando assim seu valor agregado para o sistema.

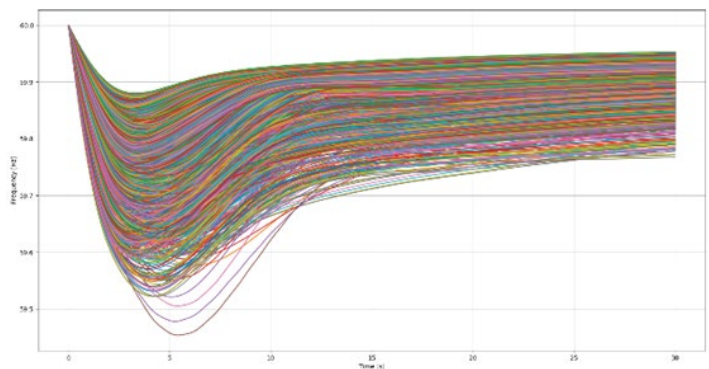
► **O sistema pode ser operado sob níveis extremos de penetração instantânea de FRV, garantindo sua segurança, estabilidade e confiabilidade.**

Para a configuração final do sistema, a penetração instantânea máxima de FRV é de cerca de 70% da carga instantânea. A participação instantânea das FRV é inferior a 53% da carga em 95% das horas do ano. Destas condições de operação, 14 foram analisadas em detalhe por meio de simulações estáticas e dinâmicas e os resultados mostram que o sistema pode ser operado de forma estável, segura e confiável de acordo com os critérios de planejamento e operação do sistema pré-estabelecidos.



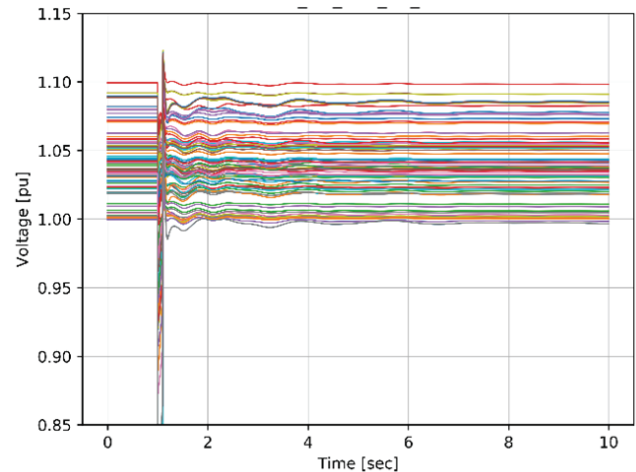
► **A inércia do sistema permanece alta o suficiente, mesmo em situações de alta penetração instantânea de FRV.**

A inércia do sistema foi calculada para um total de 61200 condições operativas. Apesar da alta participação de FRV, a inércia permanece suficientemente alta para todas as condições analisadas. Os resultados de 8760 simulações dinâmicas mostram que a frequência do sistema permanece bem acima do primeiro estágio dos esquemas de alívio de carga. Os resultados também mostram que as unidades geradoras convencionais são eficientes na regulação da frequência e na garantia da estabilidade do sistema.



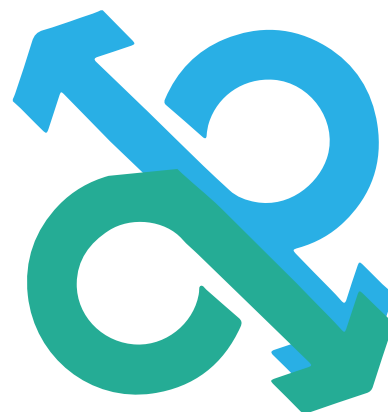
► Controle dinâmico de tensão em condições de alta penetração instantânea de FRV é um desafio que pode ser superado por meio da alocação de compensadores síncronos em pontos chave da rede.

As potências de curto-circuito nos terminais das estações conversoras dos elos CC e próximo aos principais hubs de FRV foi avaliada no estudo. Os resultados mostram que o sistema de transmissão é suficientemente forte para a operação estável dos elos CC. Sob condições extremas de penetração instantânea de FRV, problemas locais de insuficiência de potência de curto-circuito podem ser remediados com a instalação de compensadores síncronos em subestações próximas aos hubs principais de FRV. A contribuição das FRV para as funções do sistema (controle de tensão, injeção de corrente durante faltas, etc.) é necessária para uma operação estável.



