

Recursos Energéticos Distribuídos: Desafios, Impactos e Oportunidades

Prof. Robson Dias



1. Objetivos

Da expansão das fontes renováveis à necessidade de flexibilidade operacional

Entender o sistema

A frequência reflete o balanço instantâneo entre geração e carga.

Definir RED

GD/MMGD, baterias, veículos elétricos e resposta da demanda.

Mapear o Brasil

Recursos e desafios diferem por região, rede e perfil de carga.

Identificar desafios

Curtailement, transmissão, distribuição, estabilidade e regulação.

Apontar soluções

Flexibilidade, inversores avançados, armazenamento, mercado e P&D.

Mensagem central: o desafio não é apenas expandir renováveis, mas integrar variabilidade, rede, operação e mercado.

2. Estabilidade: balanço carga-geração e frequência

Quando geração e carga se desequilibram, a frequência se afasta de 60 Hz



Equilíbrio

geração = carga
→ frequência ~60 Hz



Déficit de geração

carga > geração
→ frequência cai



Excesso de geração

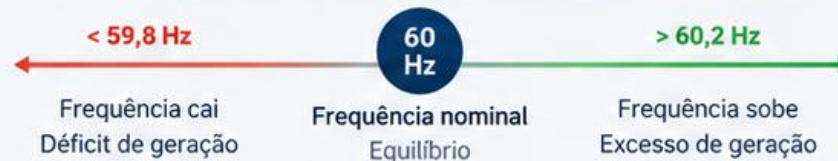
geração > carga
→ frequência sobe



A frequência é o indicador instantâneo do balanço potência gerada – potência consumida.

Pequenas variações indicam se o sistema precisa de mais geração ou redução de carga.

Frequência do sistema (exemplos)



Manter a frequência próxima de 60 Hz garante **qualidade, segurança e confiabilidade** do fornecimento.

3. Três situações operativas: o que acontece com a frequência?

Relação simplificada entre desbalanço de potência e variação de frequência



$f \approx 60 \text{ Hz}$

Equilíbrio

Geração = Carga

Operação normal; controle primário/secundário mantém pequenas variações.



$f \downarrow$

Déficit de geração

Carga > Geração

Energia cinética do sistema é consumida; a frequência tende a cair.



$f \uparrow$

Excesso de geração

Geração > Carga

Sobra potência no sistema; a frequência tende a subir.

Para manter a estabilidade, o sistema precisa de recursos capazes de responder no tempo certo: inércia, controles, reservas, armazenamento e cargas flexíveis.

4. O que são Recursos Energéticos Distribuídos — RED?

Tecnologias próximas ao consumidor que podem produzir, armazenar ou gerenciar energia

Definição prática

RED são recursos normalmente conectados na distribuição ou junto ao consumidor, capazes de modificar a geração, o consumo ou o armazenamento local de energia.

Geração distribuída

Solar FV em telhados, pequenos geradores, cogeração e biogás.

Armazenamento

Baterias em consumidores, redes, usinas híbridas e microrredes.

Veículos elétricos

Carga móvel, recarga controlável e futuro V2G/V2B.

