



# Fontes Renováveis e Geração Flexível

**Prof. Paulo Barbosa**

**Centro de Estudos em Energia e Petróleo  
CEPETRO –UNICAMP**

**01/07/2026**

## Flexibilidade: Um Conceito em Formação

**Ex1.** Ma et. al. (2013): Capacidade do sistema de superar **incertezas**, para além dos desvios de geração e demanda, preservando a confiabilidade do sistema com o mínimo de custo extraordinário

**Ex.2** EPE(2023): Flexibilidade: relaciona-se à existência de *recursos* que promovam *o atendimento às variações de carga do sistema entre dois instantes de tempo.*

### Muitas Definições, porém um Consenso:

Diante da maior número de fatores que trazem *Incerteza e Variabilidade* das Fontes Renováveis >> Sistemas de Potência Modernos têm a Flexibilidade como um *Atributo Imperativo, para manter Segurança e Confiabilidade Operativa*

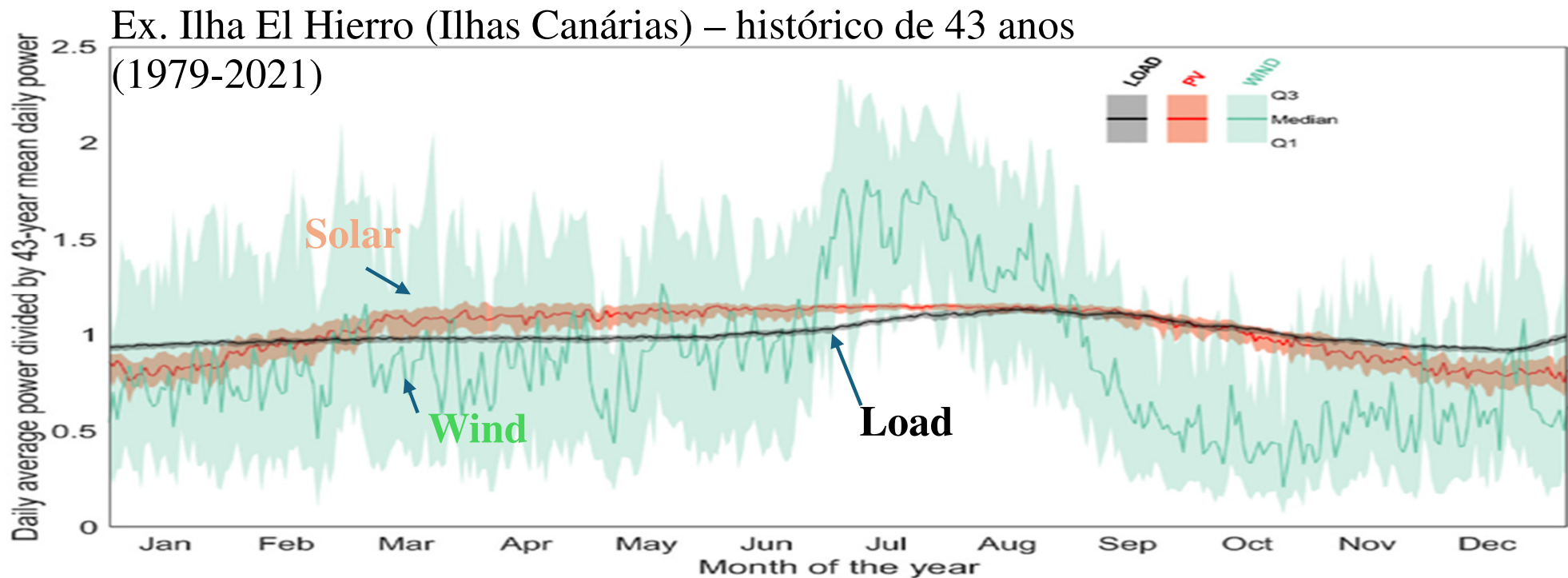
Ma J, Silva V, Belhomme R et al (2013) Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems. IEEE Trans Sustain Energy 4(1):200–209

EPE, Metodologia de Estimativa de Requisitos e Recursos de Flexibilidade no SIN, NOTA TÉCNICA EPE/DEE/076/2023-R0, Rio de Janeiro, 2023

## Questões sobre Flexibilidade:

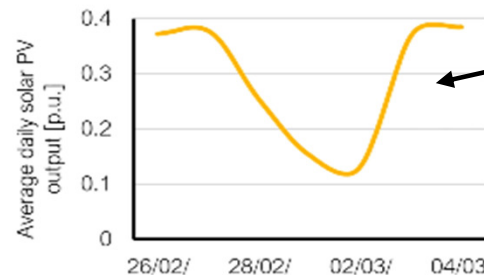
- Q1: Por que é necessária?
- Q2: Quanto é necessário?
- Q3: Aonde (posição no grid) é necessária?
- Q4: Quando é necessária ?

**Q1: Por que é necessária?** Recurso de compensação à variabilidade

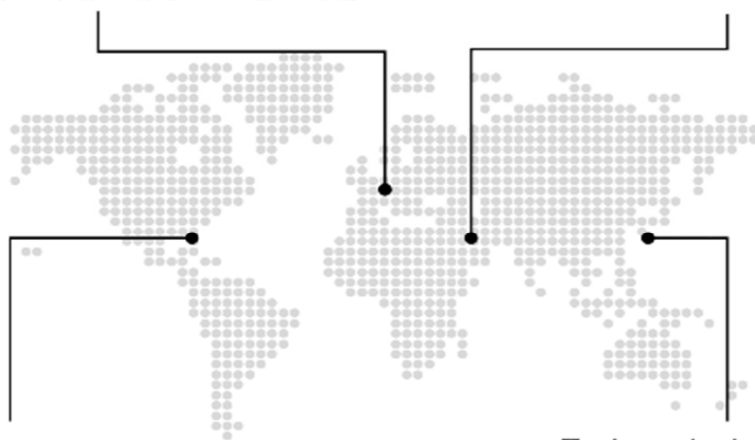


# Questões sobre Flexibilidade: Recurso para a Mitigação da Imprevisibilidade

Dunkelflaute na Alemanha:  
December 2024



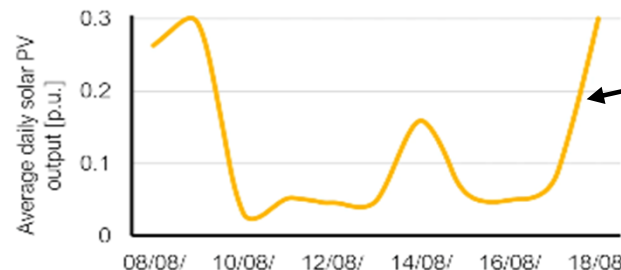
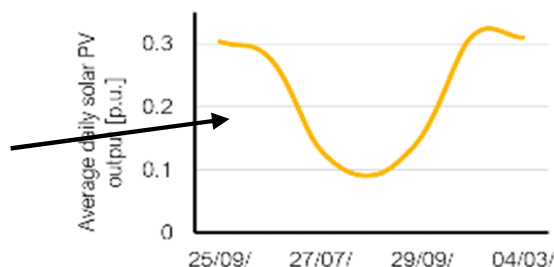
Tempestade de areia na Arábia Saudita



Hurricane in the USA

Typhoon in Japan

Furacão nos EUA



Tufão no Japão

**BRASIL:** SIN é vulnerável a eventos climáticos extremos, **Exs.** secas, ondas de calor, incêndios, tempestades, inundações, que podem levar a danos físicos às estruturas de geração e transmissão