► Procedimentos de rede desempenham um papel fundamental na conciliação de dois objetivos aparentemente conflitantes: 1) bem-estar social; 2) sistema de energia elétrica sustentável

A função dos procedimentos de rede para conexão de FRV é fornecer um conjunto de requisitos técnicos mínimos para a conexão de plantas FRV ao sistema. Os procedimentos de rede estabelecem um tratamento homogêneo a todos usuários da rede. Isso oferece um tratamento justo aos geradores e operadores em relação à conexão à rede, enquanto garante a estabilidade e a confiabilidade do sistema. A versão atual dos procedimentos de rede do ONS para conexão de FRV ao sistema cobre os principais aspectos técnicos e está em linha com a prática internacional em códigos de rede. No entanto, os procedimentos de rede devem ser revisados periodicamente para considerar a evolução futura do SIN e das tecnologias de geração e transmissão.



SISTEMA ELÉTRICO SUSTENTÁVEL

Aumentar a participação das energias renováveis na matriz elétrica por meio do crescimento sustentável das fontes renováveis.

BEM-ESTAR SOCIAL

Garantir que eletricidade seja suprida à população conforme necessário, garantindo confiabilidade, segurança e qualidade do abastecimento.

PRINCIPAIS PREMISSAS

- Ponto de partida: configuração final do sistema PDE 2026
- A demanda anual considerada para o final do horizonte de planejamento é considerada o dobro da demanda de 2017, o que equivale a 166 GW/1200 TWh (ponta/energia anual)
- Capacidade total instalada de energia solar fotovoltaica distribuída ao final do horizonte de estudo: 30 GW
- Nenhum candidato a expansão de usinas hidrelétricas além daqueles incluídos no plano de expansão PDE 2026

CONCLUSÃO PRINCIPAL

Este estudo mostra que a aplicação de metodologias e ferramentas de planejamento da expansão de última geração permite preparar o sistema elétrico brasileiro para acomodar grandes quantidades de fontes renováveis variáveis, respeitando os critérios de confiabilidade, segurança e estabilidade do sistema. Também indica que esses altos níveis de penetração de FRV podem ser alcançados respeitando o equilíbrio dos aspectos técnicos e econômicos, bem como conciliando objetivos de longo e curto prazo para a expansão e operação do sistema.

A EQUIPE ENVOLVIDA NO PROJETO

- Consultor: 40 especialistas em diferentes áreas do conhecimento (de engenharia de parques eólicos e solares a análise de sistemas elétricos e energéticos)
- Beneficiários do projeto:
 - ▶ 43 especialistas da EPE
 - ▶ 11 especialistas do ONS e
 - ▶ 2 gestores da GIZ.

PRINCIPAIS NÚMEROS

- Os estudos energéticos incluíram:
 - ▶ Modelo de planejamento: resolução horária detalhada e cenários de afluência/eólica/solar/GD, requisitos de energia, potência e reservas;
 - ▶ O planejamento de expansão é modelado como um problema de programação inteira mista (MIP) com 3.5 milhões variáveis e 3.2 milhões de restrições;
 - ▶ Resolver um problema desta dimensão é computacionalmente desafiador e requer uma infraestrutura computacional adequada para executar os modelos na nuvem e, em seguida, pós-processar vários gigabytes de resultados para fornecer insights para atividades de planejamento da expansão e da operação do sistema.
- Os estudos elétricos incluíram:
 - ▶ Análise de mais de 61.000 condições operativas (despacho) para a seleção das condições operacionais relevantes para estudos os estudos elétricos;
 - ▶ Realização de cerca de 300 simulações estáticas, considerando operação normal e cerca de 2500 contingências possíveis para cada condição operativa;
 - ▶ Realização de cerca de 9.000 simulações dinâmicas;
 - ▶ Geração de um total de cerca de 450 GB de dados de entrada e saída de simulações estática e dinâmica.
 - ▶ Tamanho do modelo de simulação:
 - ~11.000 barras
 - ~9000 linhas de transmissão
 - ~7000 transformadores
 - 7 bipolos HVDC CSC
 - 3000 unidades geradoras com modelo dinâmico detalhado