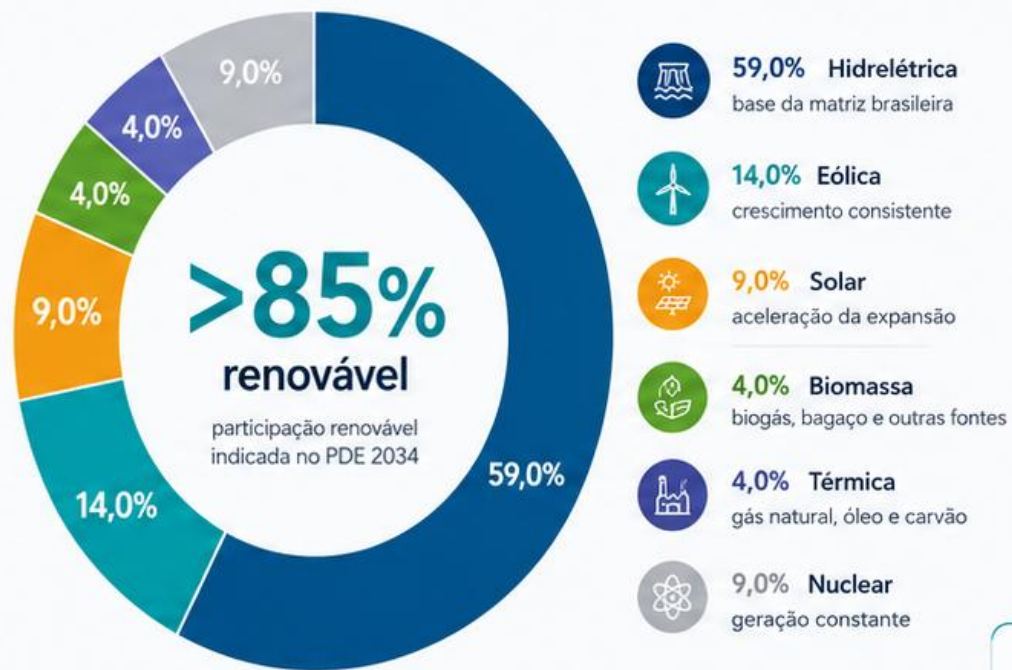
Resposta da demanda

Redução, deslocamento ou modulação do consumo.

Valor sistêmico potencial: flexibilidade, redução de perdas, postergação de investimentos, resiliência e integração de renováveis.

5. Panorama brasileiro: matriz renovável e expansão

O Brasil mantém uma das matrizes elétricas mais renováveis do mundo e avança em diversificação, descentralização e flexibilidade.



- 59,0% Hidrelétrica**
base da matriz brasileira
- 14,0% Eólica**
crescimento consistente
- 9,0% Solar**
aceleração da expansão
- 4,0% Biomassa**
biogás, bagaço e outras fontes
- 4,0% Térmica**
gás natural, óleo e carvão
- 9,0% Nuclear**
geração constante



PDE 2034 aponta manutenção do elevado patamar renovável e crescimento de solar, eólica e GD.

2025–2034

Vetores de expansão da matriz



Solar

+24,3 GW

nova capacidade adicional esperada



Eólica

+19,1 GW

nova capacidade adicional esperada



Geração distribuída (GD)

+17,0 GW

nova capacidade adicional esperada



Flexibilidade

armazenamento, resposta da demanda e serviços ancilares em expansão



Total estimado: **+60,4 GW** de nova capacidade no período 2025–2034



Matriz limpa

>85%

participação renovável em 2034

- ✓ Uma das matrizes mais renováveis do mundo
- ✓ Baixas emissões no setor elétrico
- ✓ Vantagem competitiva e segurança energética



Expansão acelerada

+60,4 GW

nova capacidade 2025–2034

- ✓ Solar lidera em ritmo de crescimento
- ✓ Eólica em consolidação de expansão
- ✓ GD ganha escala e protagonismo



Integração operacional



Mais variabilidade e geração distribuída



Maior demanda por flexibilidade e serviços ancilares



Planejamento e operação integrados para confiabilidade do SIN

6. Geração distribuída: escala, difusão e impacto no sistema

A MMGD deixou de ser marginal e passou a alterar carga, operação e planejamento



3,47 milhões

unidades consumidoras com GD

≈ 1 em cada 4 unidades atende à classe residencial



39,2 GW

potência instalada aproximada

≈ 10,1% da carga de ponta do SIN¹



≈ 80% solar

predominância da fonte fotovoltaica

Solar fotovoltaica ≈ 31,4 GW (≈ 80% do total)



Desde 29/04/2023

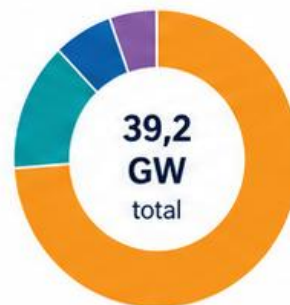
o ONS incorpora estimativa de MMGD nos dados de carga e geração.

Crescimento acelerado da MMGD no Brasil



*2025 e 2026: projeções (cenário base).

Predominância da fonte solar na MMGD (2025)



≈ 80%
Solar fotovoltaica
≈ 31,4 GW

Fonte	Potência (GW)	Porcentagem
Solar fotovoltaica	31,4	≈ 80%
Hídrica	5,0	≈ 13%
Biomassa	1,8	≈ 5%
Eólica	1,0	≈ 2%

Outras fontes: <1% do total.