### Número de Perturbações na Rede Básica (>230kV) em Anos Recentes

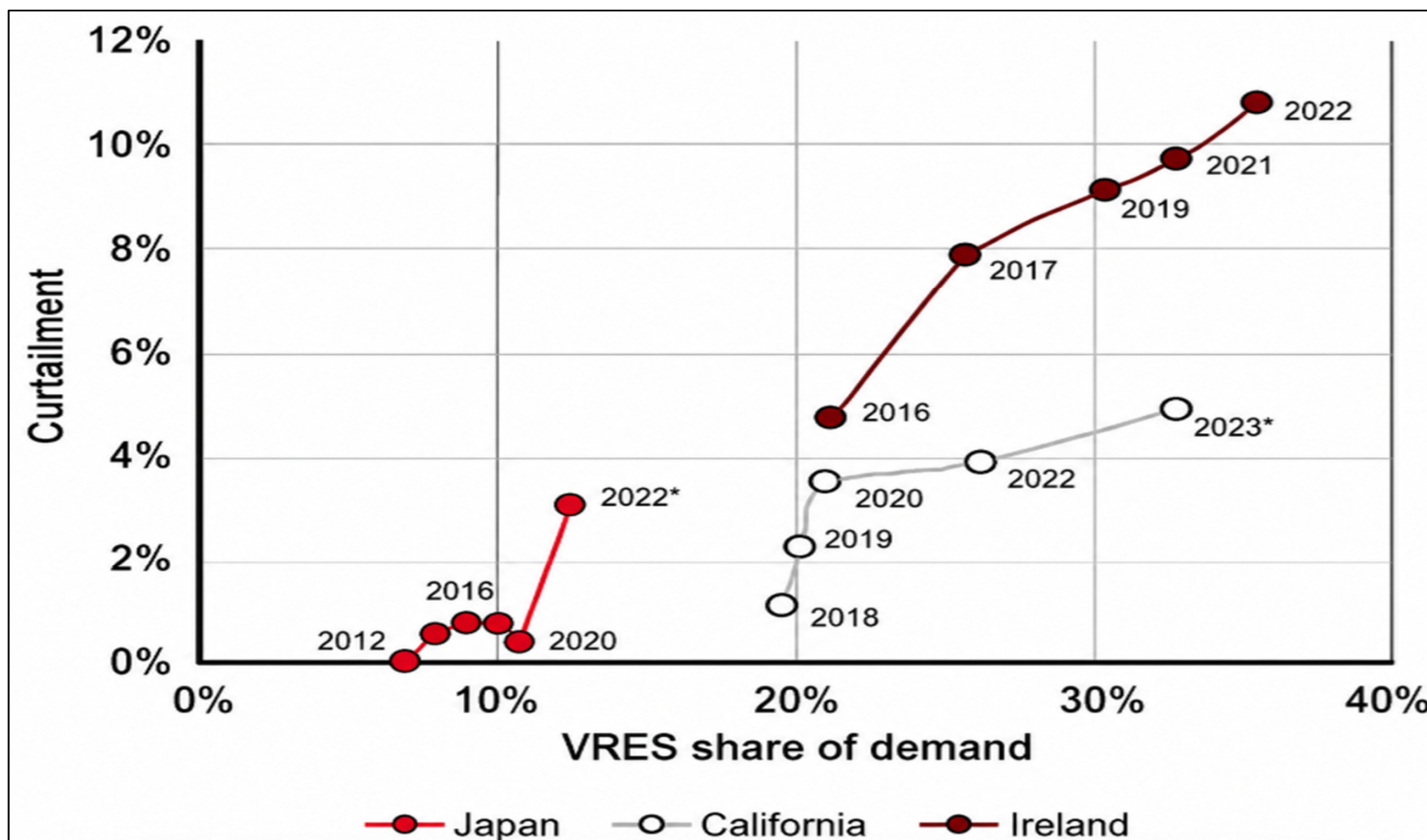


**Legenda:**

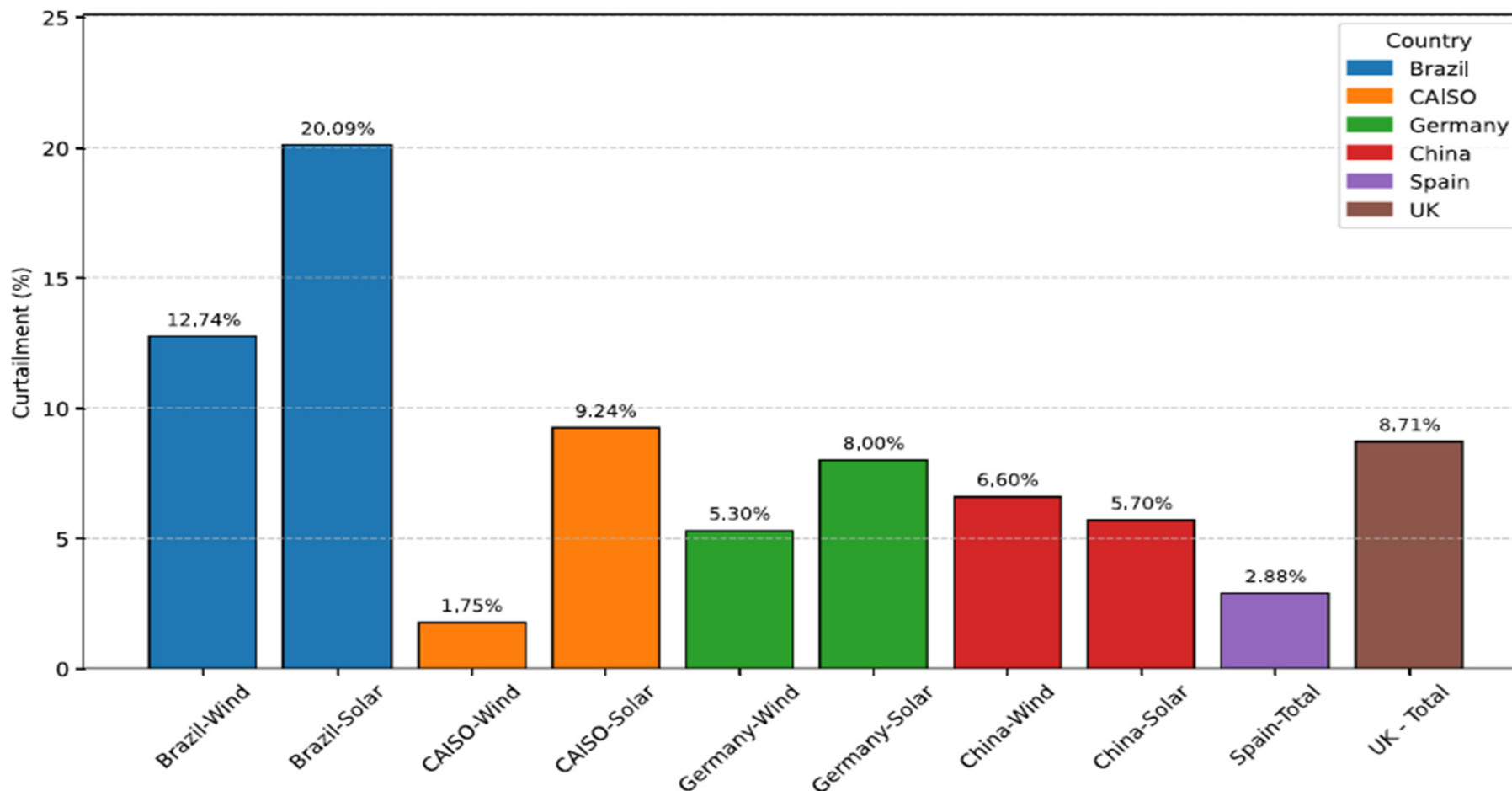
- Total de perturbações
- Com qualquer corte de carga
- Com corte de carga ≥ 100 MW
- Com corte de carga ≥ 500 MW
- Com corte de carga ≥ 1.000 MW

As perturbações na Rede Básica do ONS são eventos anômalos, como curtos-circuitos ou falhas de equipamentos, que afetam a estabilidade e o fornecimento de energia no SIN.

## Impactos da Ausência de Flexibilidade Operacional (Sentido Amplo) em Sistemas de Potência com Maior Presença de Renováveis (VRE)



# Impactos da Ausência de Flexibilidade Operacional (Sentido Amplo) em Sistemas de Potência com Maior Presença de Renováveis (VRE)



Average curtailment ratio comparison of the first semester of 2025 among different countries.

Fonte: Giovani T.T. Vieira et al. (2026) Characterizing wind and solar curtailment in Brazil: an evidence-based analysis of operational drivers, Electric Power Systems Research