Efeito no operador

- ✓ Melhor representação da carga líquida do sistema.
- ✓ Planejamento da operação mais preciso e eficiente.
- ✓ Redução de incertezas e maior segurança operativa.



Efeito na distribuição

- ✓ Alteração de fluxo de potência e perfil de tensão.
- ✓ Novos desafios de proteção, perdas e qualidade de energia.
- ✓ Impactos no dimensionamento e na expansão da rede.

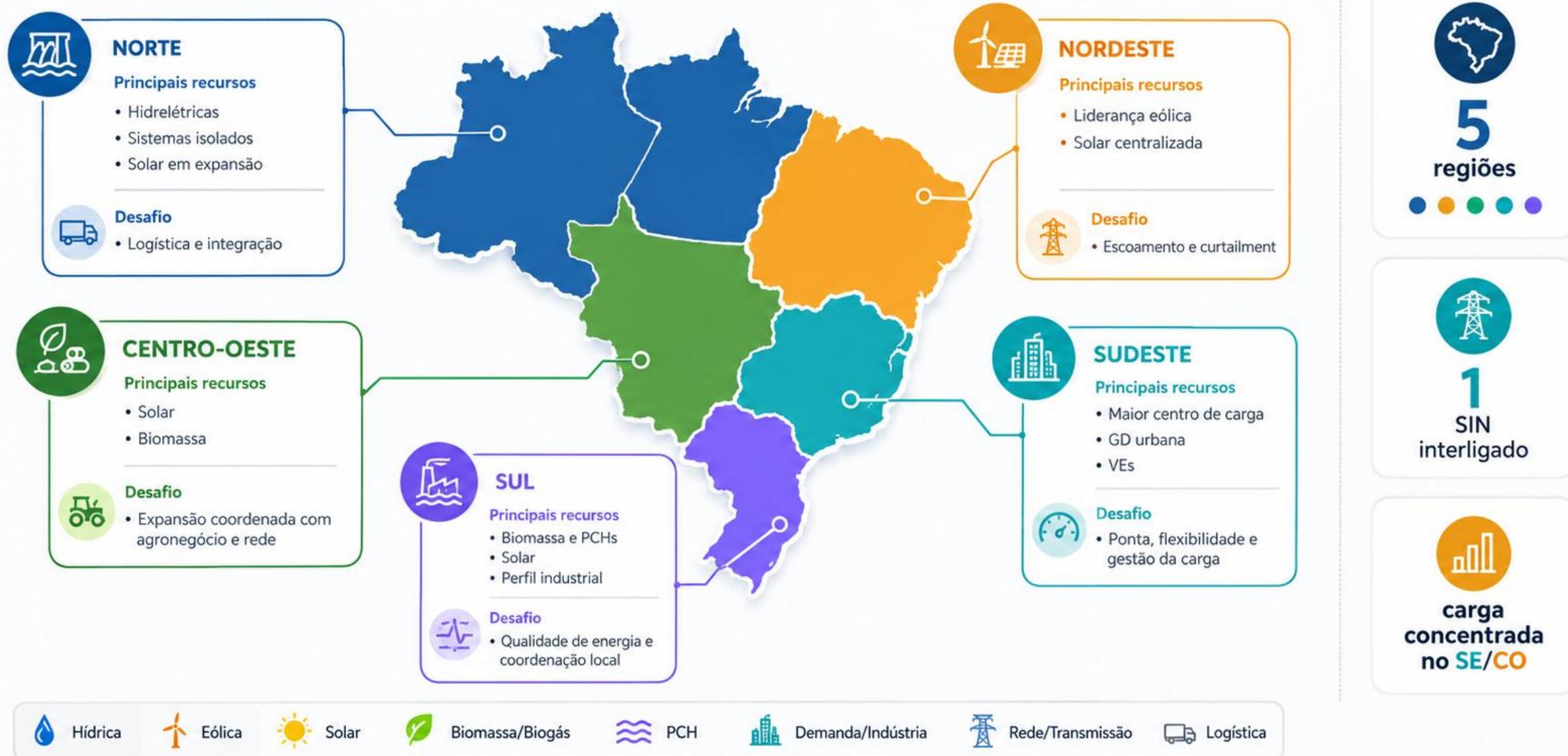


Pergunta-chave

Como transformar a GD de “geração não coordenada” em recurso de flexibilidade para rede e sistema?