**Questões sobre Flexibilidade:**

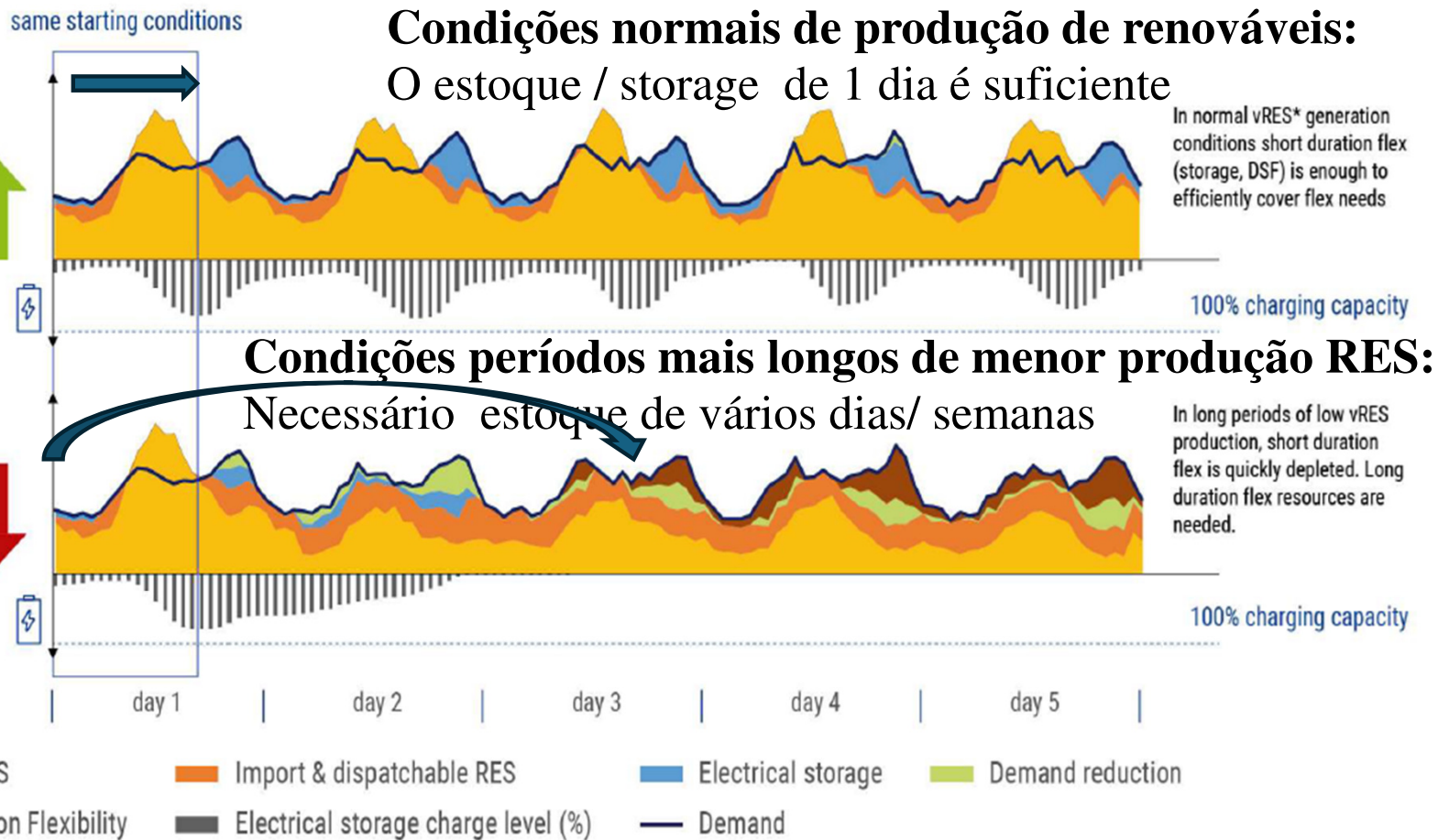
**Q2: Quanto é necessário?**

**Q4: Quando é necessária ?**

**Curto Prazo** (ms a poucas hs), dentro do dia



**Longo Prazo** (semanas, meses ao longo do ano)

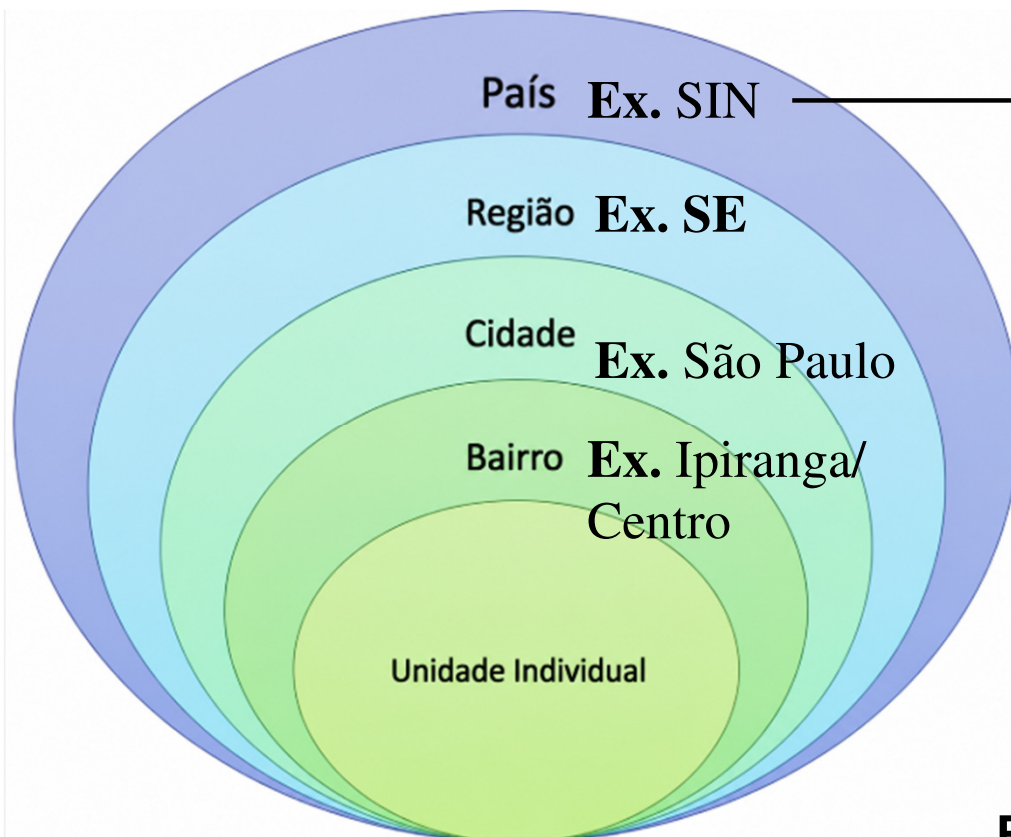


\* vRES = Variable Renewable Energy Sources, characterised by their intermittent and weather-dependent nature

# Questões sobre Flexibilidade

- Q3: Aonde (posição no grid) é necessária?

## Dimensão Espacial da Flexibilidade

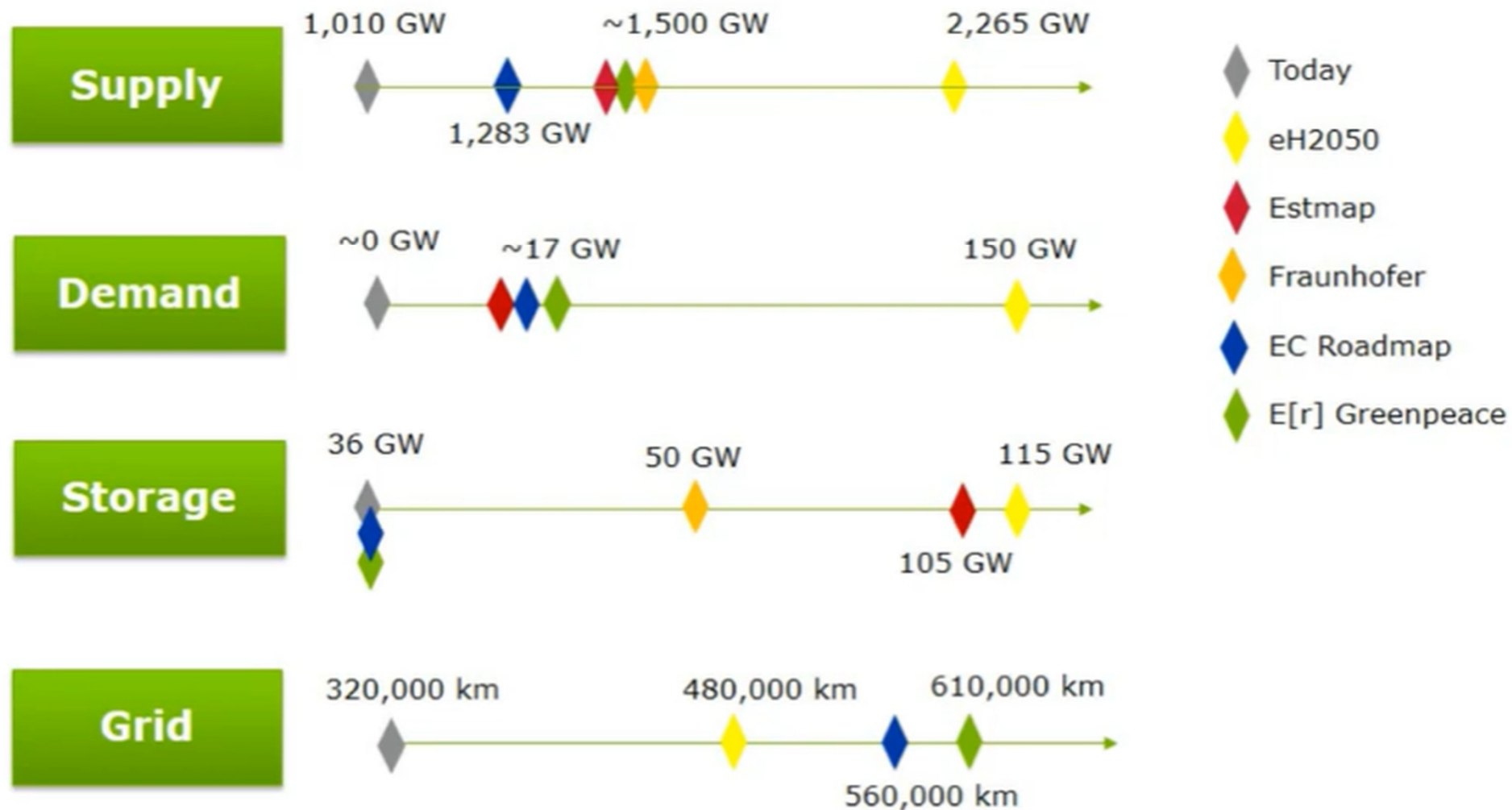


**ONS:** Os estudos de planejamento da operação de curto prazo têm apontado cenários de carga mínima diurna nos finais de semana com necessidade de abertura de até 30 linhas

## Recursos Planejados do ONS-PAR-PEL 2025

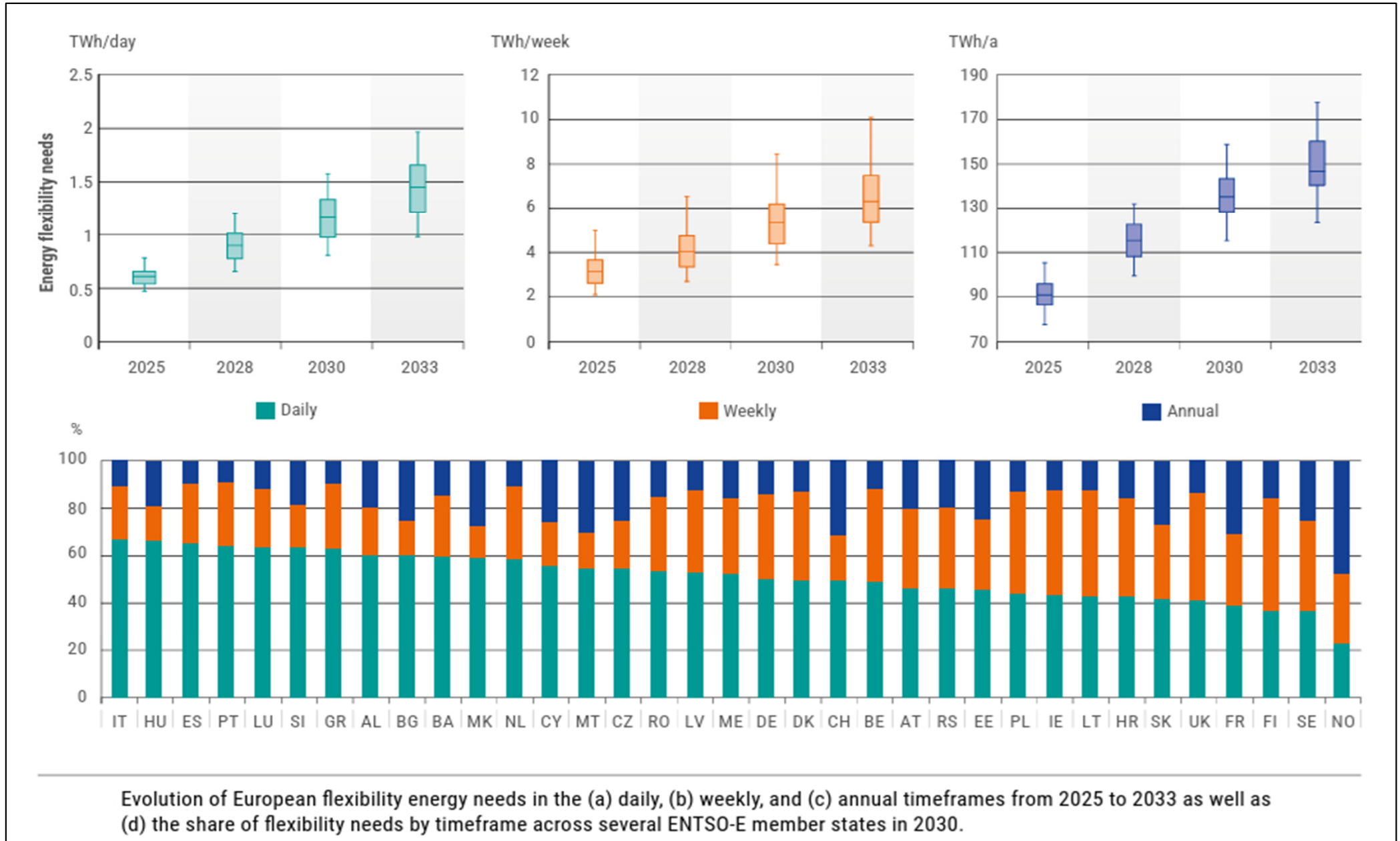
- Unidades geradoras;
- Compensadores síncronos e estáticos;
- Comutadores sob carga dos transformadores;
- Bancos de capacitores e reatores;
- **Abertura de linhas de transmissão.**