7. Infográfico regional: recursos energéticos e desafios

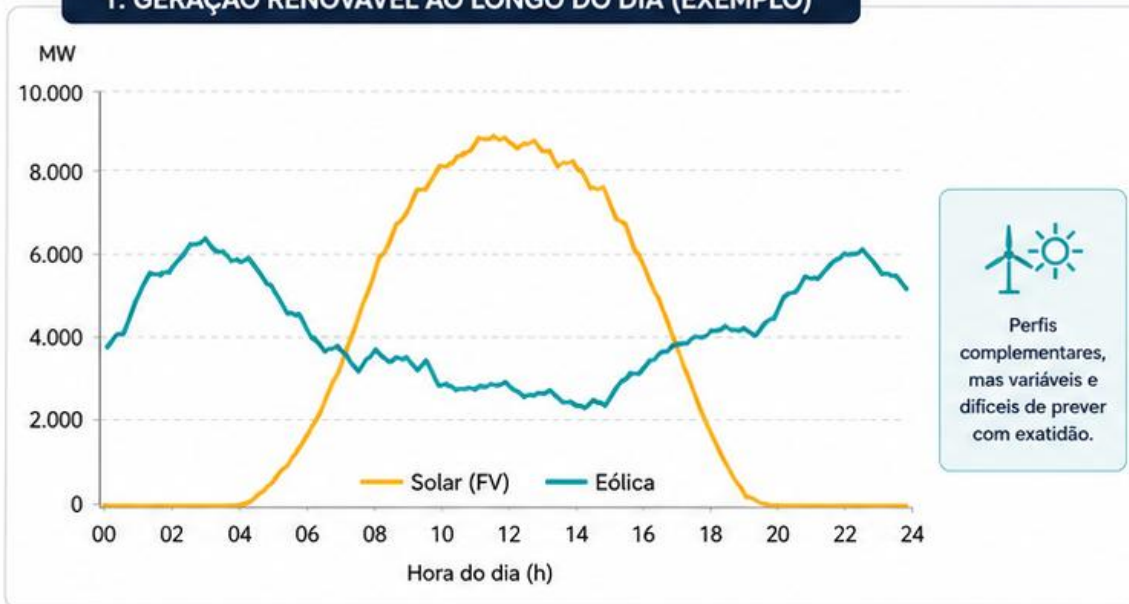
Vocações energéticas e desafios de integração variam por região



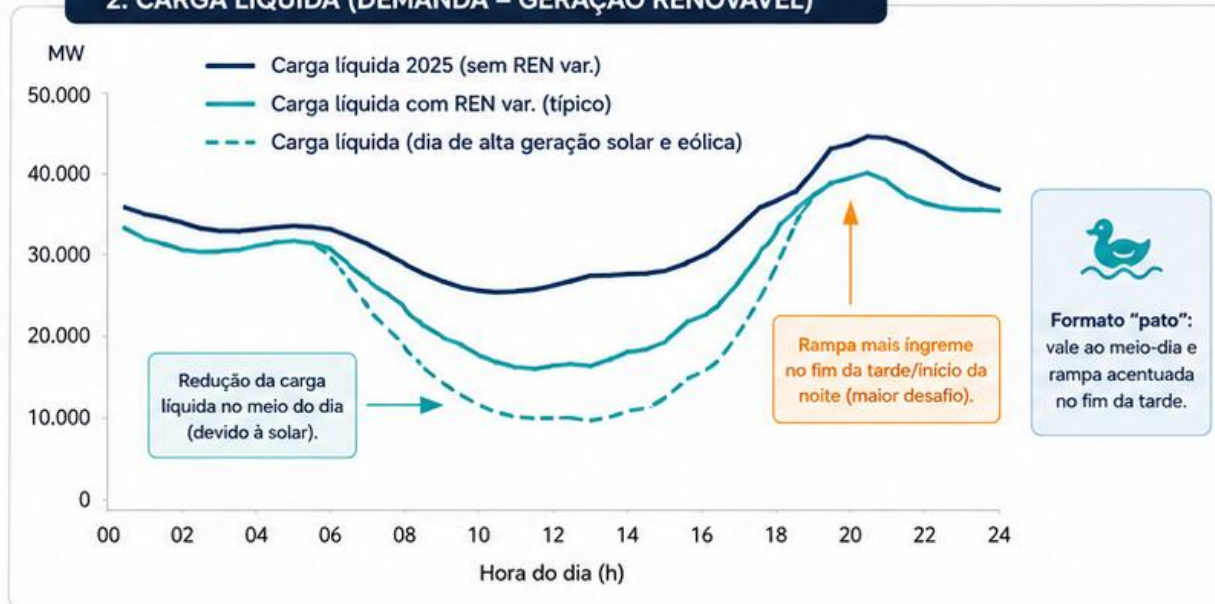
8. Como a renovável variável muda a operação

Solar e eólica reduzem emissões, mas aumentam variabilidade e necessidade de coordenação.

1. GERAÇÃO RENOVÁVEL AO LONGO DO DIA (EXEMPLO)



2. CARGA LÍQUIDA (DEMANDA – GERAÇÃO RENOVÁVEL)



Variabilidade

Vento e irradiação variam no tempo em diferentes escalas (minutos a sazonal), gerando incerteza.

Impacto: previsões imperfeitas e flutuações na geração.



Rampas operativas

Alterações rápidas na carga líquida exigem respostas ágeis de geração, armazenamento e demanda.

Impacto: maior esforço operacional e risco de déficits/excedentes.



Flexibilidade necessária

Operação deve ser mais flexível e coordenada em todas as escalas: local, regional e nacional.

Impacto: necessidade de recursos, serviços e sinais econômicos.

COMO GERENCIAR A VARIABILIDADE?



Previsão

Melhorar qualidade e horizontes de previsão.



Armazenamento

Suavizar variações e atender rampas e picos.



Resposta da demanda

Ajustar consumo em tempo real de forma inteligente.

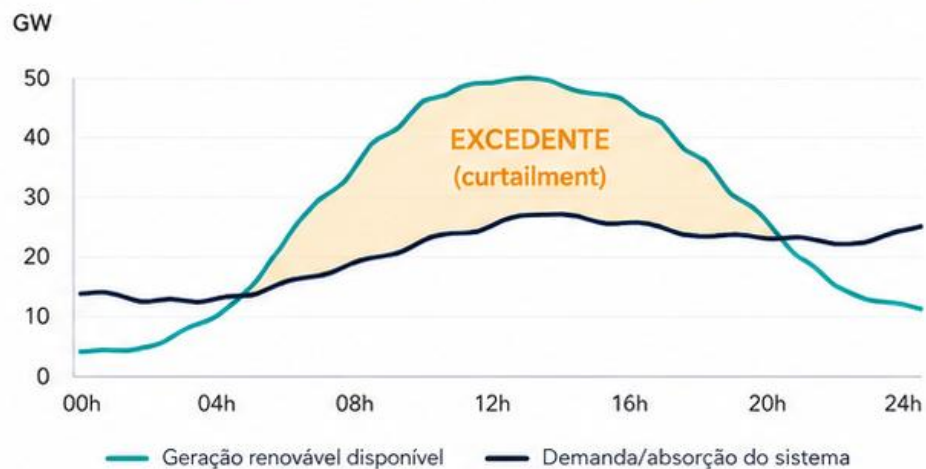


A integração de renováveis variáveis transforma a operação: mais **dados**, **previsões**, **recursos flexíveis** e **coordenação** entre geração, transmissão, distribuição e consumidores para garantir segurança, qualidade e menor custo.

9. Curtailment: sintoma de excedente e restrições

Corte de geração renovável aparece quando a energia disponível não consegue ser absorvida pelo sistema.

Excesso de geração em relação à demanda (exemplo diário)



i Quando a geração excede a capacidade de absorção do sistema, ocorre o corte de geração renovável para manter o equilíbrio e a segurança operativa.

Por que ocorre: cadeia causal do curtailment



Realidade estrutural

O curtailment é uma consequência estrutural da transição energética e do crescimento das fontes variáveis.



Medida técnica

O corte é uma medida temporária e necessária para preservar a segurança, a qualidade do serviço e o equilíbrio.



Transparência do ONS

Crítérios, volumes e causas são divulgados com base em dados operativos e metodologias auditáveis.



ONS disponibiliza acompanhamento dinâmico do curtailment e ferramenta prospectiva, com dados atualizados, mapas de restrições e projeções de excedentes para apoiar decisões e planejamento.