# Necessidades de Flexibilidade nas Diversas Dimensões- Estudos para a Europa (2017)



Fonte: ECOFYS, Meta-study on Power System Flexibility, to Achieve 100% renewable electricity system <https://www.youtube.com/watch?v=rCNLv5WQcy4>

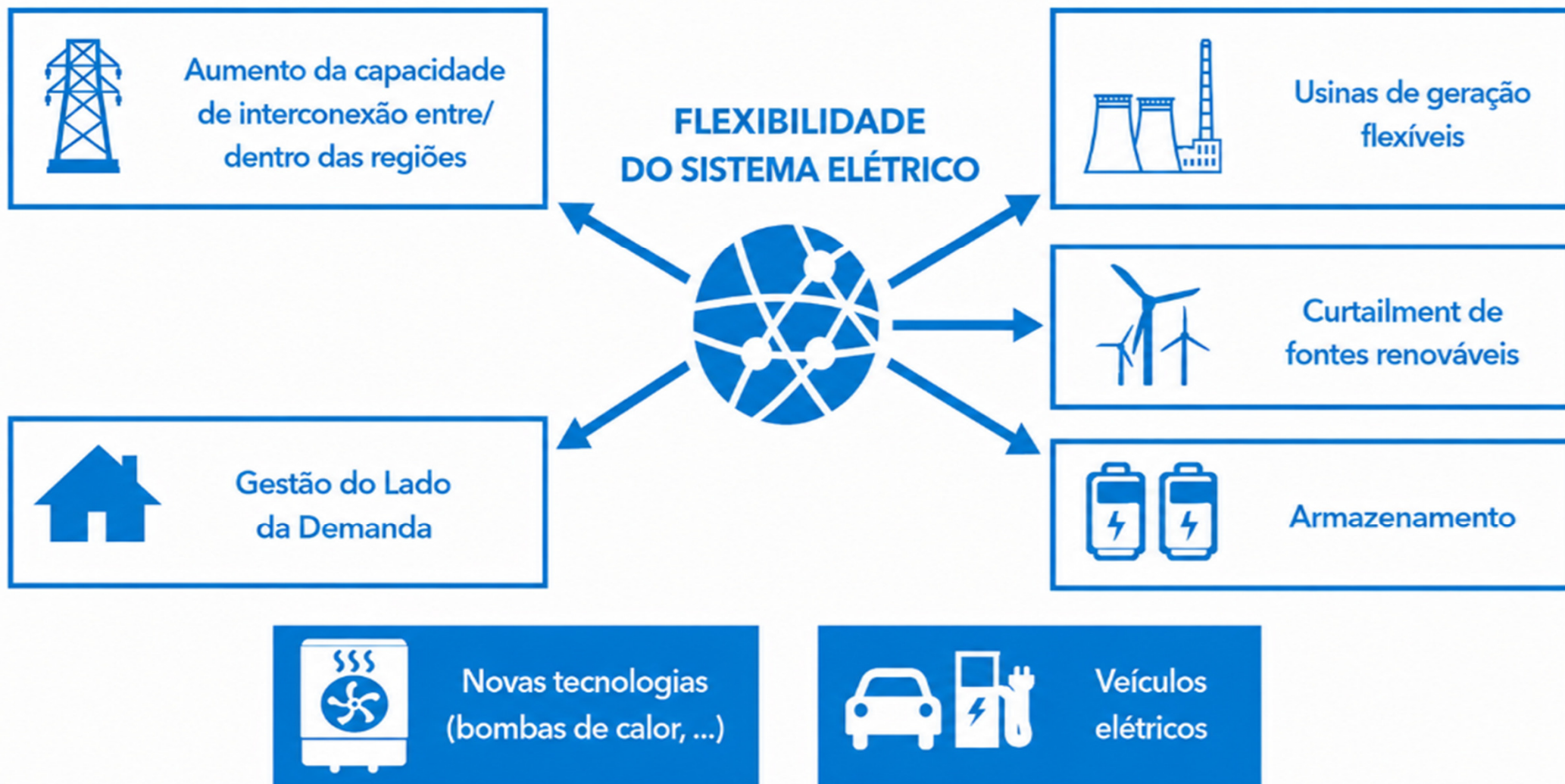
# Necessidades de Flexibilidade nas Diversas Dimensões- Estudos para a Europa (2024)– Dimensão Temporal e Espacial



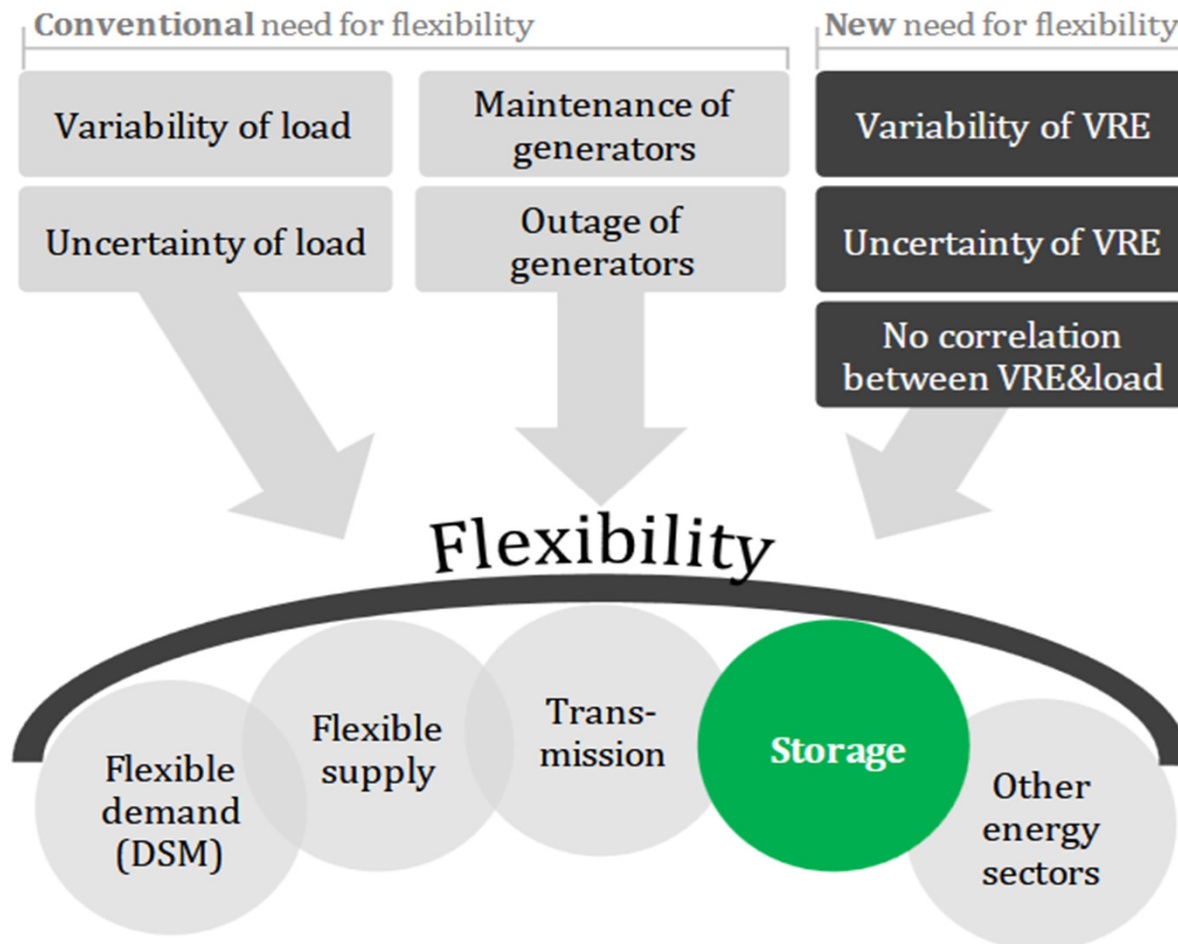
Evolution of European flexibility energy needs in the (a) daily, (b) weekly, and (c) annual timeframes from 2025 to 2033 as well as (d) the share of flexibility needs by timeframe across several ENTSO-E member states in 2030.