10. Transmissão: escoar renováveis até os centros de carga

A expansão renovável no Nordeste e no Norte exige reforços e coordenação de rede para levar energia limpa até onde o Brasil mais precisa.



Onde cresce a oferta

Norte e Nordeste concentram os melhores recursos e a nova capacidade renovável do país.



Onde está a carga

Sudeste e Centro-Oeste reúnem a maior parte do consumo, da indústria e dos serviços.



Por que a transmissão importa

Sem rede suficiente e confiável, a energia não chega. Transmissão é o que conecta oferta limpa à demanda real do país.

Do planejamento à operação



Planejamento

Estudos e definição de necessidades da rede



Leilões

Contratação de empreendimentos de transmissão



Obras

Construção de linhas, subestações e reforços na infraestrutura

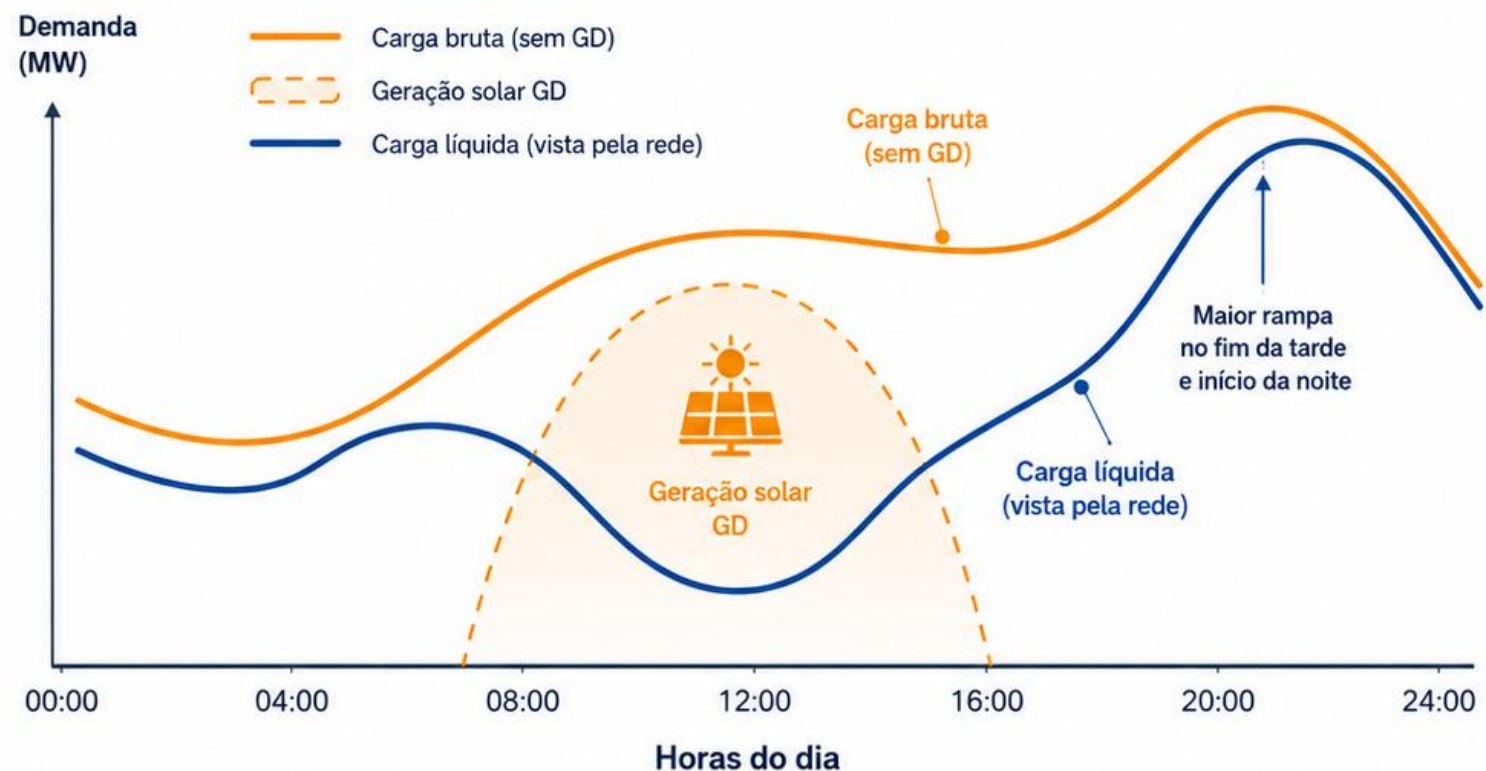