**Fonte:** ENTSO-E Executive Summary System Flexibility Needs for the Energy Transition December 2024

## Recursos de Provisão de Flexibilidade (1)



## Recursos de Provisão de Flexibilidade (2)



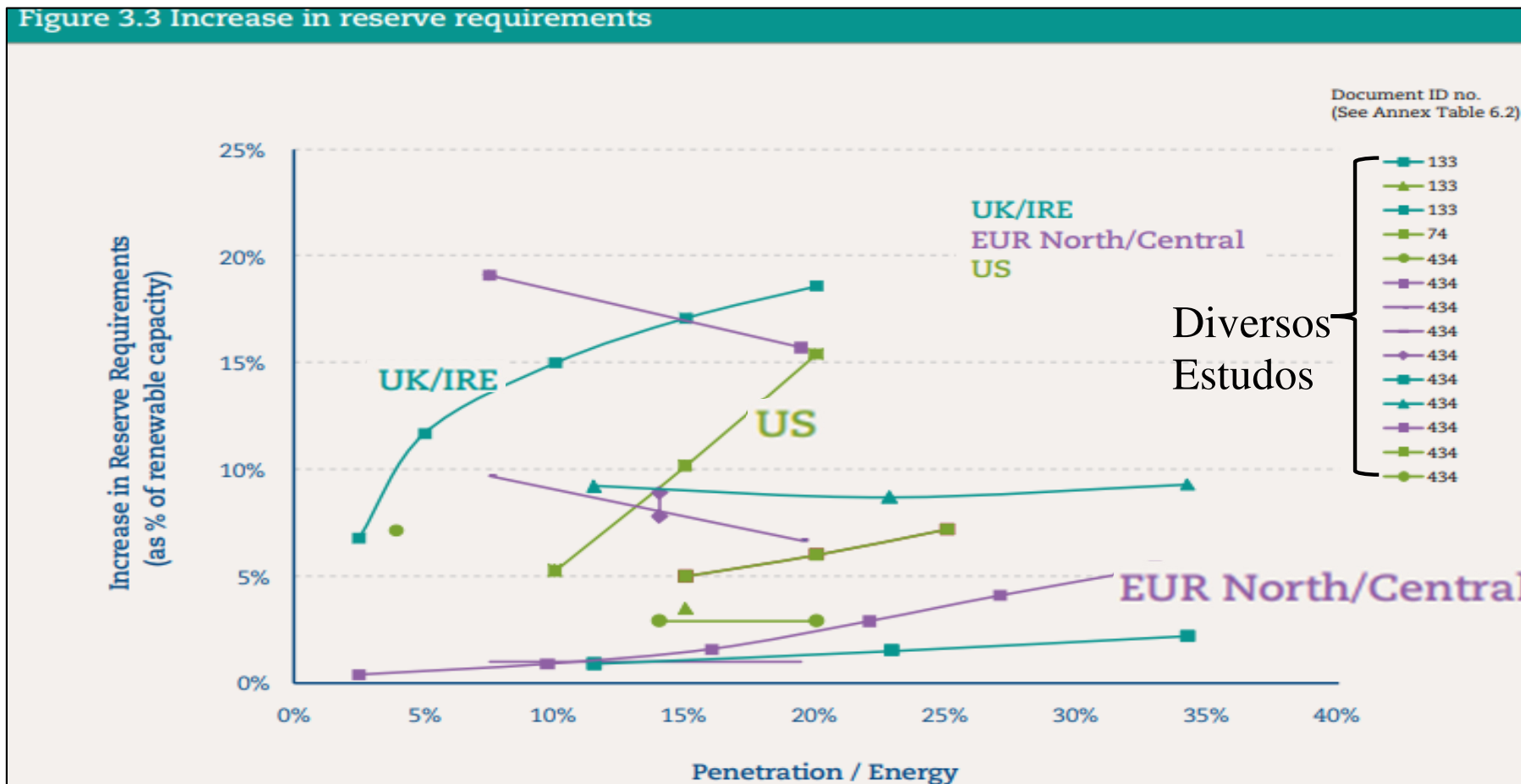
**Fig. 1** Need for flexible power systems and sources of flexibility.

Fonte: Optimal planning of hydropower and energy storage technologies for fully renewable power system <https://henry.baw.de/server/api/core/bitstreams/6db0e0eb-2586-4672-968d-4e1be736ff80/content>

# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas

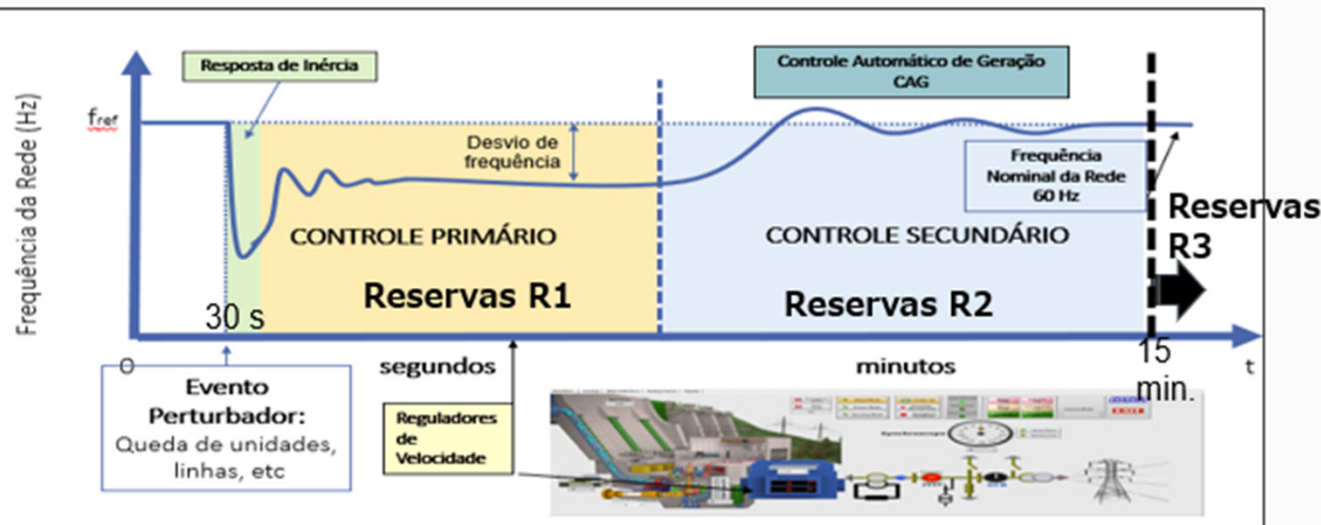
UKEnergy ResearchCentre

*The costs and impacts of intermittency – 2016 update A systematic review of the evidence on the costs and impacts of intermittent electricity generation technologies*



# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas

**Controle Primário** → Resposta imediata e autônoma das unidades *geradoras sincronizadas* (reguladores de velocidade).  
**Controle Secundário** → Resposta de unidades controladas pelo CAG ou instruídas manualmente pelo Operador do Sistema, bem como a utilização de unidades de partida rápida visando restabelecer a frequência nominal.



## Exemplos de ações do R3:

- conexão ou desligamento de unidades de geração;
- redistribuição de unidades geração que participam do controle secundário e
- alteração no programa de intercâmbio de potência entre áreas

Fonte: Apresentação de Daniel José Tavares de Souza (EPE), em Workshop ONS, 31/07/2019 e [https://www.dsdaco.com/en/portfolio/hpp\\_simulador\\_en/](https://www.dsdaco.com/en/portfolio/hpp_simulador_en/)

# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas

## Europa: ENTSO-E

### ENTSO-E: 4 grupos de Reservas

1) **FCR (primária)**

Ativada dentro de 30 s

2) **aFRR (secundária)**

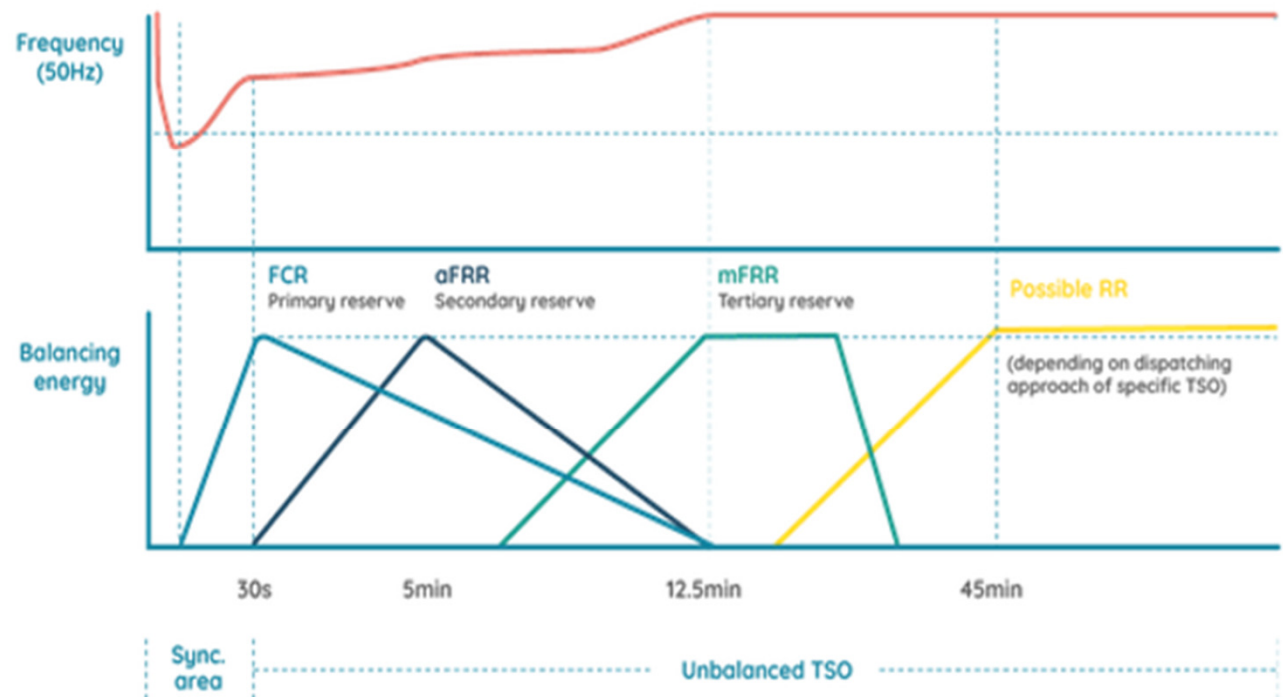
Ação plena em até 5 min.

3) **mFRR (terciária)**

(entre 12 min. a 30 min.)

4) **Replacement Reserves (RR)**

(Reserva Contingência: entre 30 min. a 45 min./ 1h)



# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas, Soluções de Mercado e Custos

## Ex.1 Países Nórdicos (Ano 2022)

Country	TSO	Percentage/Volume of Total Nordic Share							
		FFR		FCR-N		FCR-D		aFRR	
Denmark (DK2)	Energinet	8 %	24 MW	2.74 %	17 MW	3 %	43 MW	10 %	30 MW
Finland	Fingrid	18 %	54 MW	19.88 %	119 MW	20 %	290 MW	20 %	60 MW
Norway	Statnet	39 %	117 MW	39.04 %	234 MW	37 %	537 MW	35 %	105 MW
Sweden	Svenska kraftnät	35 %	105 MW	38.33 %	230 MW	40 %	580 MW	35 %	105 MW
Total		300 MW		600 MW		1450MW		300 MW	

Fig. 1. a) Synchronous areas (SA) map b) Denmark DK1 and DK2 on SA map c) volume requirements per service per country for Nordic SA.

## Preços de Mercado (Leilões)

### Wind Power in Nordic countries:

Finland: 28%

Sweden: 25%

Denmark: 50%

Norway: 10%

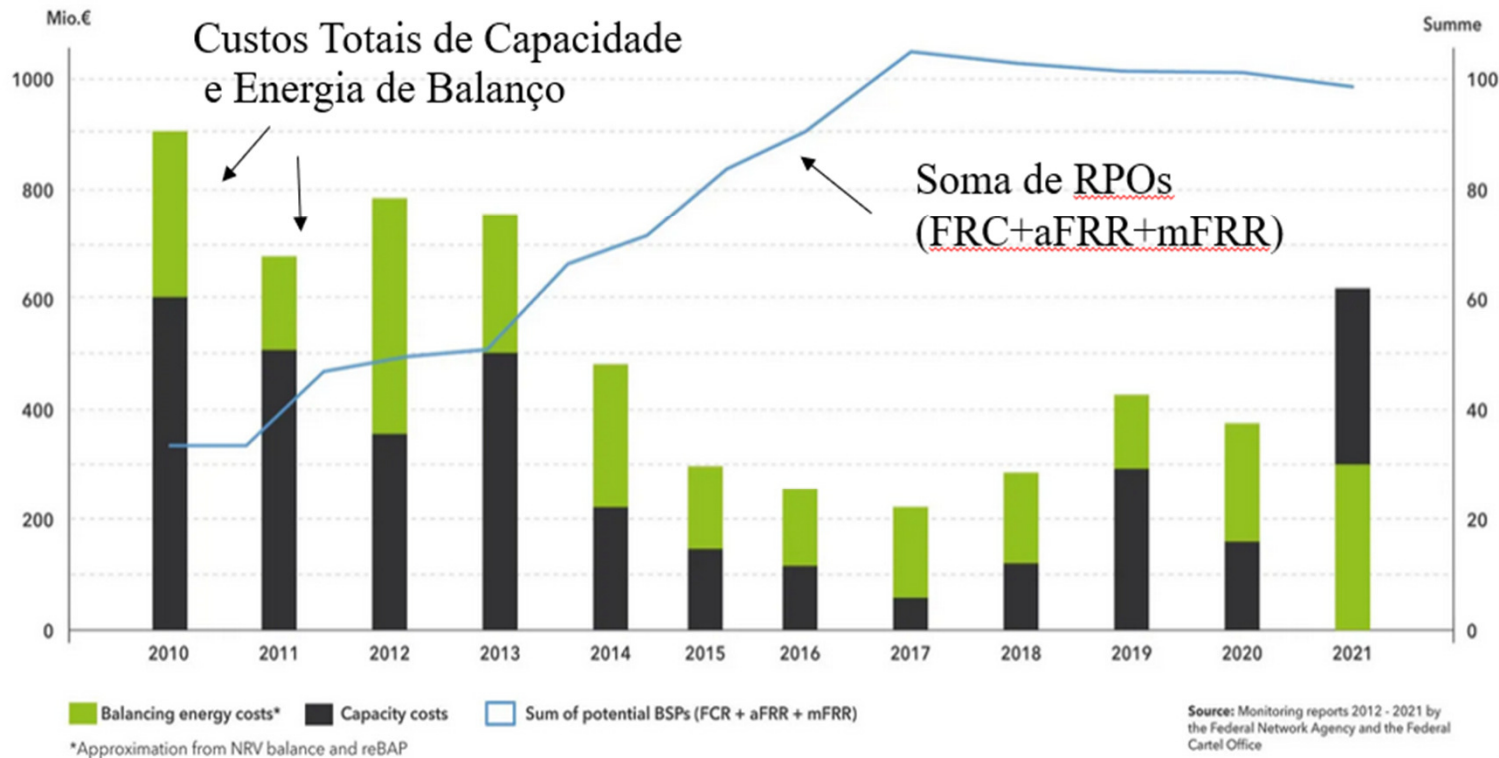
### 2021 statistics of ASs in DK2.

Year	Service	No. of purchase hours	Procured quantity (MW)	Average price (DKK/MWh)	Annual payment (million DKK/MW)
2021	FCR-N	8760	10	281	2.461
2021	FCR-D	8760	30	335	2.934
2021	FFR	1555	7	2725	4.237

**Obs. FFR: fast Frequency Reserve** Obs. 1 DKK = 0,14 USD

# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas, Soluções de Mercado e Custos

Ex.2 Alemanha (Year 2025: Wind: 27% Solar: 18%)

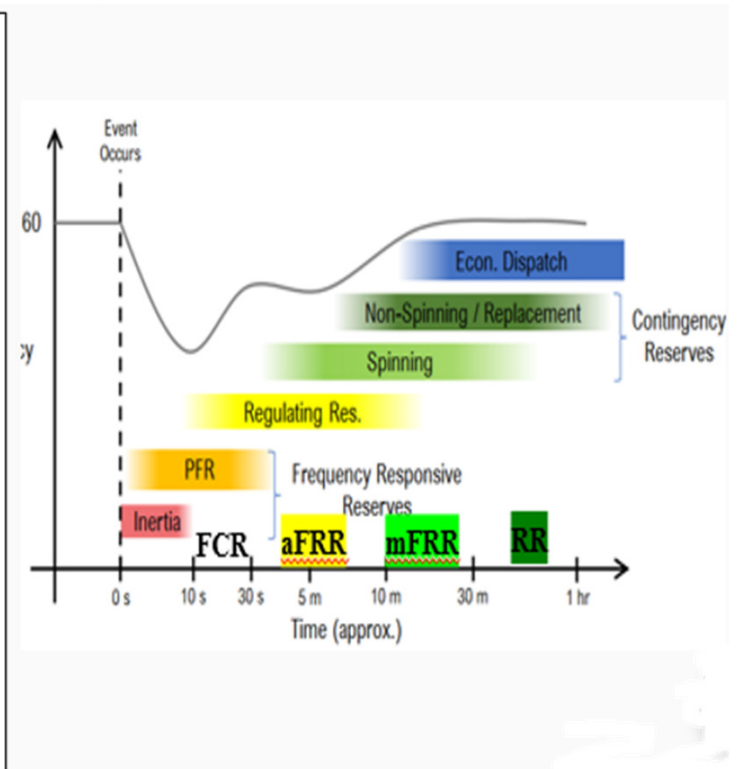
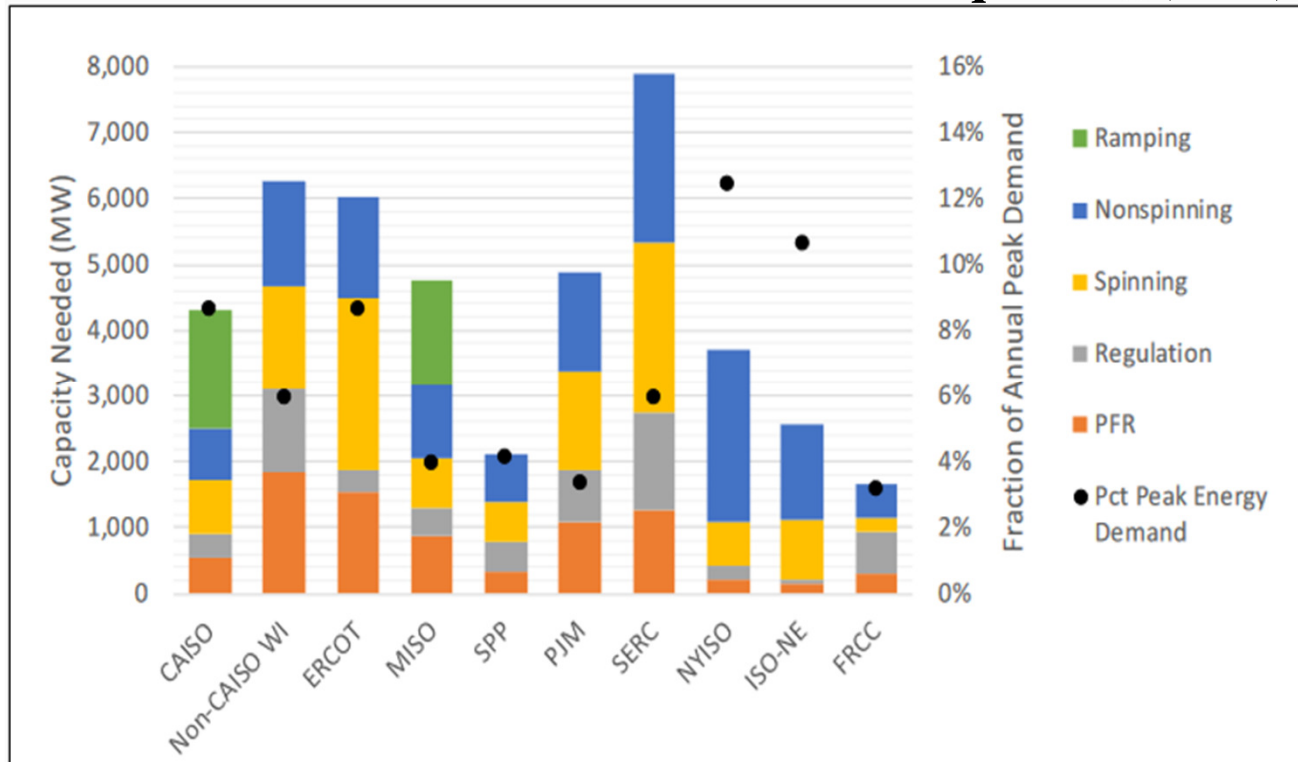


**Obs.**

- a) Redução Progressiva dos custos totais de capacidade e energia de balanço (2010 a 2017)
- b) Aumento do volume de RPO(FRC+aFRR+mFRR)
- c) Menores geradores/descentralizados entram nos Leilões via Agregadores

# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas, Soluções de Mercado e Custos

## Ex.3 Estados Unidos- Total de Reservas Requeridas (MW) em Cada Mercado



Fonte: NREL, 2019 Grid Services: Concepts, Requirements & Provision from Wind

# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas, Soluções de Mercado e Custos --BRASIL

**Reserva primária (R1)- ALOCAÇÃO DA RESERVA DE POTÊNCIA OPERATIVA** (Procedimentos de Rede, sub-módulo 10.6 ANEXO 3): automática e descentralizada, 1% da carga, via reserva girante das usinas hidráulicas

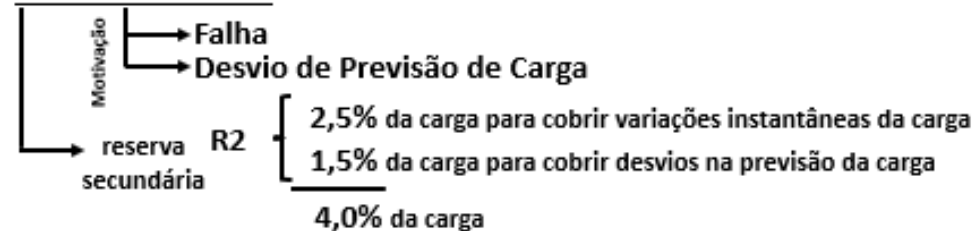
## Reserva Secundária (R2):

Essa reserva tem a *função de recuperar a frequência do sistema*, alterada pelas variações momentâneas ou de curta duração da carga ou da geração eólica

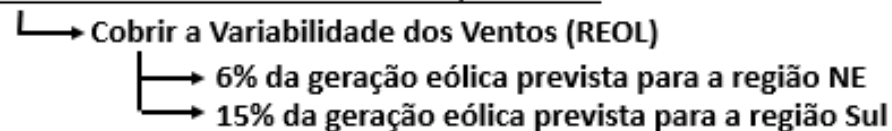
[REN ANEEL nº 822/2018  
Despacho Complementar para  
Manutenção da RPO)

## Preservação da Reserva de Potência Operativa nas Unidades Geradoras Hidráulicas

### RPO Convencional



### Inclusão da Variabilidade da Geração Eólica:



### Atendimento à Região Nordeste

**$RPO_{NE} = 4\% \text{ da carga NE} + 6\% \text{ geração eólica NE}$**

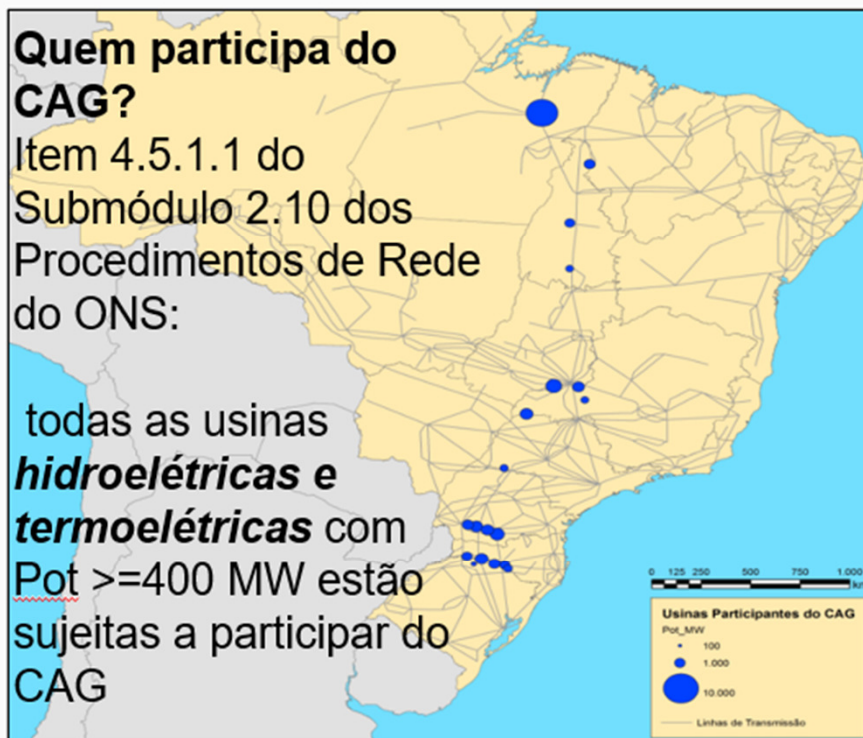
**Exemplo: Supondo demanda de 11.000 MW e geração eólica de 7.000 MW.**

**$RPO_{NE} = 440 \text{ MW} + 420 \text{ MW} = 860 \text{ MW}$**

**Em função das condições hidroenergéticas na Bacia do Rio São Francisco, o CAG do Nordeste se encontra desligado. Desta forma, deve-se alocar folga no RNE para que este valor seja adicionado à RPO alocada nos demais subsistemas.**

# Renováveis e Serviços Ancilares: A Provisão de Reservas Operativas, Soluções de Mercado e Custos

## A Provisão de Reserva secundária (R2): Via CAGs (Controle Automático de Geração)



### Características das usinas participantes do CAG

- Receita anual **R\$44.156,20** (2016, atualizado pelo IPCA) (REA ANEEL n.7.253/2018)
- **19 hidroelétricas** com reservatório (26% do total) (**volume útil total 101.403 hm<sup>3</sup>**)
- Potência instalada total das usinas **27GW** (**17% SIN** em 2018);
- **Idade de 8 a 46 anos** (média de 28). Algumas já modernizadas;
- **16 c/ turbinas Francis e 3 c/ turbinas Kaplan;**

UHE Água Vermelha
UHE Barra Grande
UHE Emborcação
UHE Nova Ponte
UHE Estreito
UHE Lajeado
UHE Itá
UHE Machadinho
UHE Governador Bento Munhoz da Rocha Netto (Foz do Areia)
UHE Governador Ney Aminthas de Barros Braga (Segredo)
UHE Capivara
UHE Tucuruí
UHE Itumbiara
UHE Campos Novos
UHE Peixe Angical
UHE Foz do Chapecó
UHE Passo Fundo
UHE Salto Osório
UHE Salto Santiago

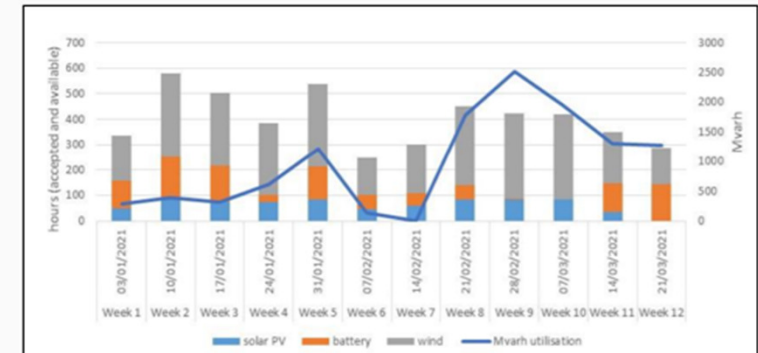
# Renováveis e Serviços Ancilares: Experiência Internacional na Provisão e Remuneração de Suporte de Reativos

País/região	Requerimento e Forma de Provisão de Reativos	Como são contratados e pagos	Obs
Brasil	As unidades geradoras hidrelétricas que instalam equipamentos para operação em compensação síncrona assinam contrato de prestação desse serviço (CPSA) com o ONS e então passam a ter ordem de despacho que são remunerados	O volume efetivo de reativos prestado (MVar-h) é pago mensalmente tendo o valor da tarifa anual TSA (RS/MVar-h)	Valor do TSA em 2024: RS-9,48/MVar-h
Grã-Bretanha	Parte Obrigatória para geradores com Pot. > 50MW  Leilões (para capac. > 5 MVar) para necessidades complementares	Tarifa fixa mensal: ORPS  Preço vencedor de leilão	ORPS - Valor médio de 2023: £6,83/MVarh; Ano 2024: £4,40/MVarh.

## Obs. Grã-Bretanha:

Experiência Rica sobre Introdução de Mecanismos de Leilão para Suporte de Reativos, desde 2020:

## Power Potential Project



## EUROPA:

- 1) Boa parte dos países europeus requer parte obrigatória de provisão de reativos dos geradores, sem ressarcimento dos custos (Suécia, Dinamarca, Itália, Espanha) ou com ressarcimento (Noruega, Suíça, Bélgica, Alemanha, França);
- 2) O mecanismo de leilão é alternativa para parte complementar na Bélgica e Grã Bretanha.

## Renováveis e Serviços Ancilares: Controle de Tensão na Transmissão

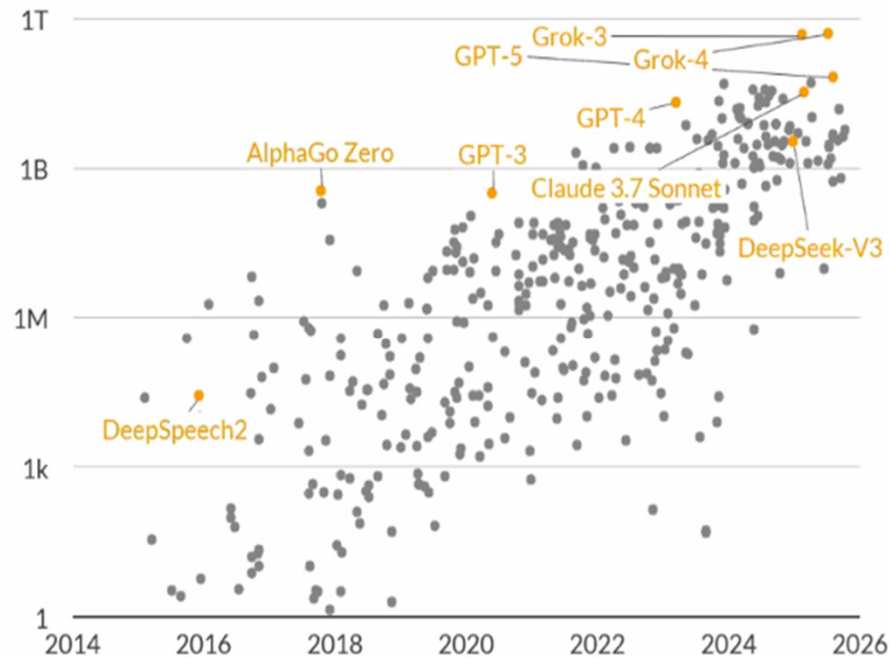
### A Revisão da Experiência Internacional do Controle de Tensão em Redes, revela:

- A importância crescente, acentuada diante da maior participação de fontes de energia renováveis variáveis (FERVs)
- A exigência de obrigatoriedade da contribuição dos geradores na provisão de suporte de reativos, sendo remuneradas ou não
- Ainda é pequena a participação dos mecanismos de leilão para obtenção de suporte de reativos (Bélgica, Grã- Bretanha e Austrália)
- São diversificadas as formas de remuneração do serviço de controle de tensão, incluindo remuneração por volume entregue (\$/MVar-h); por capacidade disponibilizada (\$/MVar/h); por custo de oportunidade (\$/MWh), e formas mistas

# FLEXIBILIDADE OPERACIONAL e RENOVÁVEIS: POSSÍVEIS DEMANDAS ADICIONAIS E SOLUÇÕES

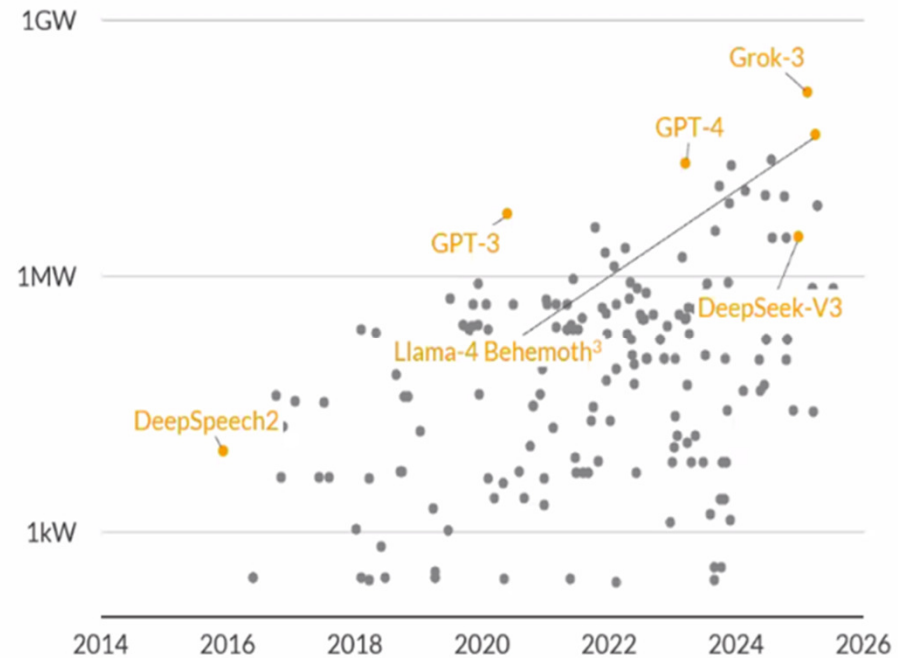
## 1) Crescimento de Novas Demandas: Data Centers

Training compute of notable AI models<sup>1</sup>  
PetaFLOPS<sup>2</sup>, log scale



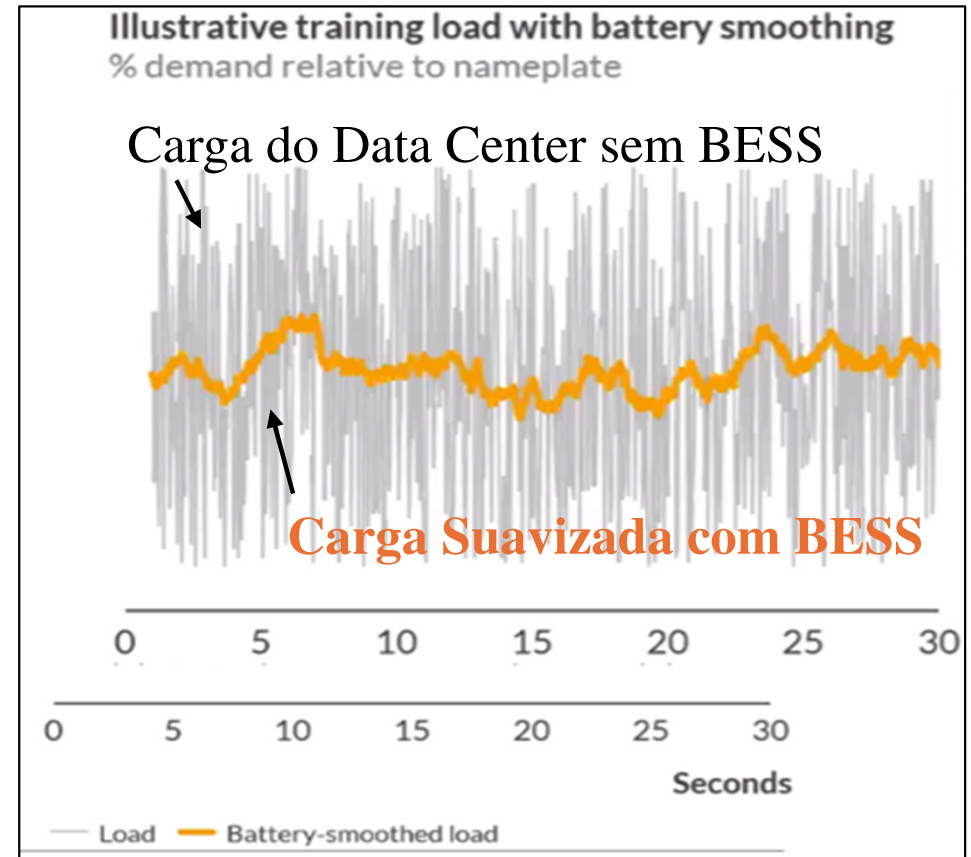
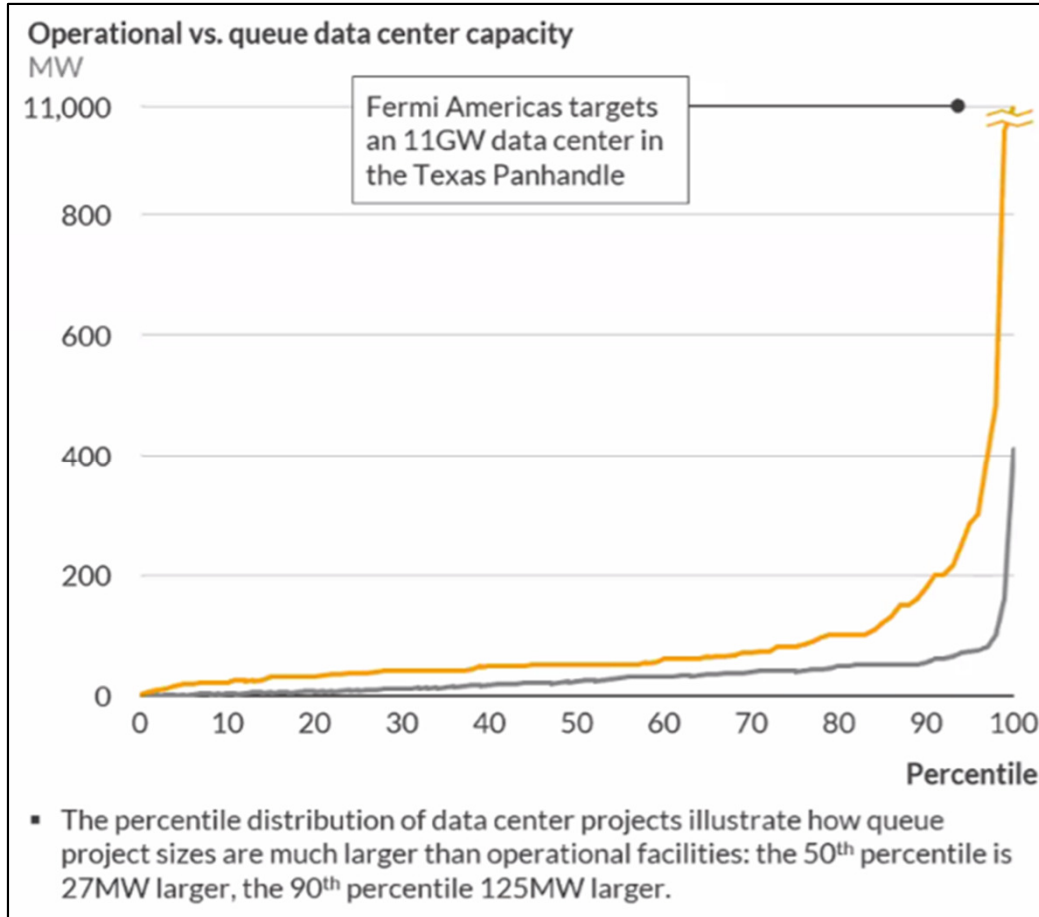
▪ Training compute of AI models is doubling every five months.

Power draw required for training frontier models<sup>1</sup>  
W, log scale



▪ Power required to train each new AI model is doubling annually.

# 1) Crescimento de Novas Demandas: Data Centers



ISOs have many options, ranging in speed:

- Increase Ancillary Service (AS) procurement for regulation services, though minimum response times may need to be addressed. *Relatively quick process, ISOs review procurement on an annual basis and can revise throughout the year.*

## 2) Aceleração da Transição Energética Pós Conflitos Geopolíticos

### US energy storage installations hit Q1 record, up 32% year over year: SEIA

The United States installed 9.7 GWh of battery energy storage in the first quarter of 2026, up **32%** year over year,

Utility-scale deployments reached 1.5 GW/7.8 GWh; commercial and industrial deployments reached 648 MWh; and residential deployments hit 515 MWh,

[https://www.utilitydive.com/news/us-energy-storage-installations-hit-q1-record-up-32-year-over-year-seia/821133/?utm\\_medium=email&utm\\_source=rasa\\_io&utm\\_campaign=CESource-20260527-newsletter](https://www.utilitydive.com/news/us-energy-storage-installations-hit-q1-record-up-32-year-over-year-seia/821133/?utm_medium=email&utm_source=rasa_io&utm_campaign=CESource-20260527-newsletter)

### EUROPA:

# 102.7GW

Total energy storage capacity installed in Europe today

# 13.5GW / 26.4GWh

New electrochemical storage installed across Europe in 2025

# 485.5GWh

Forecast electrochemical storage capacity across Europe by 2030

## 2) Aceleração da Transição Energética Pós Conflitos Geopolíticos

Leaders argue that accelerating electrification is one of the most effective ways to reduce exposure to volatile global fossil fuel markets.

24/06/2026



IEA executive director Fatih Birol, UK Energy Secretary Ed Miliband and European Commissioner for Energy and Housing Dan Jørgensen at the Global Energy Transition and

## CONCLUSÕES

- A continuidade da Inserção das Renováveis no Grid é uma Tendência Irreversível
- As soluções de Provisão de Flexibilidade Operacional são múltiplas, podendo ser obtidas por meio do Lado da Oferta (ex.Storage, Fontes de Geração flexível), da Demanda (DR, Localização de Cargas Especiais, etc), e do Transporte (Ampliação das Redes Elétricas)
- A escolha de cada uma delas depende das condições e vocações locais/ regionais, **porém**, tem que ser planejadas de forma integrada, formando os futuros Sistemas de Potência com Renováveis e Storage planejados



**Muito Obrigado**

**Prof. Paulo Barbosa**

**CEPETRO-UNICAMP**

**E-mail: [paulobar@unicamp.br](mailto:paulobar@unicamp.br)**