Operação

Operação integrada, monitoramento e confiabilidade

11. Distribuição: carga líquida, GD e ponta vespertina

A GD solar muda o perfil visto pela rede e pelo operador



Efeitos locais

Fluxo reverso, elevação de tensão, coordenação de proteção, perdas, harmônicos e necessidade de dados mais granulares.



Efeitos sistêmicos

Carga líquida menor de dia e maior rampa no fim da tarde podem exigir reserva, resposta rápida e despacho complementar.



Como mitigar

Tarifas horárias, controle de inversores, baterias, resposta da demanda, recarga inteligente de VEs e coordenação com distribuidoras.



Tarifas horárias



Controle de inversores



Baterias



Resposta da demanda



MMGD incorporada pelo ONS desde 29/04/2023

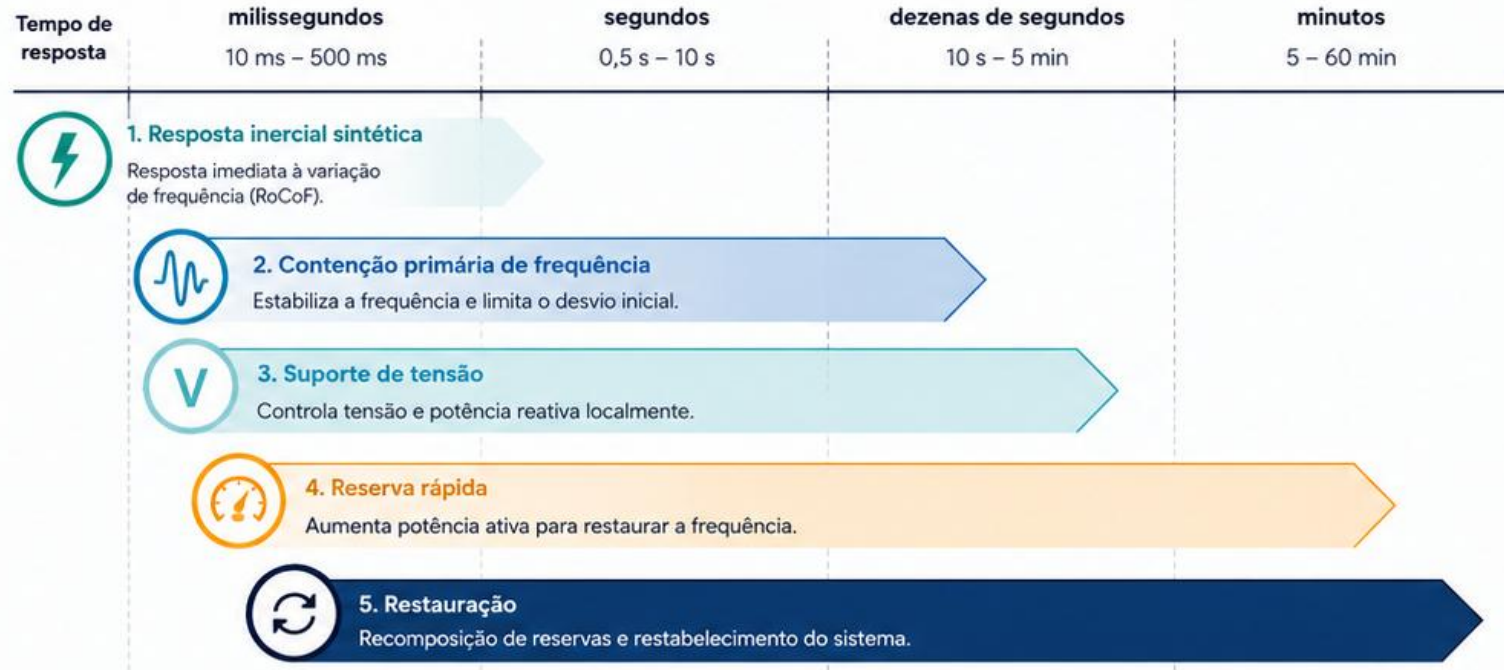


A carga líquida tende a cair ao meio-dia e subir no fim da tarde.

12. Estabilidade e serviços ancilares no ambiente de inversores

A participação crescente de eletrônica de potência muda a dinâmica de frequência e tensão

SERVIÇOS AO SISTEMA EM DIFERENTES ESCALAS DE TEMPO



SERVIÇOS ANCILARES ESSENCIAIS





MAIS INVERSORES, MENOS INÉRCIA SÍNCRONA



CONTROLE POR SOFTWARE



 Inversores podem prover serviços ancilares com controle digital, coordenado e escalável.

 **Serviços ancilares suportam confiabilidade, qualidade da energia e integração de renováveis.**

13. Soluções tecnológicas: flexibilidade em várias escalas

Integração de renováveis exige recursos rápidos, controláveis e coordenados

Armazenamento

Baterias em distribuição, transmissão e junto a renováveis; suavização de rampas; arbitragem e suporte local.

Inversores avançados

Controle de tensão/frequência, funções grid-supporting e grid-forming, ride-through e resposta dinâmica.

Previsão e dados

Previsão solar/eólica/MMGD; telemetria; estimação da carga líquida; operação com dados quase em tempo real.

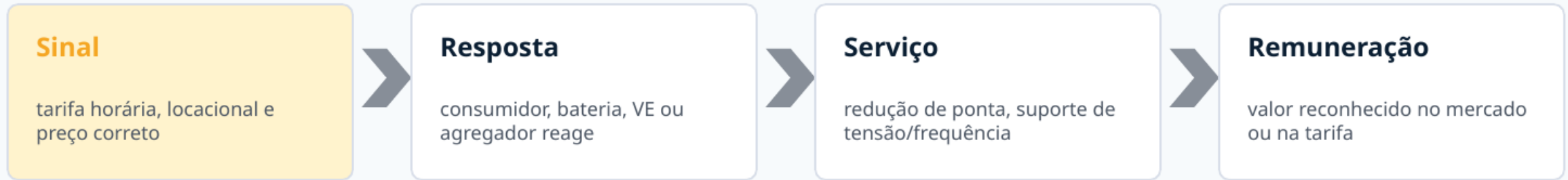
Demanda flexível

Resposta da demanda, recarga inteligente de VEs, tarifas horárias e agregadores de recursos distribuídos.

A flexibilidade precisa ser planejada: recurso certo, no local certo, no horizonte de tempo certo.

14. Mercado e regulação: transformar flexibilidade em valor

Sem sinais econômicos, recursos flexíveis podem não estar disponíveis quando o sistema precisa



Temas regulatórios

Serviços ancilares, agregadores, resposta da demanda, armazenamento, regras de conexão, dados operativos, interoperabilidade e coordenação transmissão-distribuição.

Resultado esperado

Flexibilidade passa a competir como alternativa a despacho térmico, reforço de rede ou curtailment, sempre respeitando confiabilidade e segurança.

15. Oportunidades para o Brasil e agenda de P&D

O Brasil pode transformar seus desafios de integração em liderança tecnológica

Operação digital

previsão, estimação de estado, automação e dados de RED

Flexibilidade distribuída

baterias, VEs, resposta da demanda e agregadores

Novos serviços

suporte de tensão/frequência, reservas rápidas e resiliência

Planejamento integrado

cootimização de transmissão, distribuição, GD e armazenamento

Indústria nacional

inversores, baterias, software, medição e cibersegurança

Microrredes

sistemas isolados, campus, indústrias e comunidades remotas

Agenda recomendada: projetos-piloto com medição, simulação em tempo real, modelos de mercado e validação de requisitos técnicos.

16. Mensagem final

Renováveis e RED são oportunidade — integração é o desafio técnico

O problema não é “ter renováveis demais”.

O desafio é integrar renováveis, RED, rede, operação e mercado para manter segurança, estabilidade e eficiência.

Segurança operativa

frequência, tensão e confiabilidade

Flexibilidade

tecnologia + mercado + regulação

Planejamento integrado

transmissão, distribuição e consumidor



OBRIGADO

Prof. Robson Dias

dias@lafae.ufrj.br

Informação e contatos:

