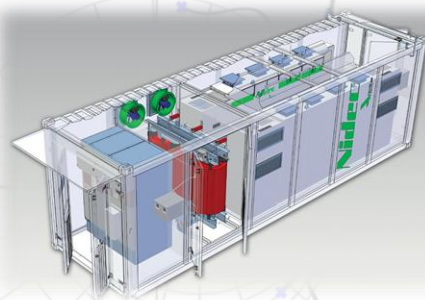




Funções dos sistemas de armazenamento no SEP

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Tópicos a serem abordados

Por que utilizar sistemas de armazenamento no SEP;



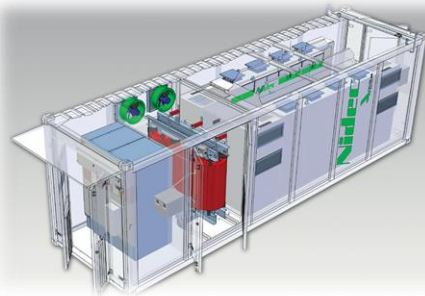
Possibilidades de serviços auxiliares.



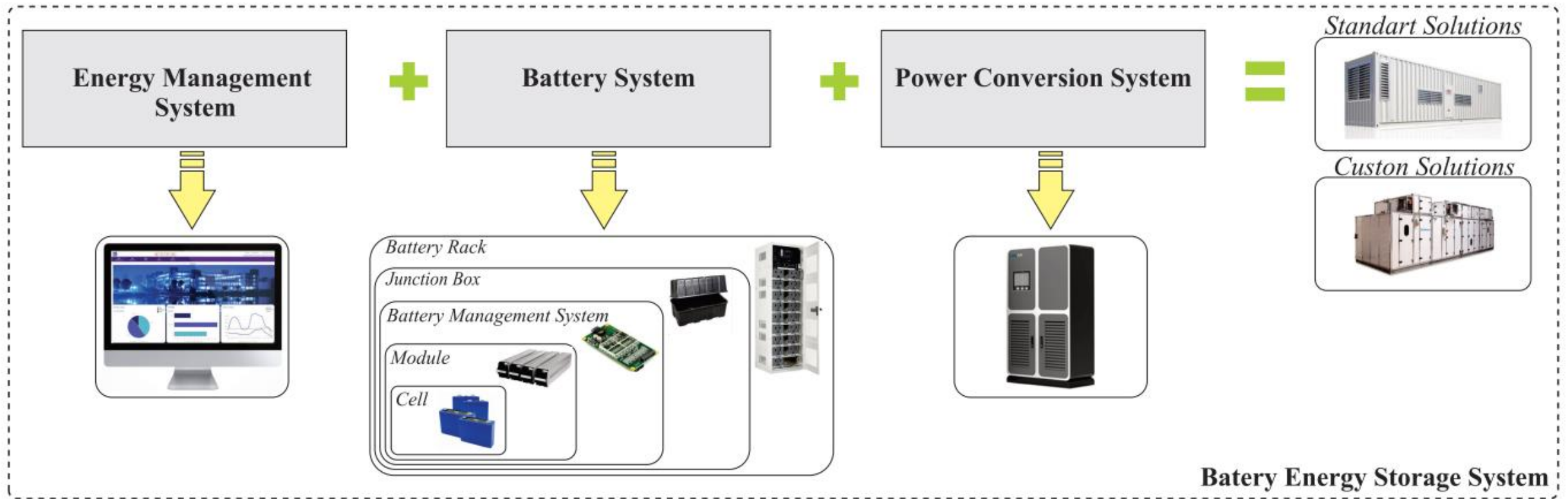


Por que utilizar sistemas de armazenamento no SEP?

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org

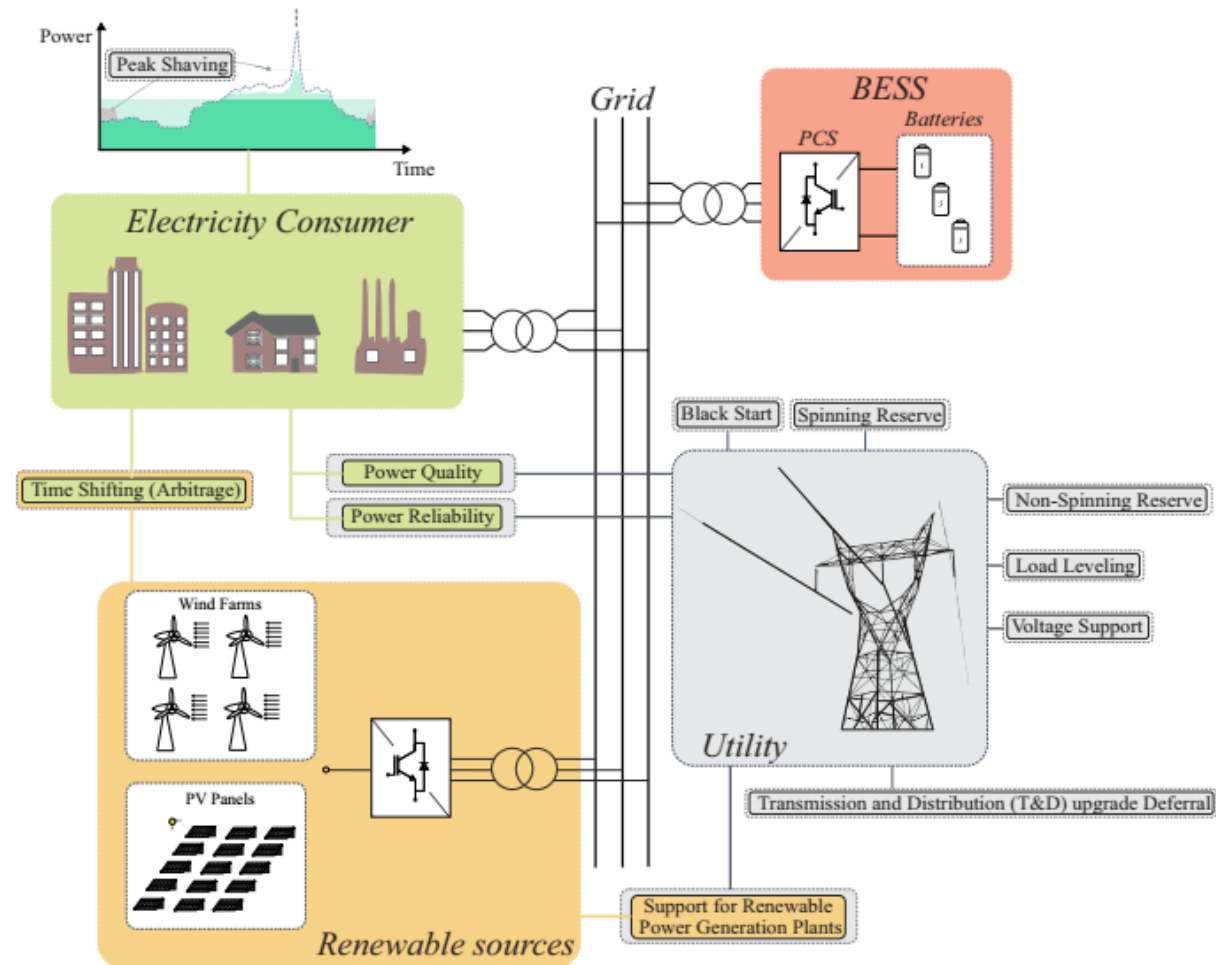


Até o momento: Visão interna do BESS



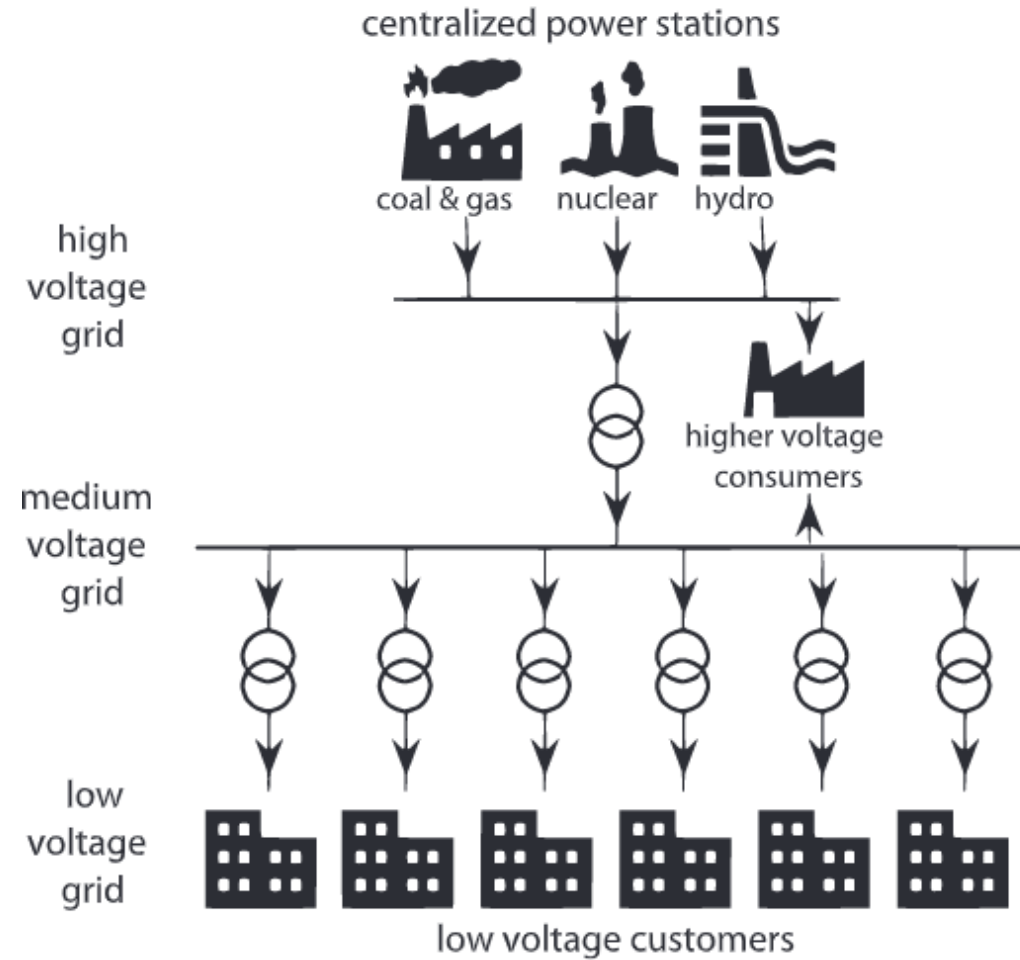
Fonte: Jonathan Hunder Dutra Gherard Pinto, “Modeling, Design and Performance Evaluation of Battery Energy Storage Systems based on Modular Multilevel Converter” Exame de Qualificação, Universidade Federal de Minas Gerais 2020.

Objetivo: Sistema de armazenamento no sistema elétrico



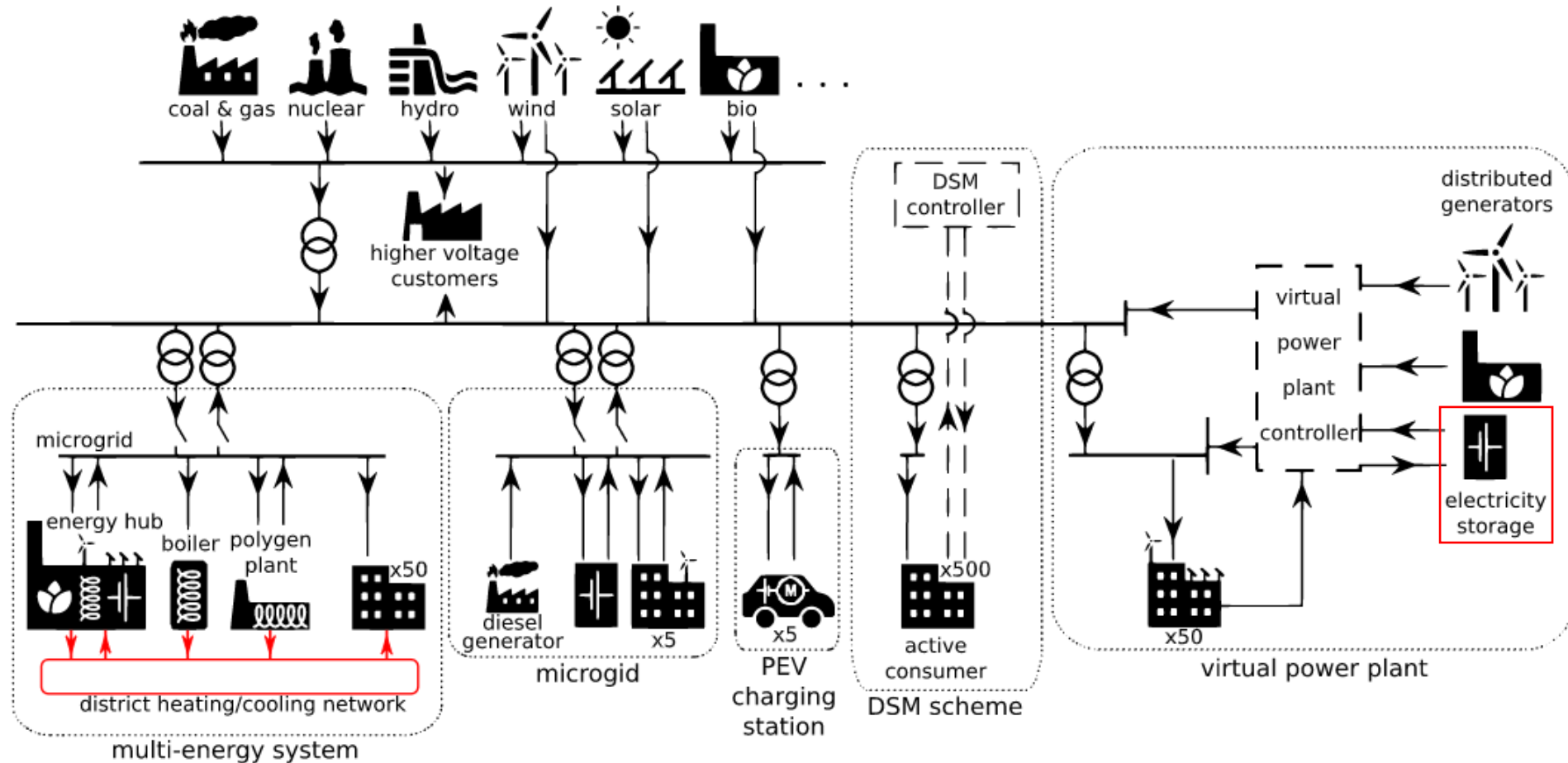
Fonte: L. S. Xavier et.al “Power converters for battery energy storage systems connected to medium voltage systems: a comprehensive review” BMC Energy, v. 1, p. 7, 2019.

Sistema elétrico - tradicional



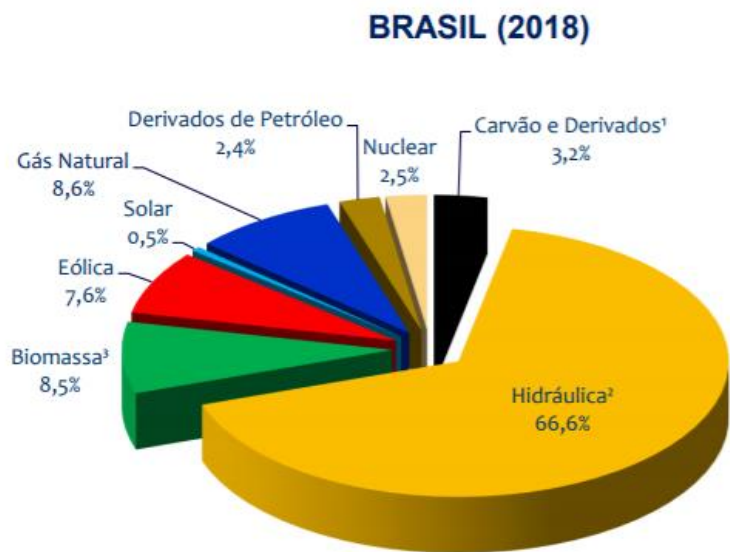
Fonte: Shaun Howell et. al., "Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 193-214, Set. 2017.

Sistema elétrico – novo paradigma



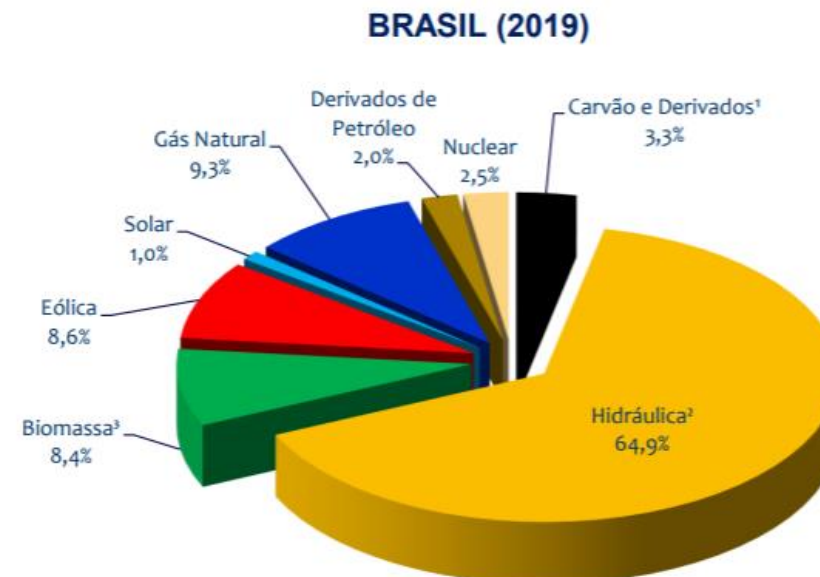
Fonte: S. Howell et. al., "Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 193-214, Set. 2017.

Matriz elétrica brasileira – BEN 2020



oferta hidráulica² em 2018: **423,9 TWh**

oferta total² em 2018: **636,4 TWh**



oferta hidráulica² em 2019: **422,8 TWh**

oferta total² em 2019: **651,3TWh**

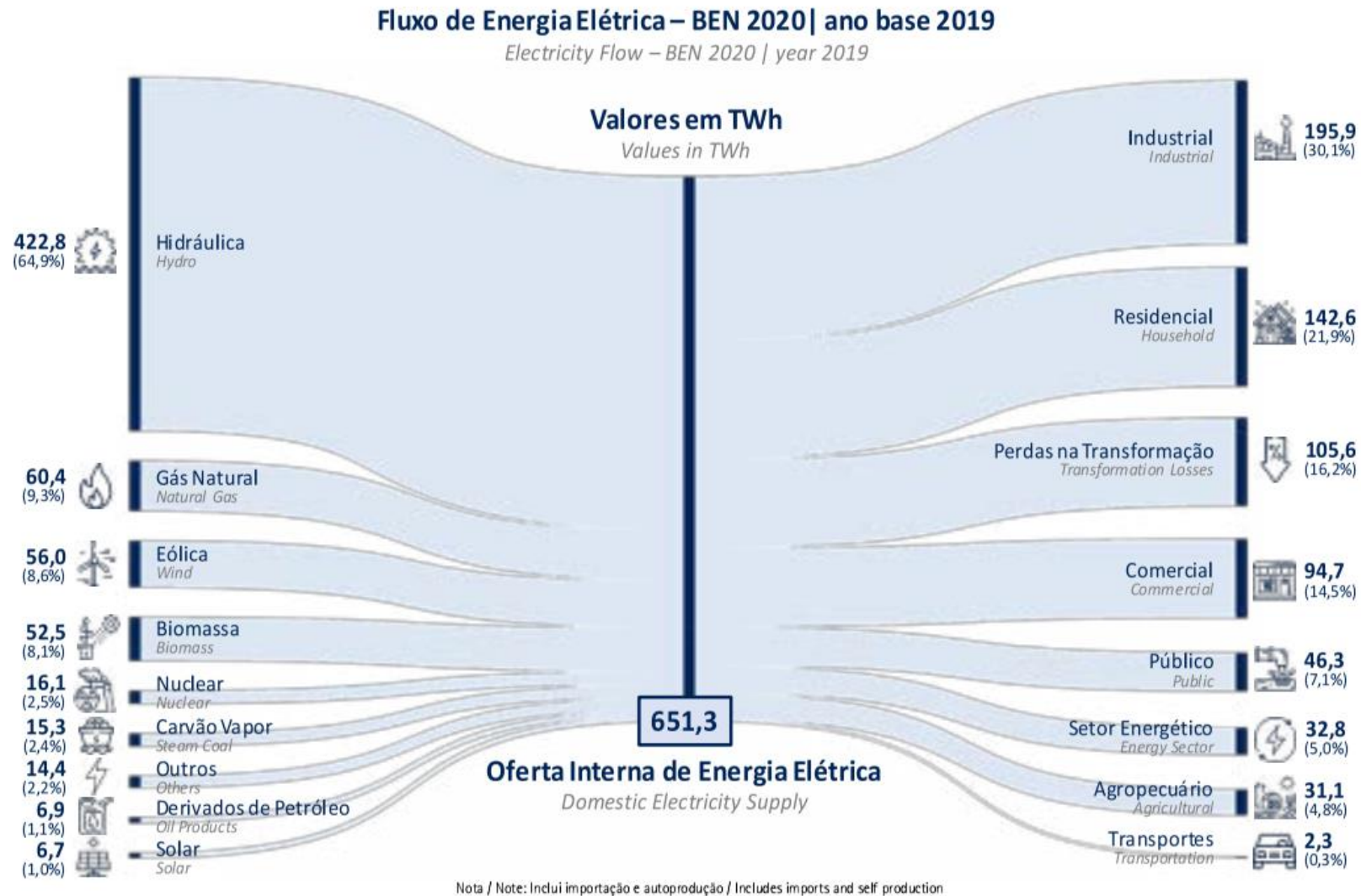
¹ Inclui gás de coqueria, gás de alto forno, gás de aciaria e alcatrão

² Inclui importação

³ Inclui lenha, bagaço de cana, lixívia, biodiesel e outras fontes primárias.

Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas. Balanço energético nacional – BEN. 2020

Fluxo de energia elétrica



Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas. Balanço energético nacional – BEN. 2020

Capacidade instalada e geração distribuída

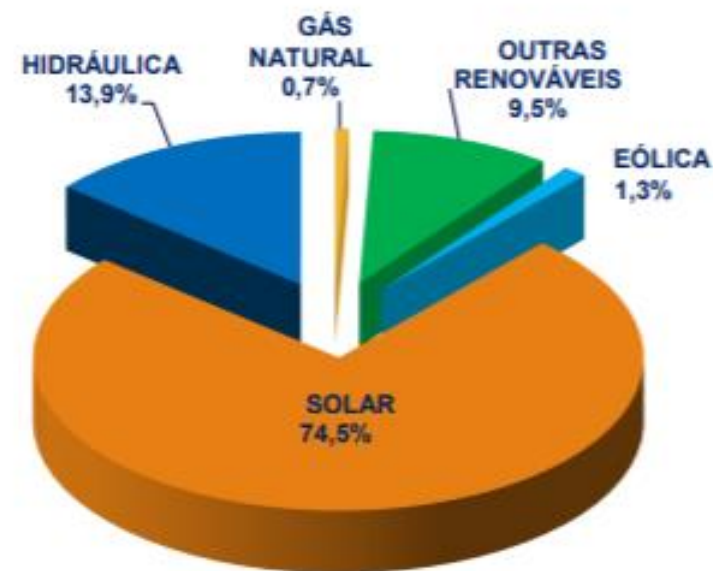
Fonte	2018	2019	Δ 19/18
Hidrelétrica	104.139	109.058	4,7%
Térmica ²	40.523	41.219	1,7%
Eólica	14.390	15.378	6,9%
Solar	1.798	2.473	37,6%
Nuclear	1.990	1.990	0,0%
Capacidade disponível	162.840	170.118	4,5%

¹ Não inclui micro e minigeração distribuídas

² Inclui biomassa, gás, petróleo e carvão mineral

Geração total em GWh:

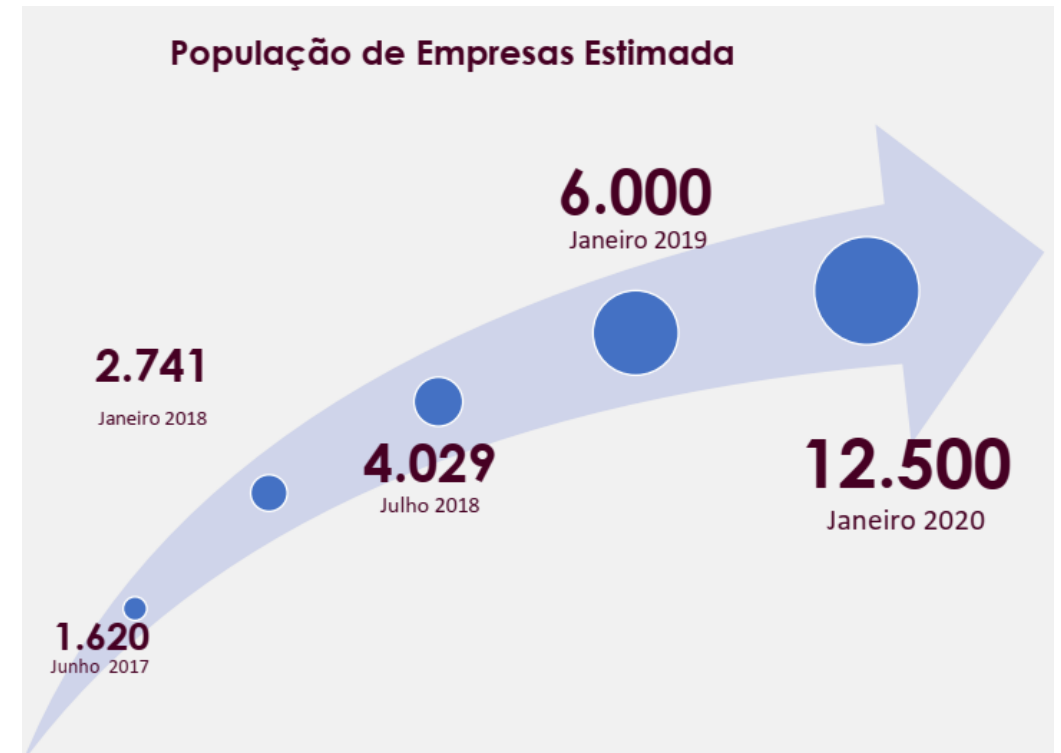
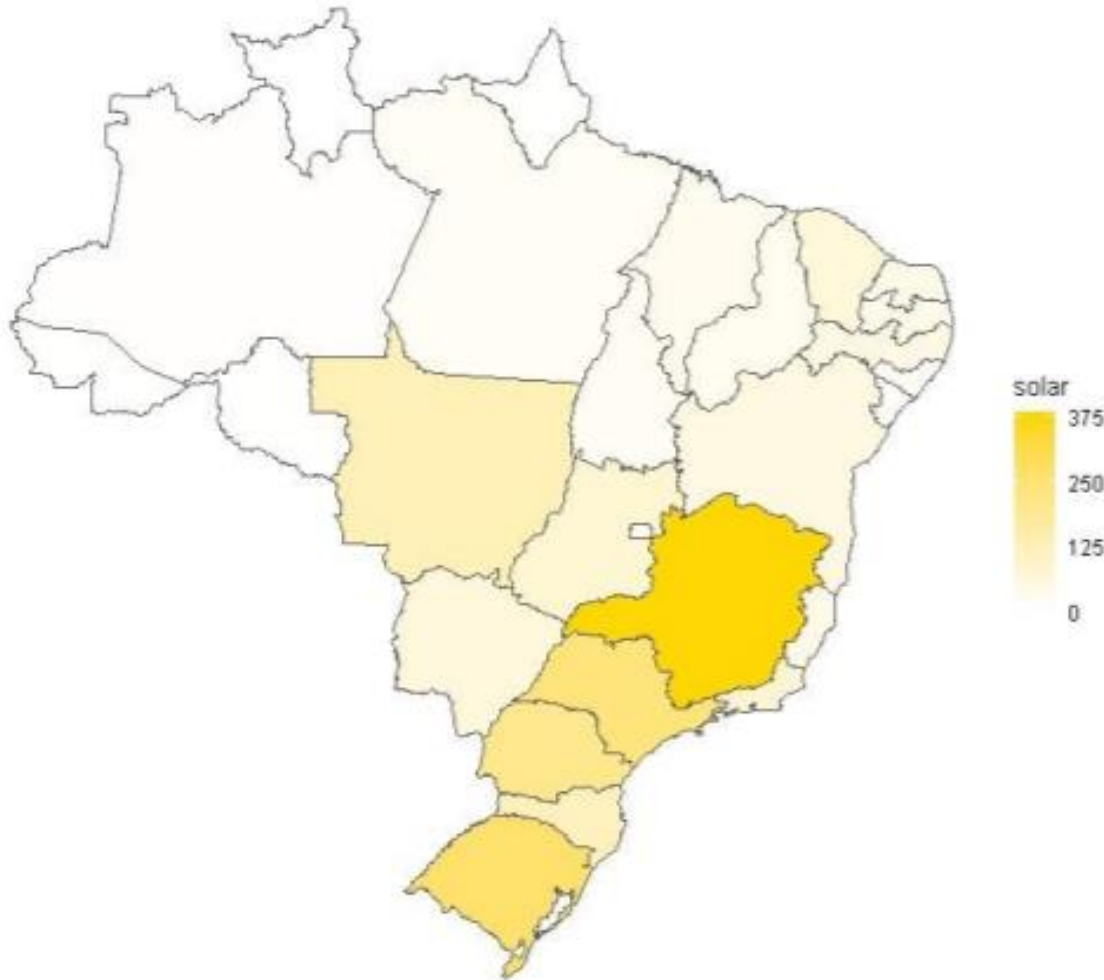
2018	2019
828	2.226



Fonte: Empresa de Pesquisas Energéticas. Balanço energético nacional – BEN. 2020



Capacidade instalada – Energia solar fotovoltaica



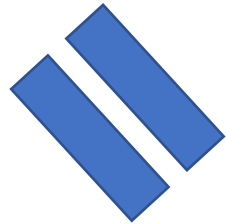
Fonte:

[1] Empresa de Pesquisas Energéticas. Balanço energético nacional – BEN. 2020.

[2] Greener. Estudo Estratégico: Mercado Fotovoltaico de Geração Distribuída. 2019.

Funcionamento do sistema elétrico

Consumo



Geração



Entendendo a relação entre inércia e dinâmica de frequência

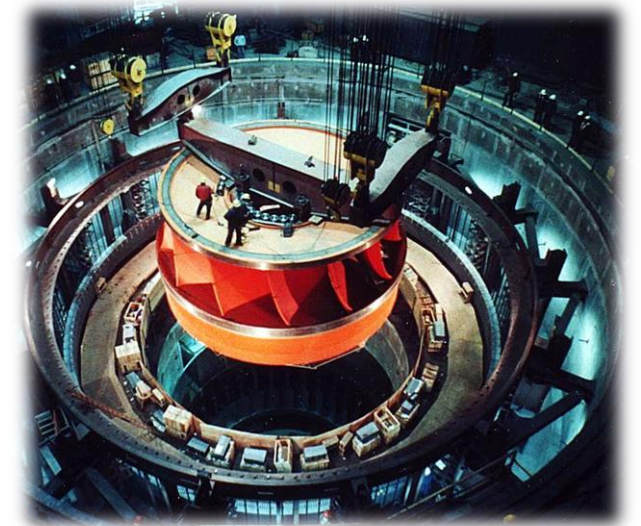
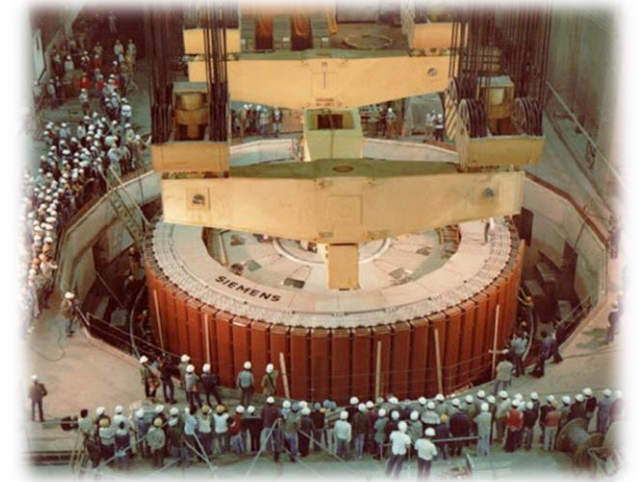
❑ Sistema elétrico → máquina síncrona → $n_m = n_s$.

❑ Energia cinética armazenada no gerador: $E_c = \frac{J\omega_g^2}{2}$

❑ Constante de inércia: $H = \frac{E_c}{S_n}$

❑ Equação dinâmica

$$\boxed{\frac{dE_c}{dt} = P_g - P_l}$$



Entendendo a relação entre inércia e dinâmica de frequência

$$\frac{dE_c}{dt} = P_g - P_l \rightarrow J \frac{d\omega_m}{dt} \omega_m = P_g - P_L$$

□ Manipulando:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} \omega_m = \frac{2}{\omega_m} \frac{\omega_m}{2} J \frac{d\omega_m}{dt} \omega_m \frac{1}{S_n} = \frac{P_g - P_L}{S_n}$$

□ Portanto,

$$\frac{2H}{\omega_m} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{2H}{f} \frac{df}{dt} = \frac{P_g - P_L}{S_n}$$

□ Swing equation:

$$\frac{2H}{f} \frac{df}{dt} = \frac{P_g - P_L}{S_n}$$

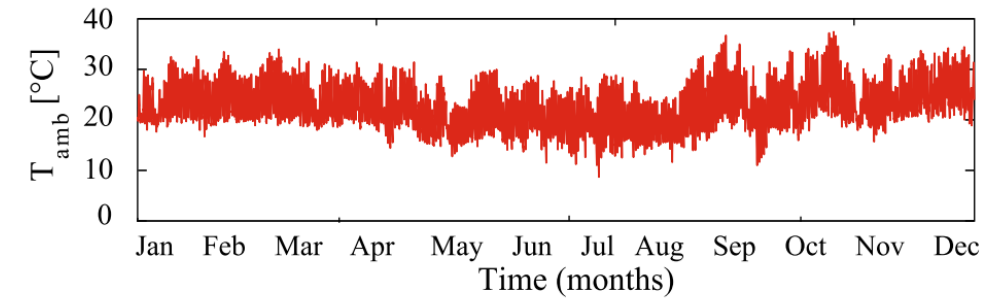
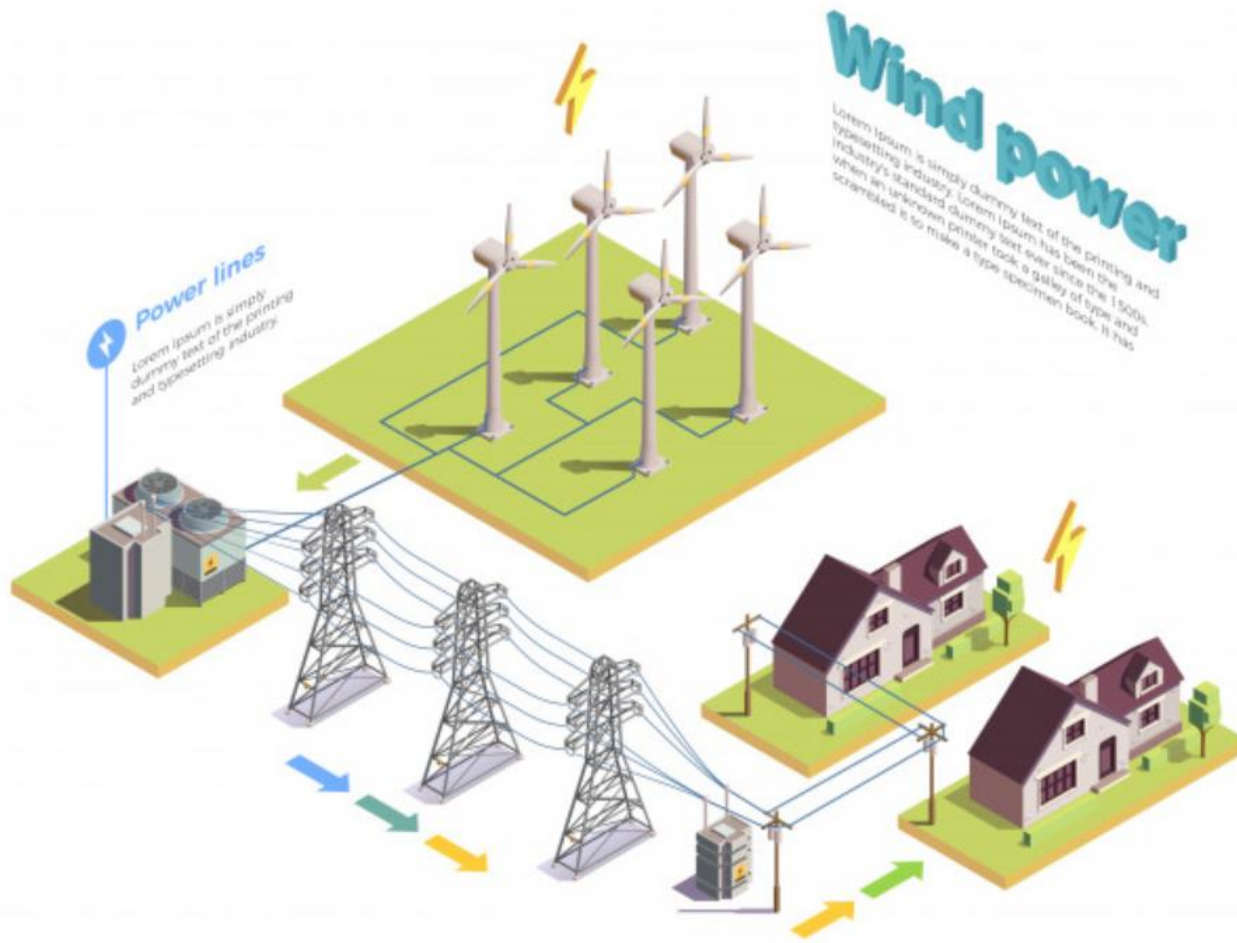
Entendendo a relação entre inércia e dinâmica de frequência

- ❑ Para um sistema elétrico com n unidades geradoras:

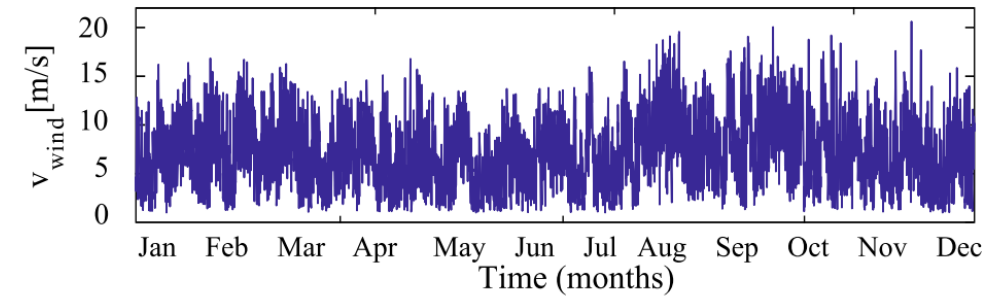
$$\frac{2H_{\text{sys}}}{f_0} \frac{df}{dt} = \frac{P_g - P_l}{S_{\text{sys}}} = \frac{\Delta P_b}{S_{\text{sys}}}$$

- ❑ Conclusão 1: quanto maior a inércia, menor a variação de frequência do sistema elétrico;
- ❑ Conclusão 2: Sistemas de baixa inércia tendem a sofrer maiores distúrbios de frequência.
- ❑ Proteções contra subfrequência, sobrefrequência e ROCOF.

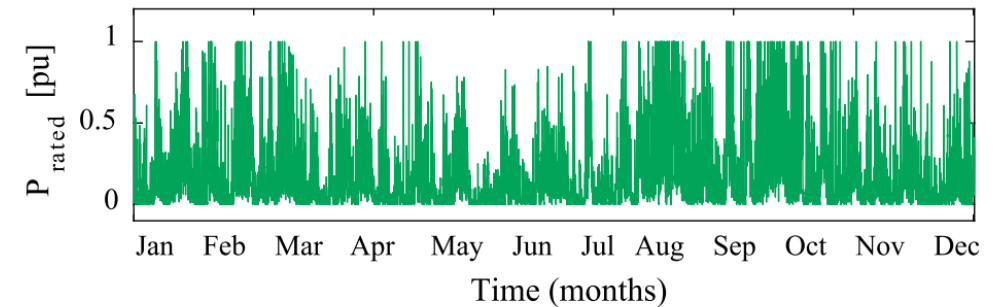
Intermitência de fontes renováveis – Energia Eólica



(a)

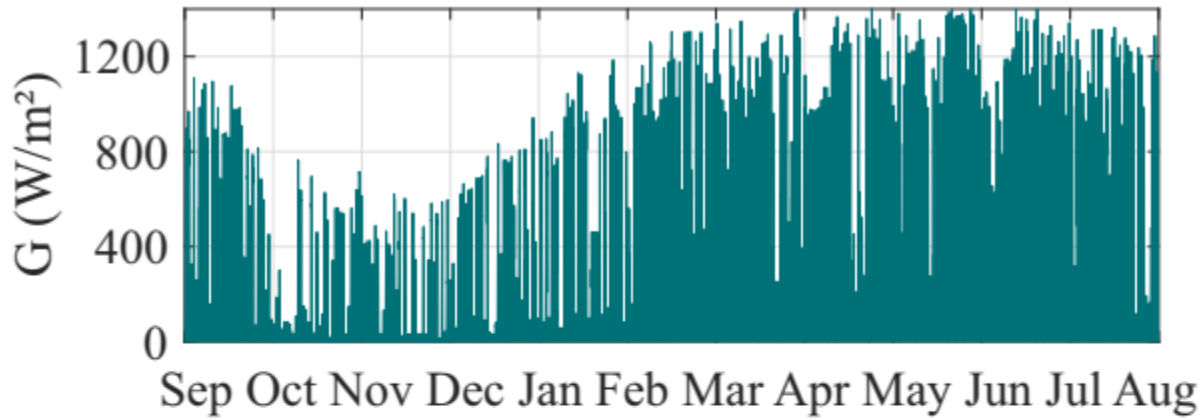


(b)

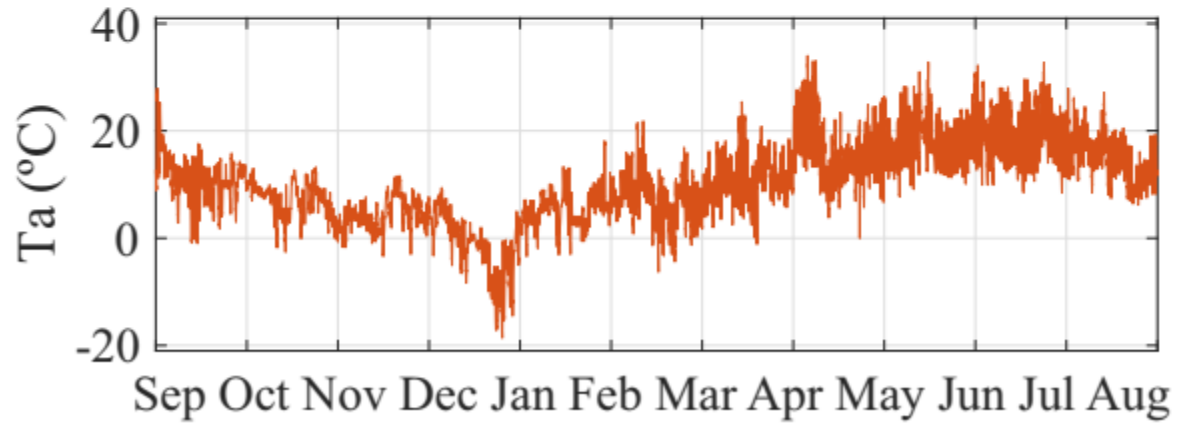


(c)

Intermitência de fontes renováveis – Energia Solar



(a)

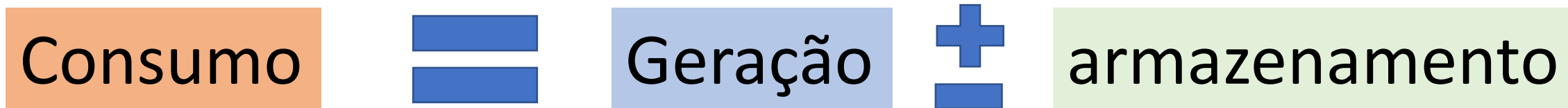


(b)



Qual o desafio?

- ❑ Intermitência dificulta o controle do sistema elétrico;
- ❑ Problemas de estabilidade;
- ❑ Estudos mostram até mesmo um aumento da produção de CO₂;



- ❑ Armazenamento inclui um grau de liberdade adicional;
- ❑ Serviços podem ser prestados para o sistema elétrico ou para o consumidor.

Classificação dos serviços

Bulk Energy Services
Electric Energy Time-Shift (Arbitrage)
Electric Supply Capacity
Ancillary Services
Regulation
Spinning, Non-Spinning and Supplemental Reserves
Voltage Support
Black Start
Other Related Uses

Transmission Infrastructure Services
Transmission Upgrade Deferral
Transmission Congestion Relief
Distribution Infrastructure Services
Distribution Upgrade Deferral
Voltage Support
Customer Energy Management Services
Power Quality
Power Reliability
Retail Electric Energy Time-Shift
Demand Charge Management

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: afcupertino@ieee.org



www.gesep.ufv.br



@GESEP



@gesep_vicosa



Gesep



Pesquise por:
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas
Fotovoltaicos

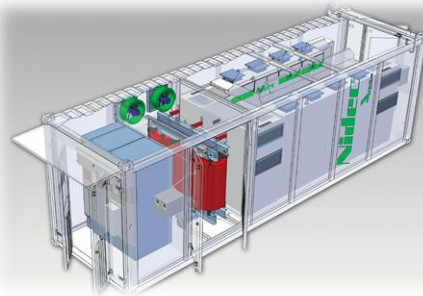


Pesquise por:
“EStimate”



Serviços para os sistemas de geração, transmissão

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



1) Time shift

- ❑ Compra de energia no horário de menor tarifa para carregar as baterias;
- ❑ Venda da energia no horário de ponta;
- ❑ Cria possibilidade para sistemas de geração intermitente;
- ❑ Considerações técnicas
 - 1 – 500 MW;
 - Tempo de descarga: menos de 1 hora;
 - Ciclos por ano: mais de 250 ciclos.
- ❑ Interessante para o operador do sistema e donos de usinas.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

2) Capacidade de suprimento de eletricidade

- ❑ Adiar a construção de novas unidades geradoras;

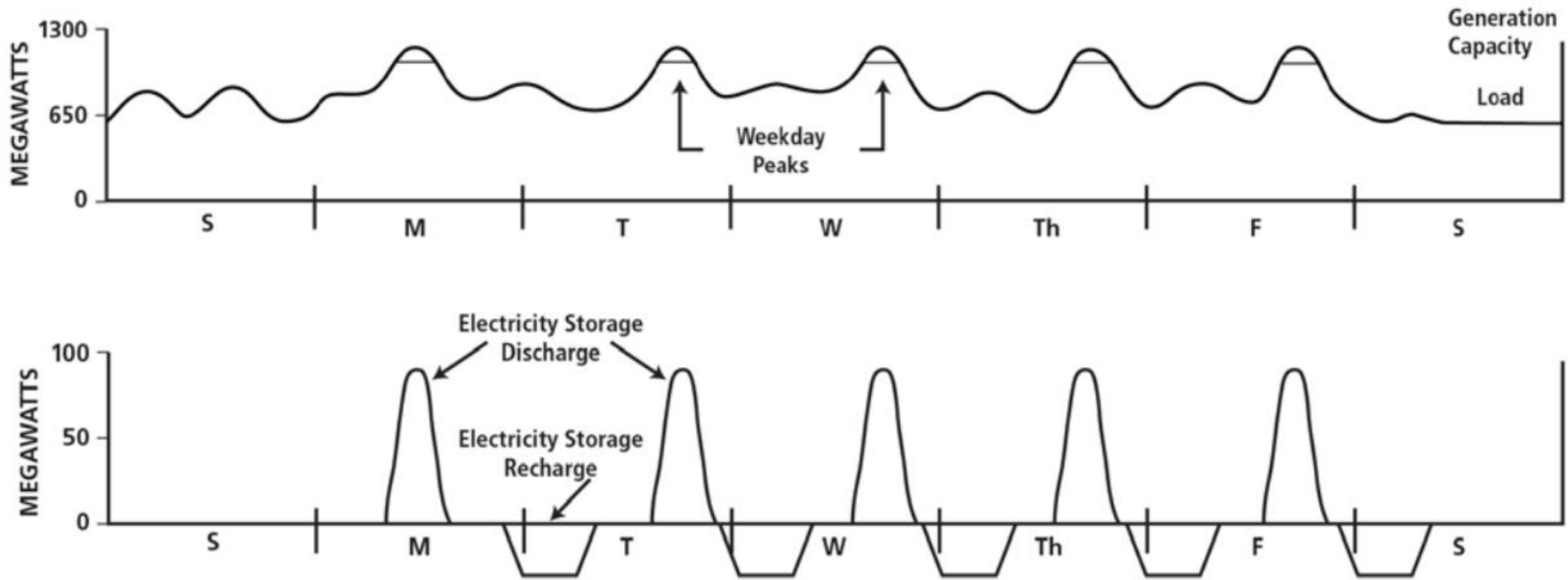
- ❑ Redução do pico de potência;

- ❑ Considerações técnicas
 - 1 – 500 MW;
 - Tempo de descarga: 2 – 6 horas;
 - Ciclos por ano: 5 – 100 ciclos.

- ❑ Interessante para o operador do sistema elétrico.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

Capacidade de suprimento de eletricidade



Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

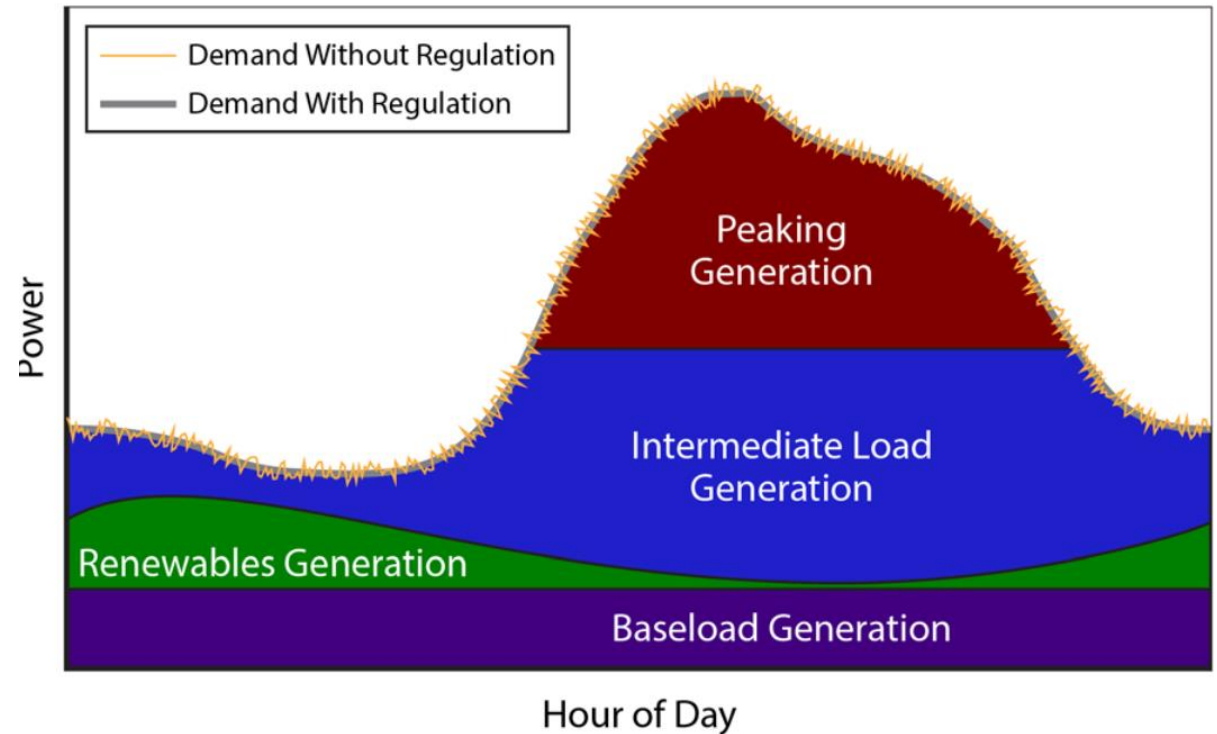
3) Regulação do sistema elétrico

- ❑ Uma das aplicações mais propícias para os sistemas de armazenamento;
- ❑ Gerenciamento de fluxo de potência;
- ❑ Acomodar variações na demanda de energia elétrica;
- ❑ Unidades geradoras possuem reserva de potência para acomodar isso, contudo pode haver um aumento do desgaste das usinas;
- ❑ Sistema de armazenamento → resposta rápida;
- ❑ Devem injetar potência de acordo com a especificação do operador do sistema.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

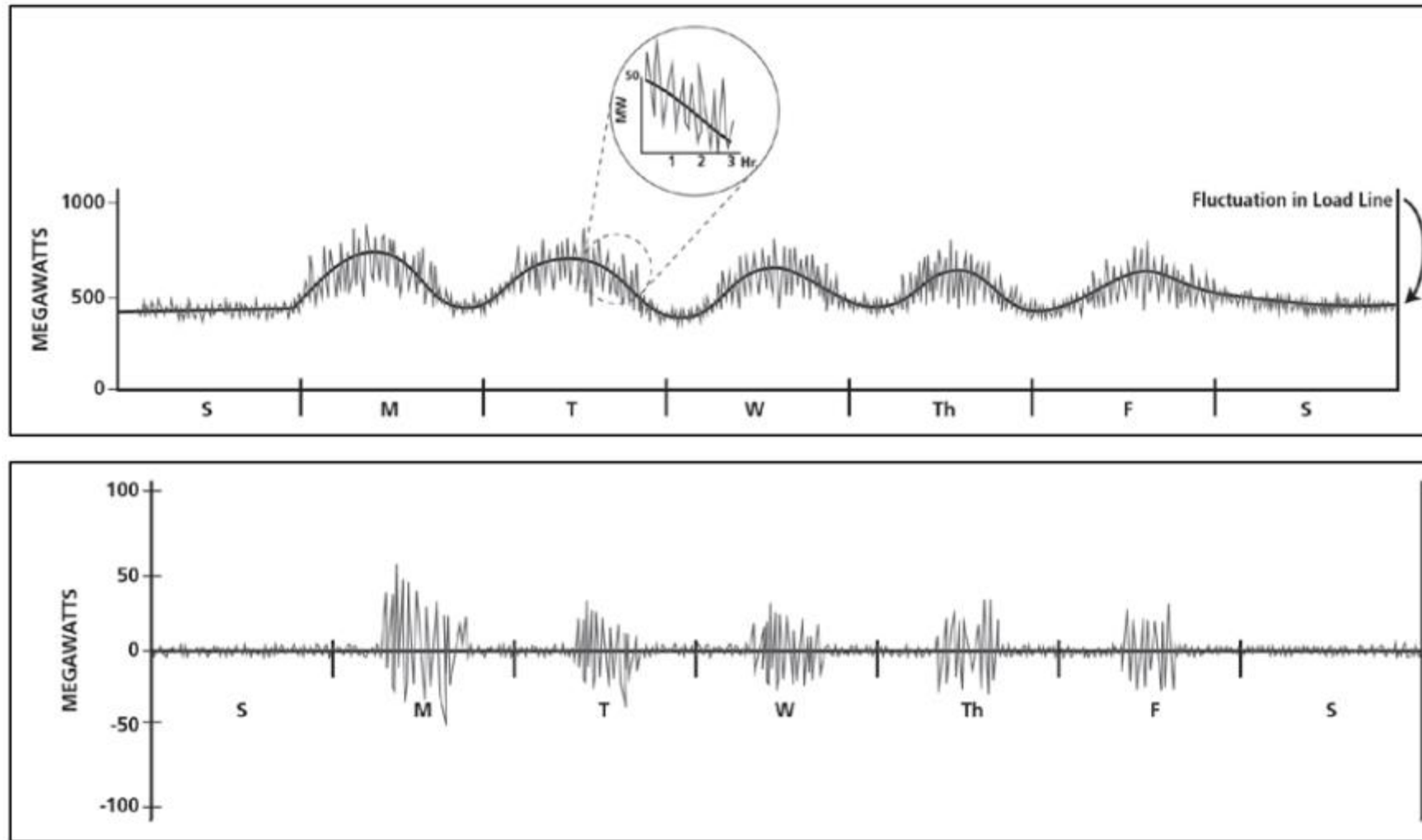
Regulação do sistema elétrico

- ❑ Considerações técnicas
 - 10 – 40 MW;
 - Tempo de descarga: 15 – 60 minutos;
 - Ciclos por ano: 250 – 10.000 ciclos.



Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

Exemplo: Regulação do sistema elétrico



Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

4) Capacidade de reserva do sistema elétrico

❑ Reserva girante:

- Diferença entre a potência total efetiva da geração que se encontram conectadas e a demanda total;
- Devem responder em menos de 10 minutos para perdas de geradores ou linhas de transmissão;
- Reserva girante para suporte de frequência: resposta em menos de 10 segundos.

❑ Reserva não girante:

- Unidades não sincronizadas ao sistema elétrico ou cargas que podem ser desconectadas.
- Devem responder em menos de 10 minutos.

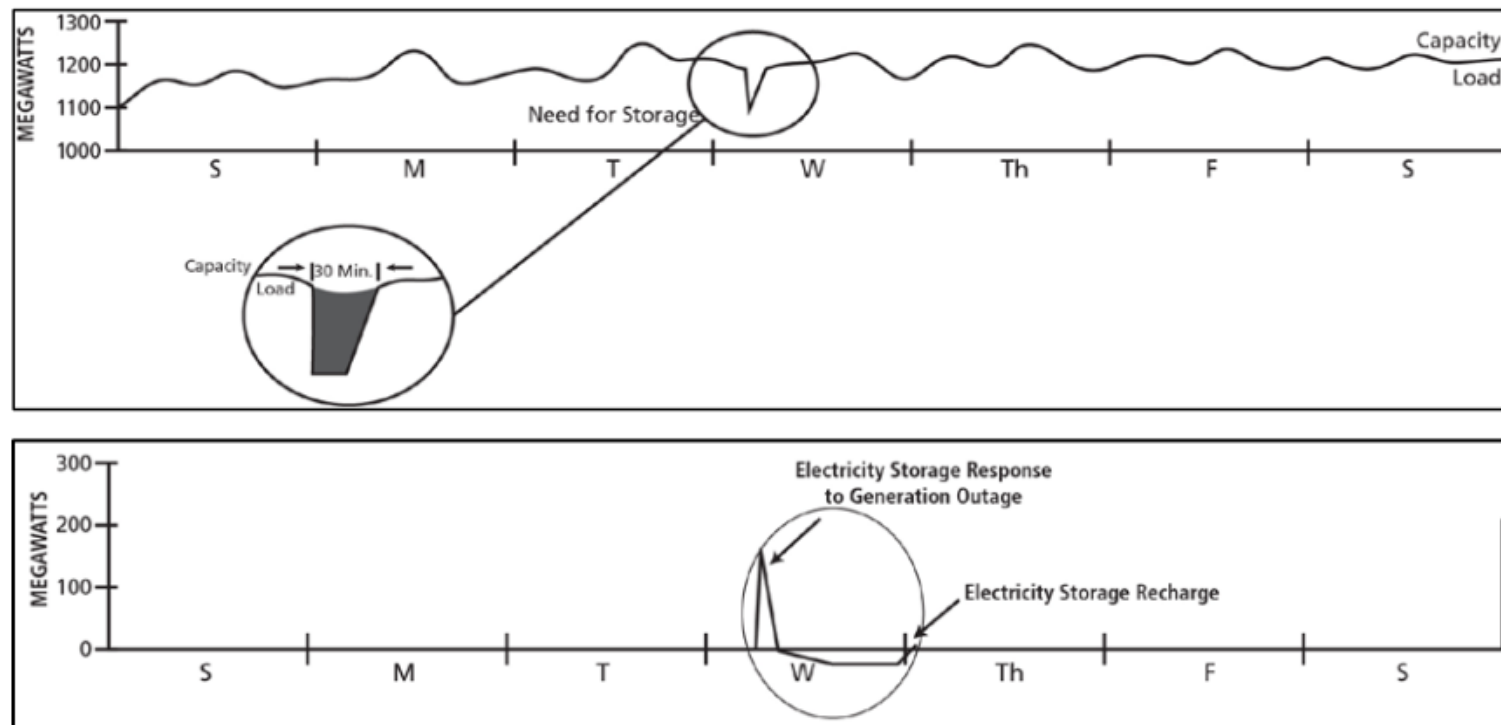
❑ Reposição ou reserve suplementar:

- Unidades de partida lenta (tempos iguais ou superiores a uma hora);
- Usado depois que todas as reservas girantes estão operando.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

Exemplo – Capacidade de reserva

- ❑ Considerações técnicas
 - 10 – 100 MW;
 - Tempo de descarga: 15 – 60 minutos;
 - Ciclos por ano: 20 – 50 ciclos.



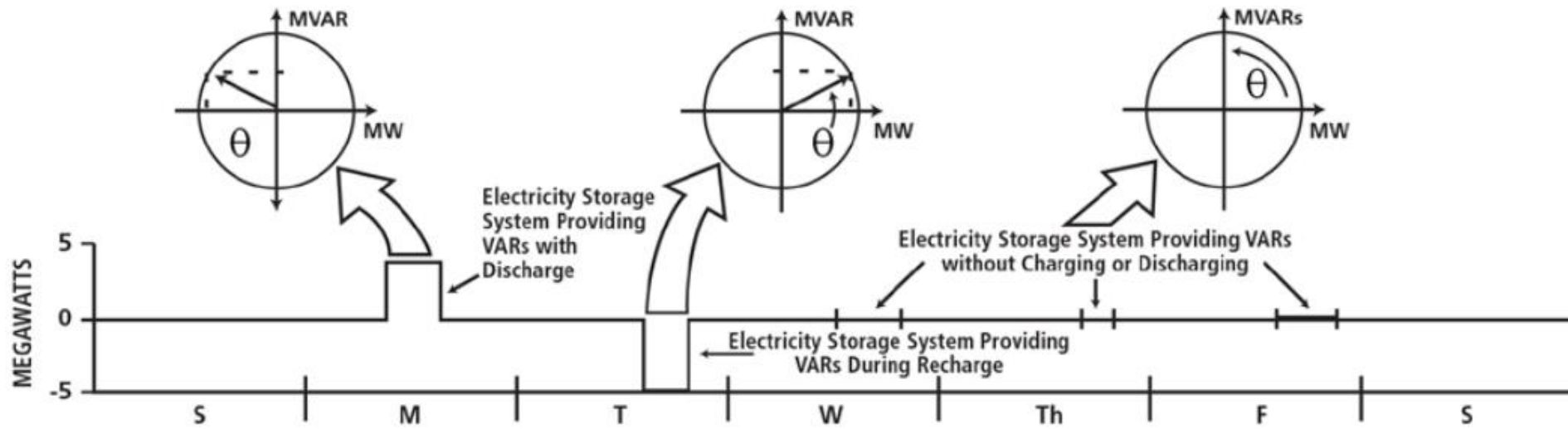
Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

5) Suporte de tensão

- ❑ Manutenção da tensão em níveis aceitáveis;
- ❑ Suporte realizado por meio de injeção/absorção de potência reativa;
- ❑ Não depende das baterias para funcionar!
- ❑ Considerações técnicas
 - 1 – 10 Mvar;
 - Tempo de descarga: N/A;
 - Ciclos por ano: N/A.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

Suporte de tensão



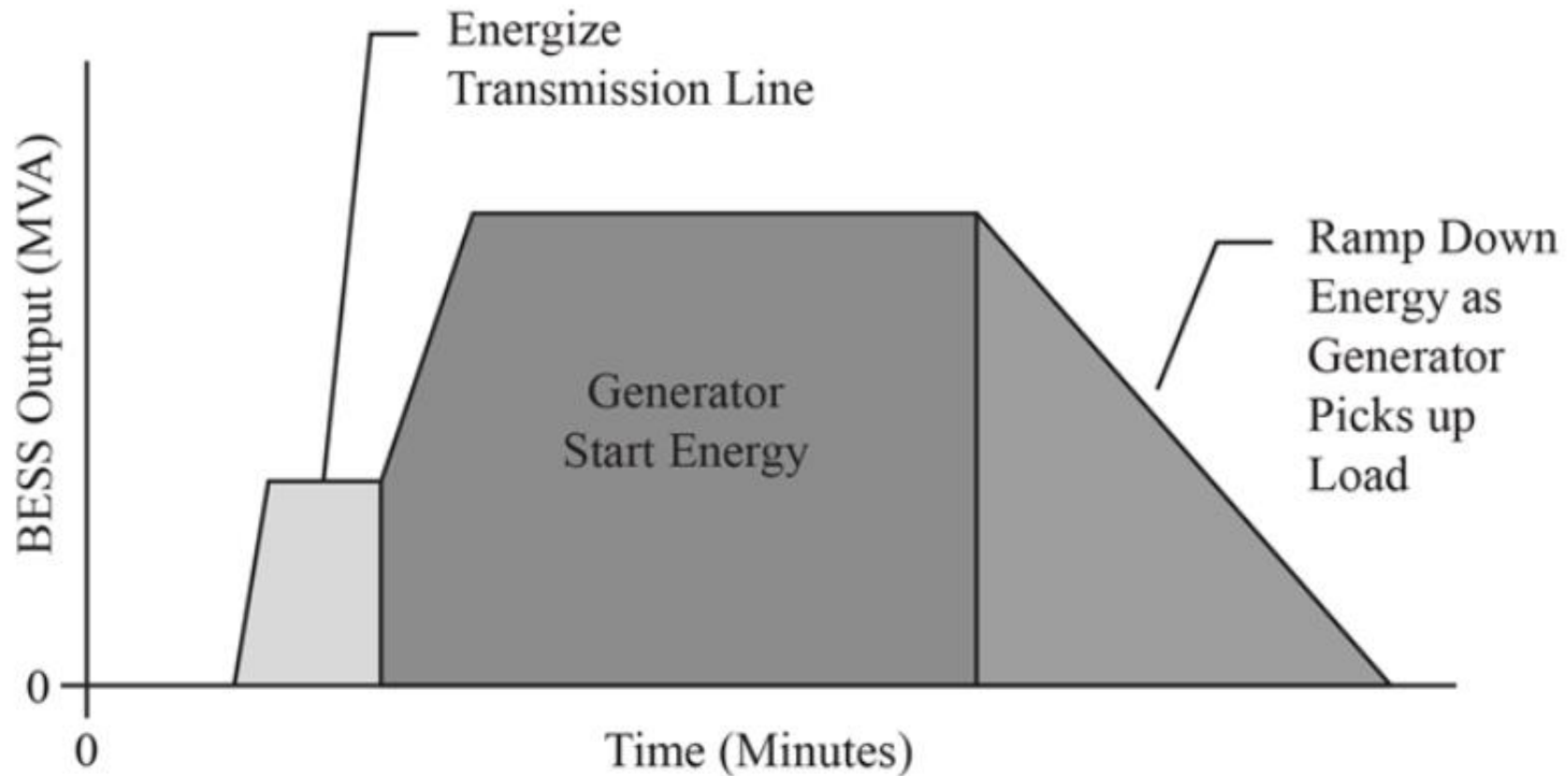
Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

6) Black Start

- ❑ Auto-reestabelecimento integral – ONS;
- ❑ Possibilidade de re-energizar a rede elétrica depois de uma falha catastrófica;
- ❑ Potência ativa necessária para energizar linhas de transmissão e distribuição;
- ❑ Importante num contexto de elevada inserção de fontes renováveis intermitentes;
- ❑ Considerações técnicas
 - 5 – 50 MW;
 - Tempo de descarga: 15 – 60 minutos;
 - Ciclos por ano: 10 – 20 ciclos.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

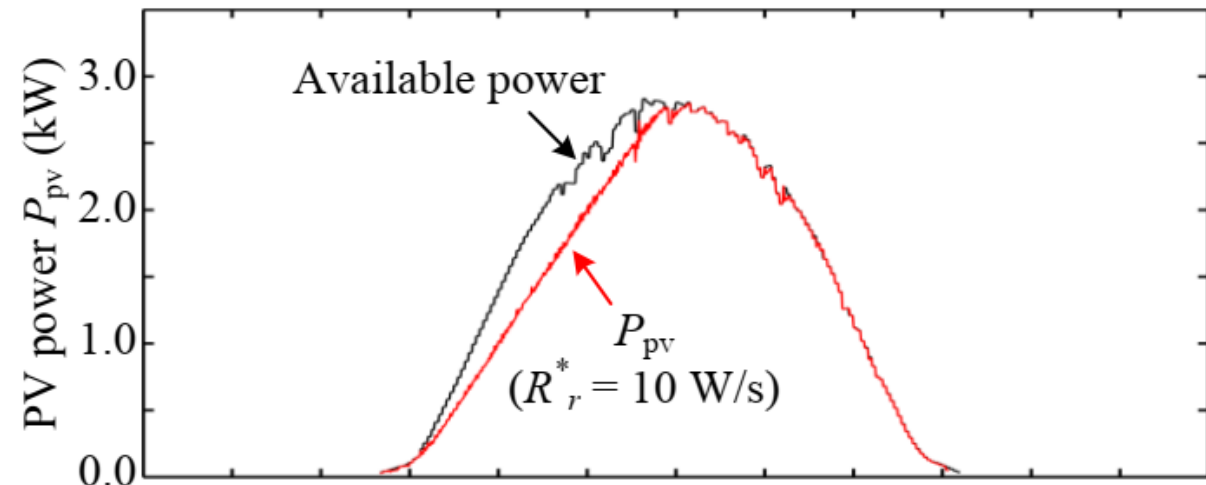
Black Start



Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

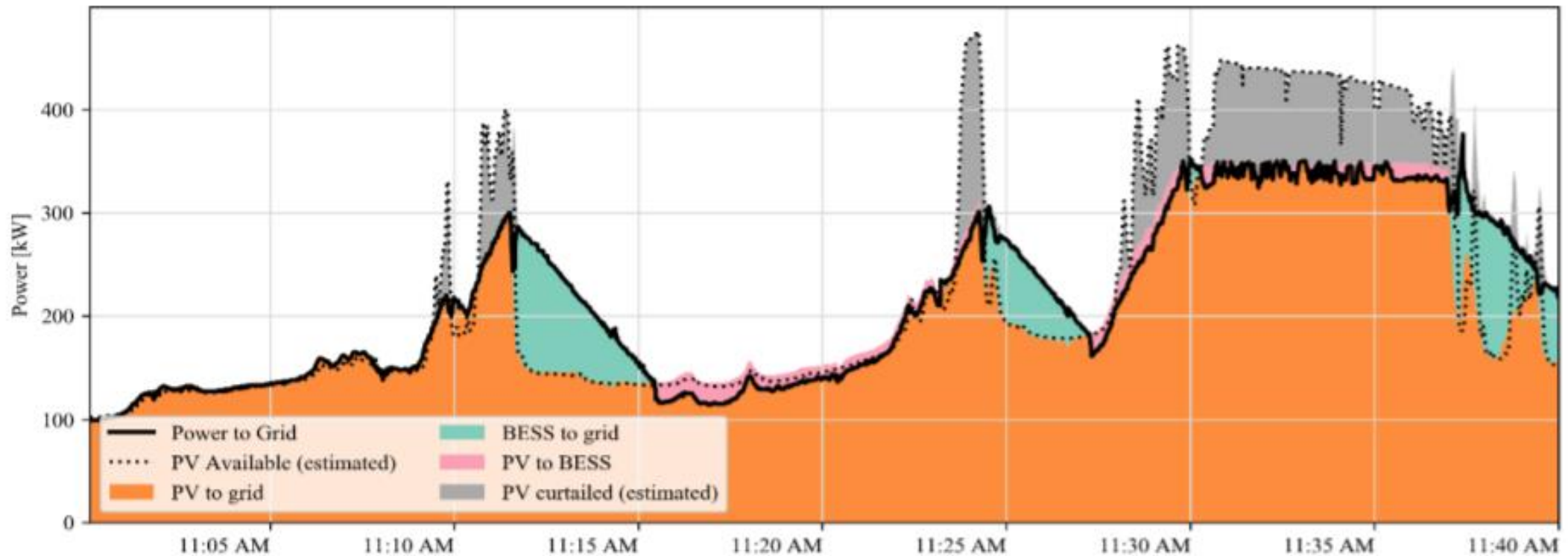
7) Suporte para fontes de energia renovável – Power Smoothing

- ❑ Amortecimento de oscilações de potência;
- ❑ Controle de variação (ramp-rate control): MW/minuto;
- ❑ Considerações técnicas
 - 1 – 100 MW;
 - Tempo de descarga: 15 – 60 minutos;
 - Ciclos por ano: N/A.



Fonte: A. Sangwongwanich. “Grid-Friendly High-Reliability Photovoltaic Systems”. Ph.D. Thesis. Aalborg University. 2018.

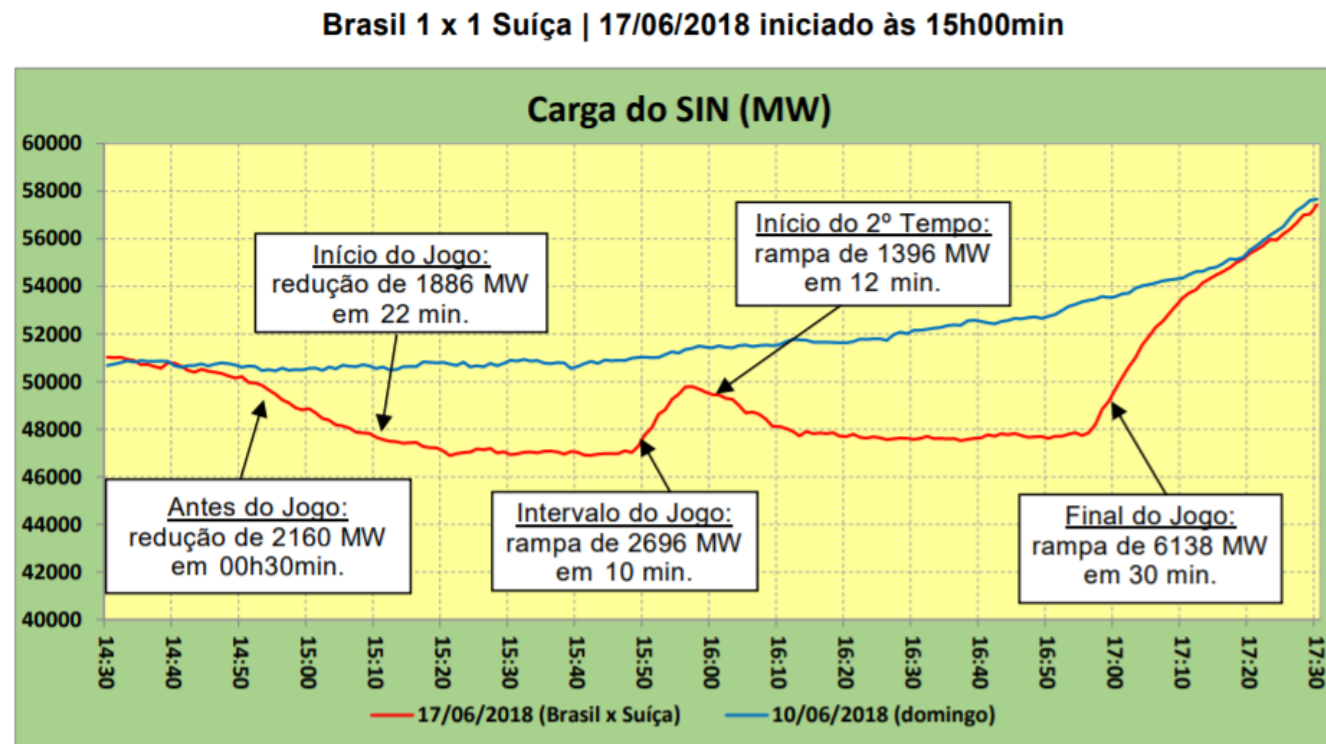
Exemplo - Power Smoothing



Fonte: George Dickeson et. Al. Ramp rate control for PV plant integration: experience from karratha airport's hybrid power station.

Nota importante

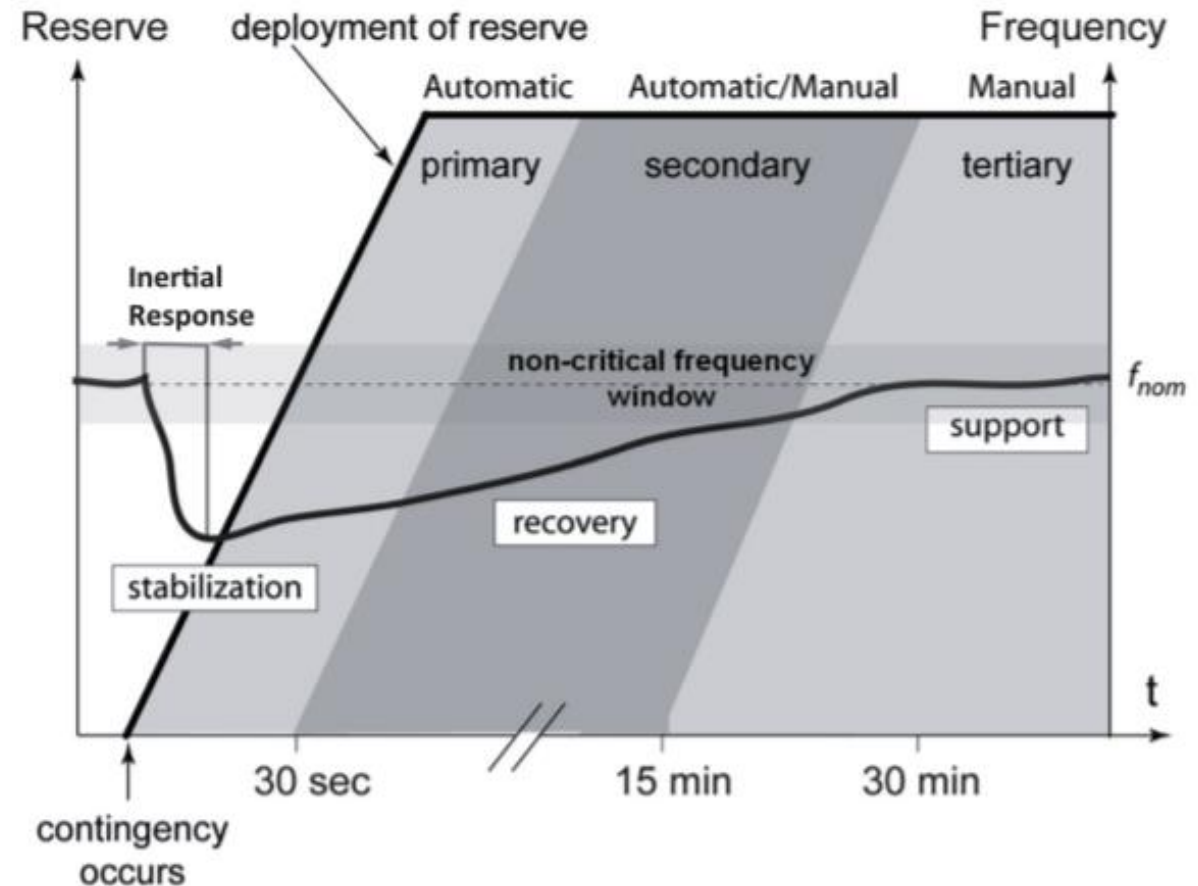
- ❑ Variações de potência nem sempre são um problema.



Fonte: ONS. Acompanhamento da operação do SIN durante a copa do mundo FIFA 2018 de 14 de junho a 15 de julho de 2018.

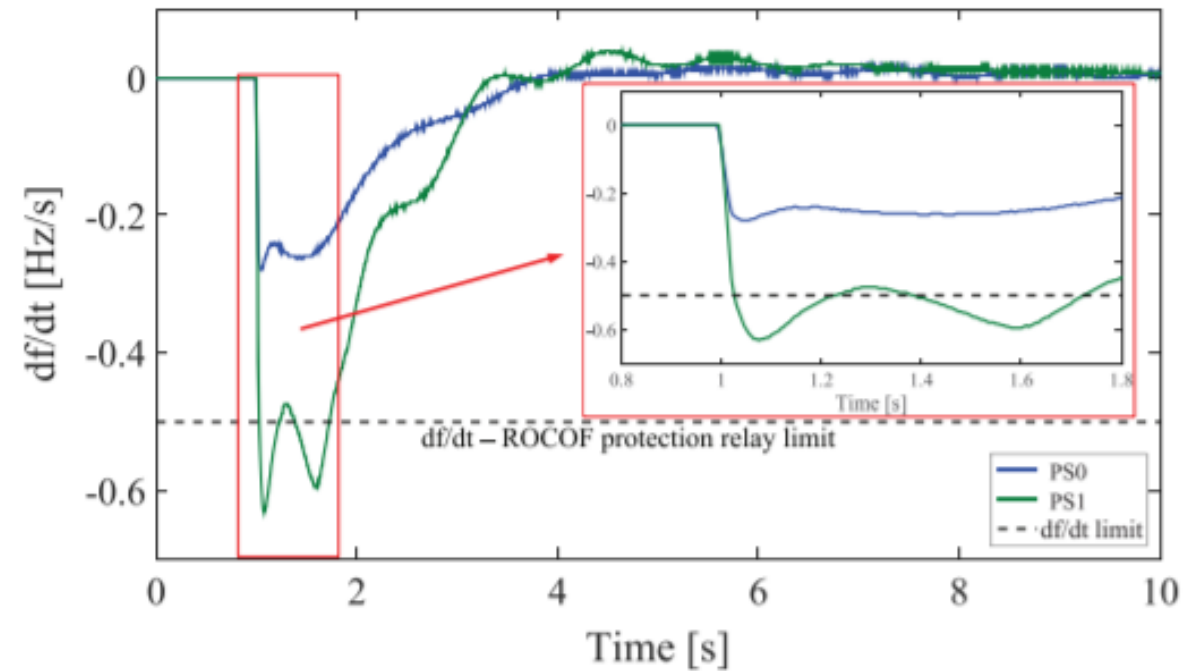
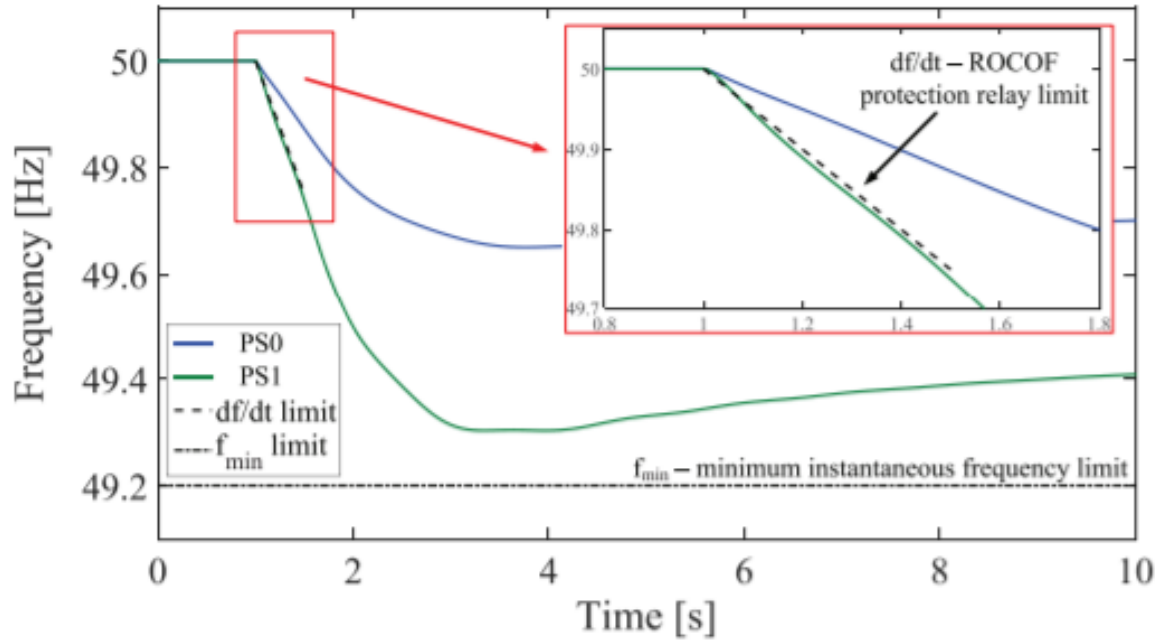
8) Suporte de frequência

- ❑ Dinâmica de segundos ou minutos;
- ❑ Reservas primária, secundária e terciária;
- ❑ Foco no ROCOF e na frequência;
- ❑ BESS: Aumentar inércia de forma virtual!
- ❑ Considerações técnicas
 - > 20 MW;
 - Tempo de descarga: 15 – 60 minutos;
 - Ciclos por ano: N/A.



Fonte: Vaclav Knap, et. al. "Sizing of an Energy Storage System for Grid Inertial Response and Primary Frequency Reserve". IEEE Transactions On Power Systems. 2016.

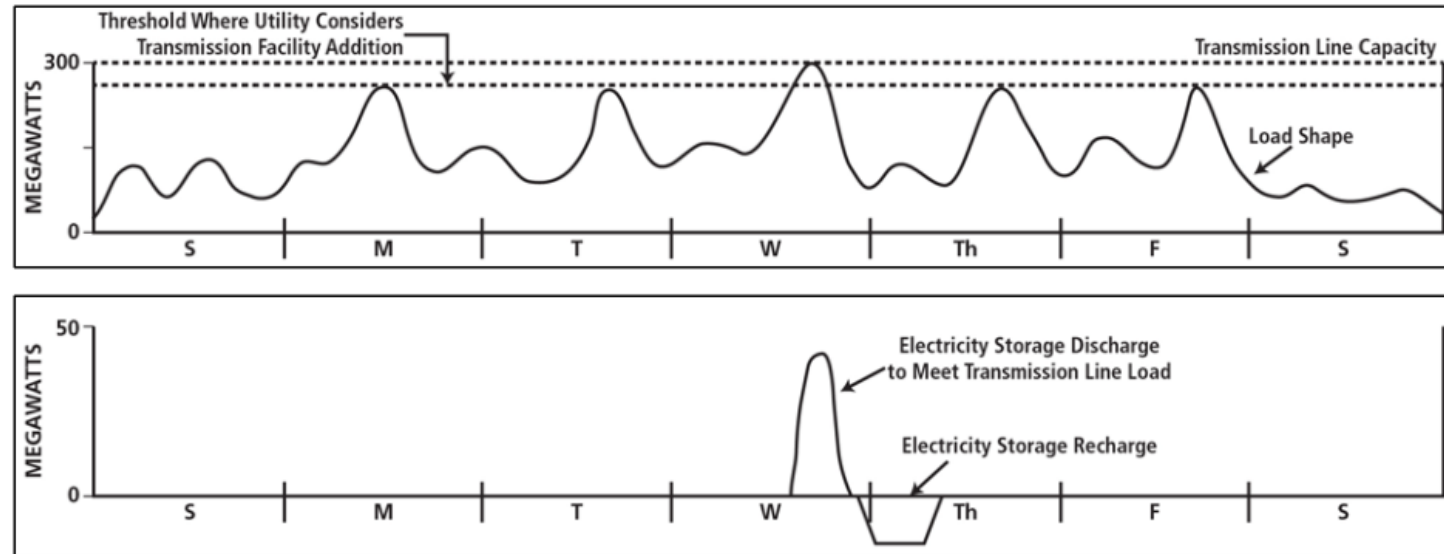
Suporte de frequência - exemplo



Fonte: Vaclav Knap, et. al. "Sizing of an Energy Storage System for Grid Inertial Response and Primary Frequency Reserve". IEEE Transactions On Power Systems. 2016.

9) Adiamento de renovação de linhas de transmissão

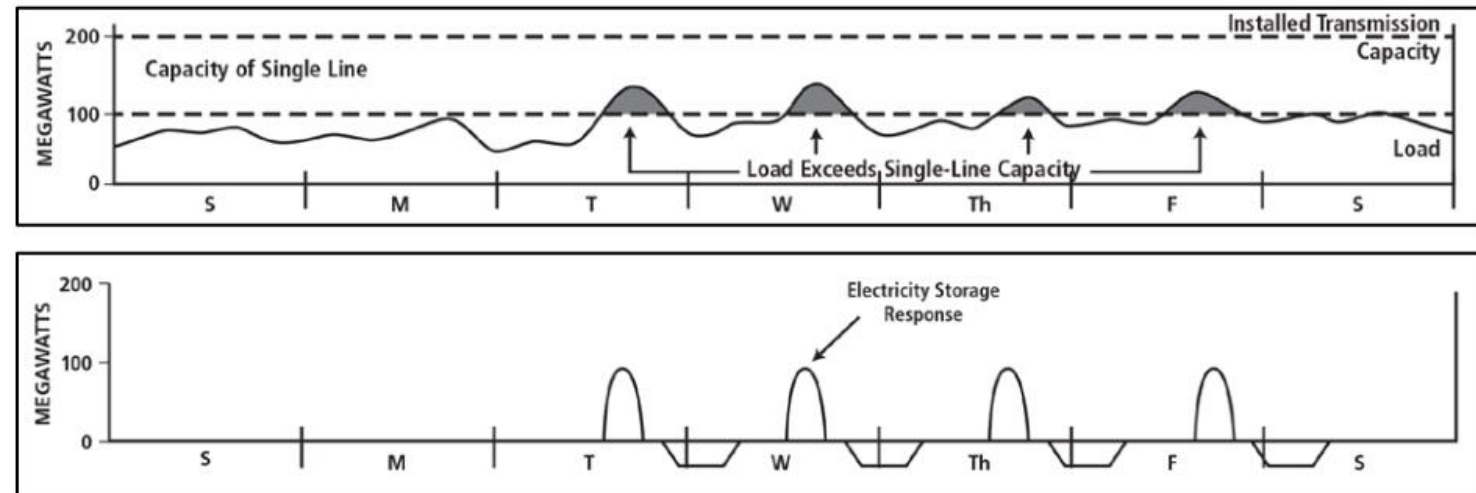
- ❑ Aplicação em linhas de transmissão próximas da capacidade máxima;
- ❑ Considerações técnicas
 - 10 – 100 MW;
 - Tempo de descarga: 2 – 8 minutos;
 - Ciclos por ano: 10 – 50.



Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

10) Alívio de linhas de transmissão congestionadas

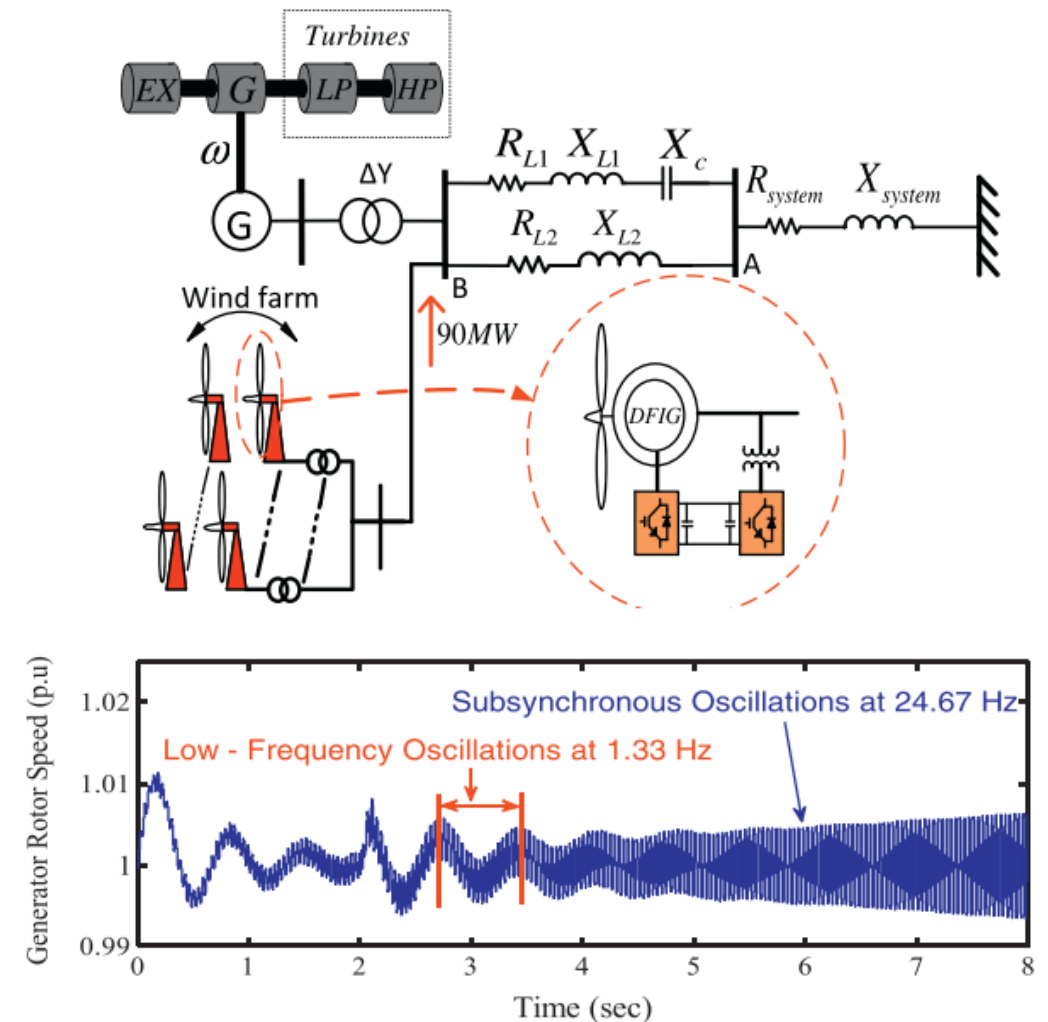
- ❑ Sistema de armazenamento é carregado em momentos de baixa demanda e custo;
- ❑ Favorece durante momentos de alta demanda;
- ❑ Considerações técnicas
 - 1 – 100 MW;
 - Tempo de descarga: 1 – 4 horas;
 - Ciclos por ano: 50 – 100.



Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

11) Outros usos

- ❑ Melhoria da estabilidade dinâmica da rede elétrica;
- ❑ Amortecimento de oscilações subsíncronas;
- ❑ Considerações técnicas
 - 10 – 100 MW;
 - Tempo de descarga: 5 segundos – 2 horas;
 - Ciclos por ano: 20 – 100.

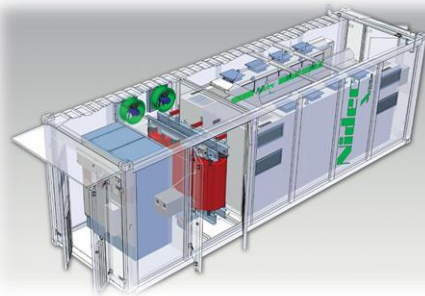


Fonte: M. Mokhtari Sub-Synchronous Resonance damping via Doubly Fed Induction Generator. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013



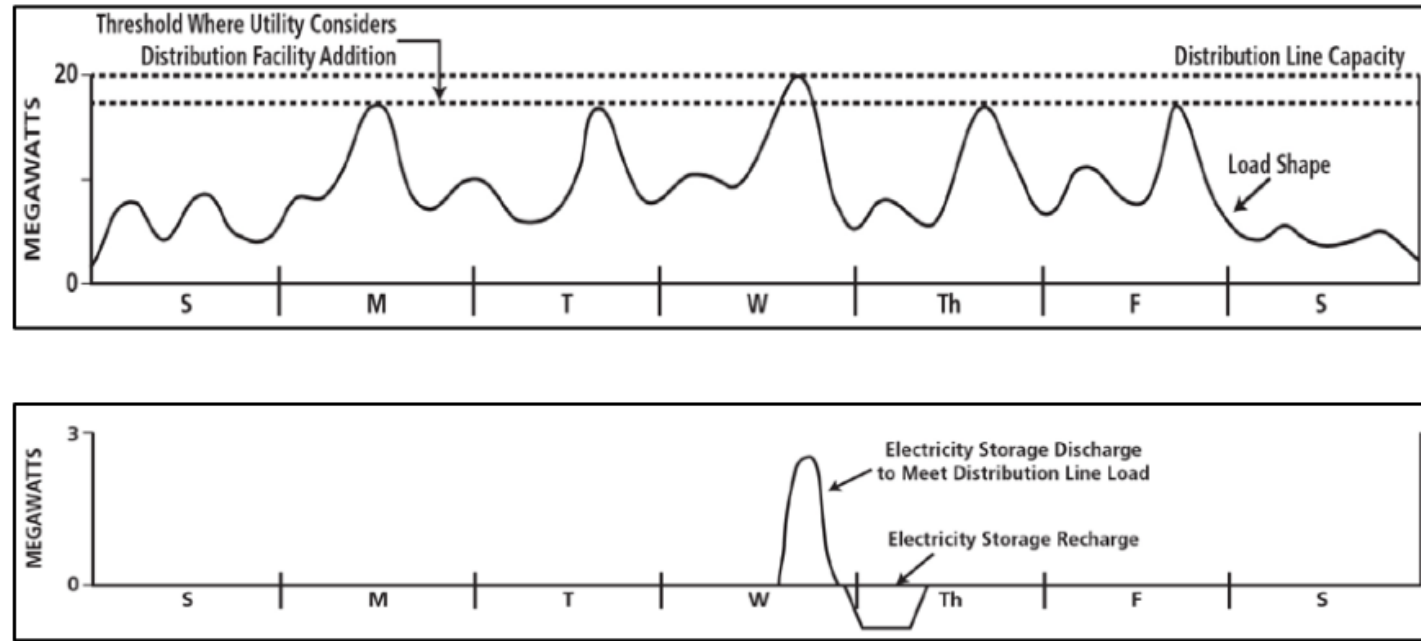
Serviços para os sistemas distribuição

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



11) Adiamento de renovação de linhas de distribuição

- ❑ Aplicação em linhas de distribuição próximas da capacidade máxima;
- ❑ Considerações técnicas
 - 0.5 MW – 10 MW;
 - Tempo de descarga: 1 – 4 horas;
 - Ciclos por ano: 50 – 100.

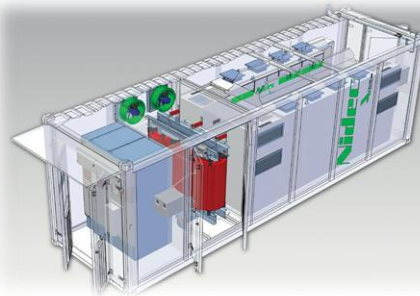


Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.



Serviços para o consumidor

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



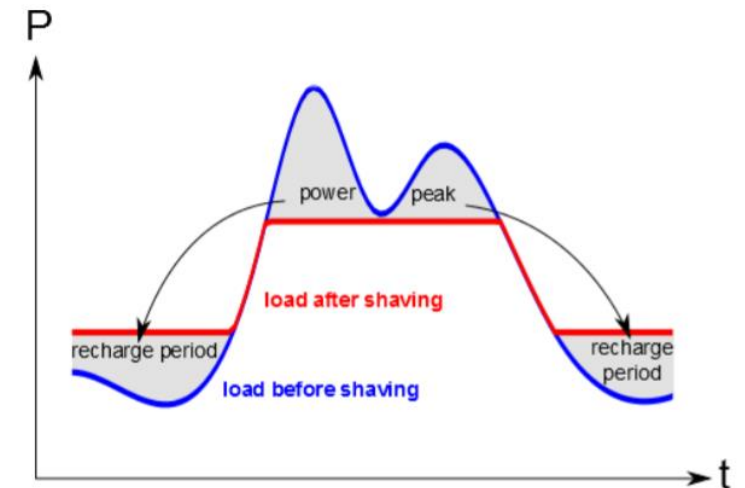
1) Qualidade de energia

- ❑ Suporte durante afundamentos de tensão;
- ❑ Suporte de frequência;
- ❑ Compensação de fator de potência;
- ❑ Compensação de harmônicos;
- ❑ Interrupções;
- ❑ Considerações técnicas
 - 100 kW – 10 MW;
 - Tempo de descarga: 10 segundos – 15 minutos;
 - Ciclos por ano: 100 – 200.

Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

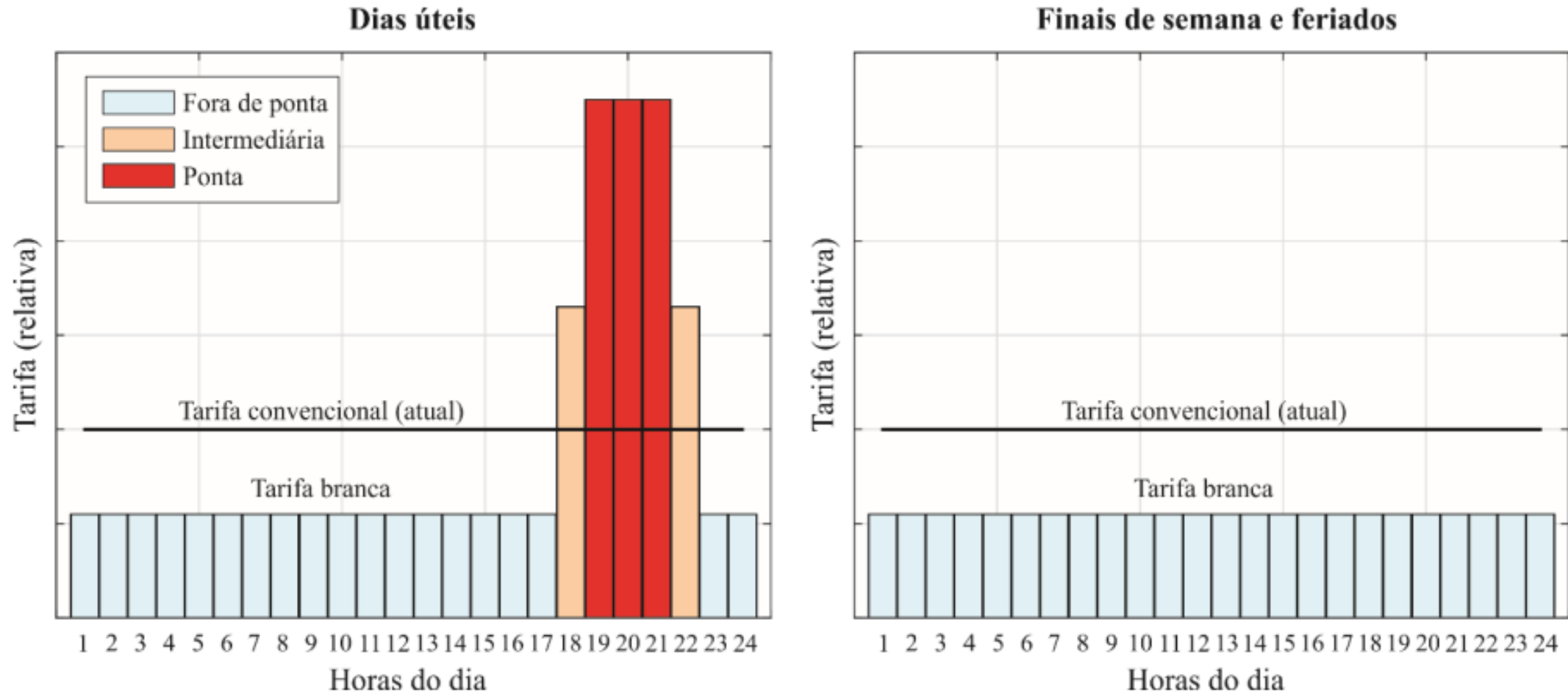
2) Time Shift

- ❑ Valor da tarifa diferente no horário de ponta e fora de ponta;
- ❑ No contexto do consumidor, é denominado peak shaving ou deslocamento de demanda.
- ❑ Possibilidade para consumidores do grupo A e B por meio da tarifa branca.
- ❑ Considerações técnicas
 - 1 kW – 1 MW;
 - Tempo de descarga: 1 – 6 horas;
 - Ciclos por ano: 50 – 250.



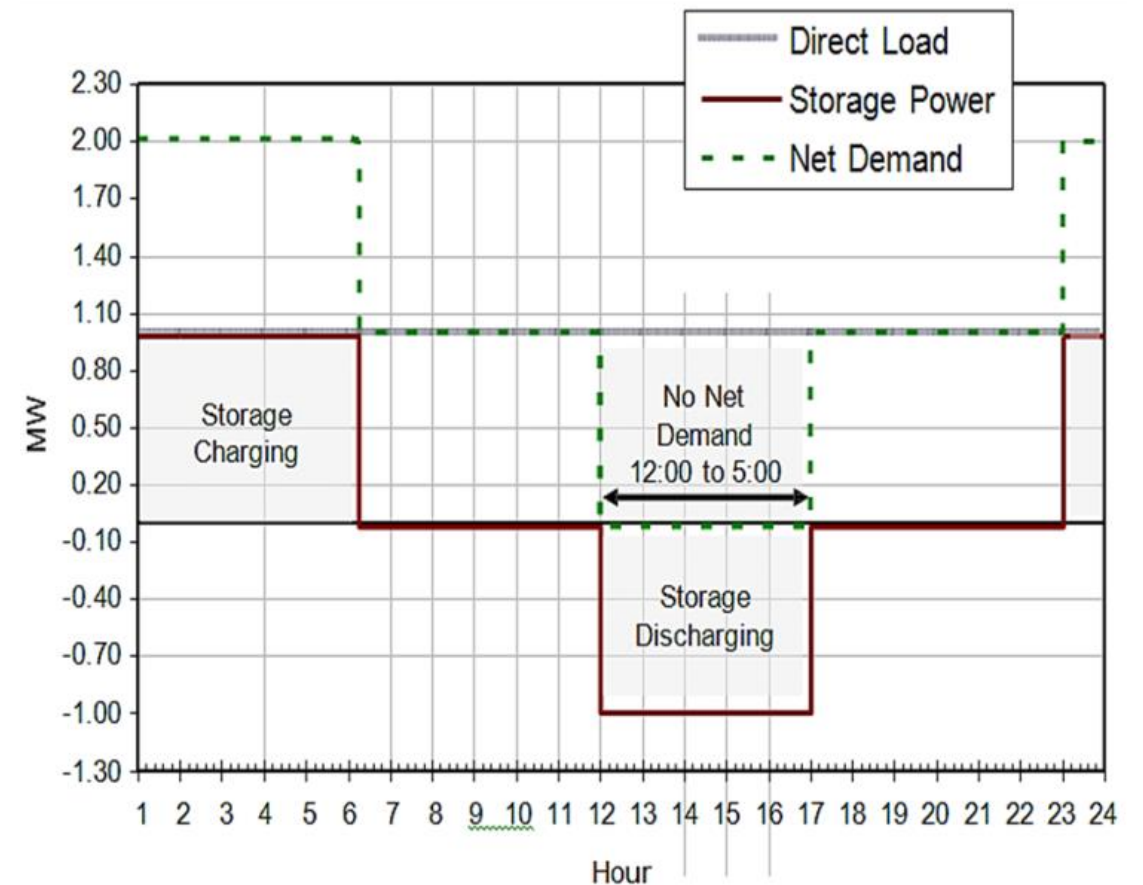
Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

Tarifa Branca



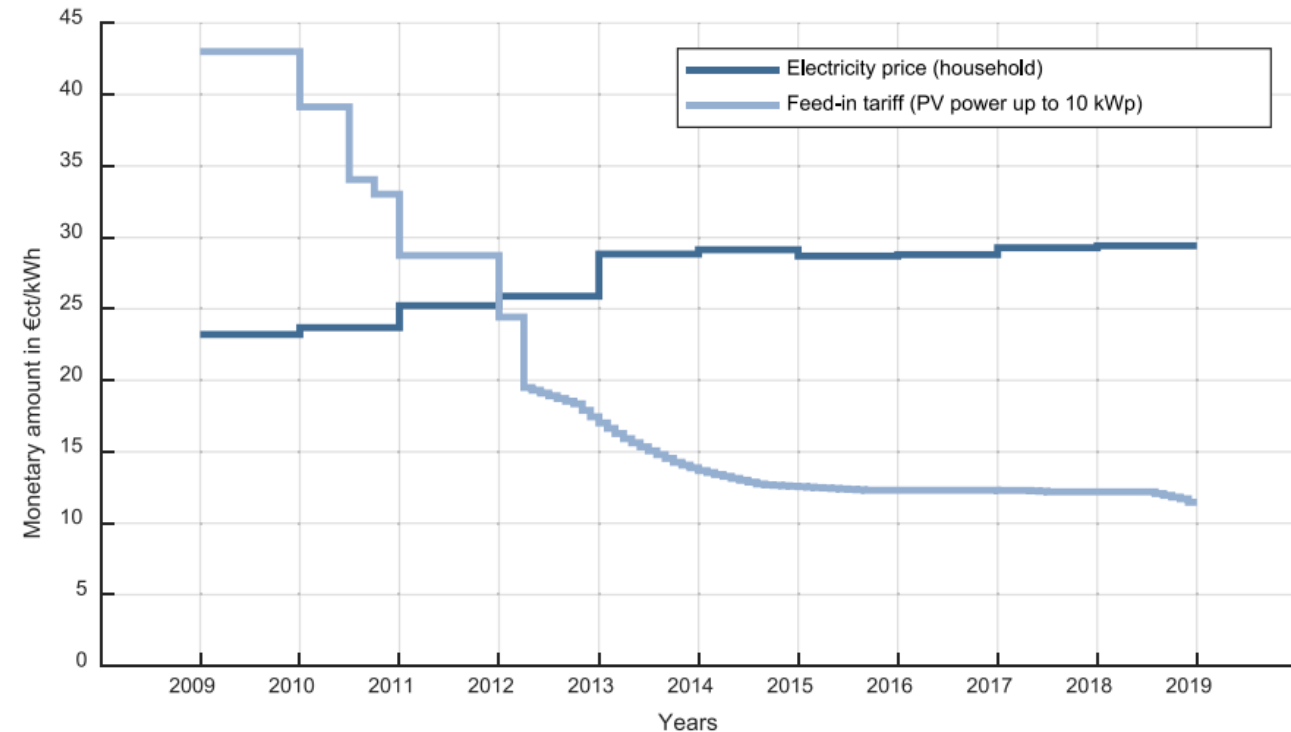
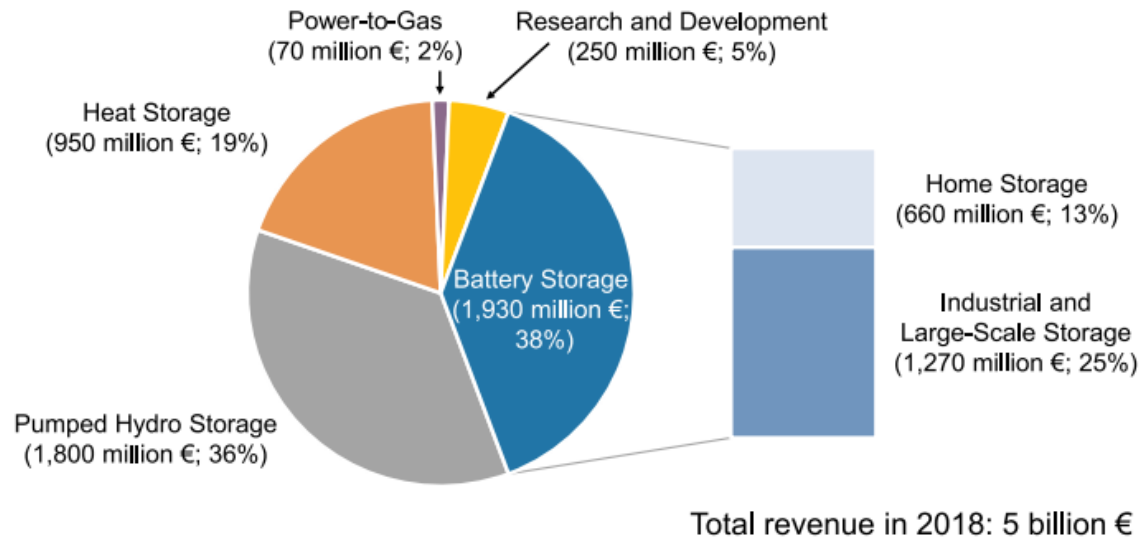
3) Gerenciamento de demanda

- ❑ Redução de demanda nos horários de ponta.
- ❑ Considerações técnicas
 - 50 kW – 10 MW;
 - Tempo de descarga: 1 – 4 horas;
 - Ciclos por ano: 50 – 500.



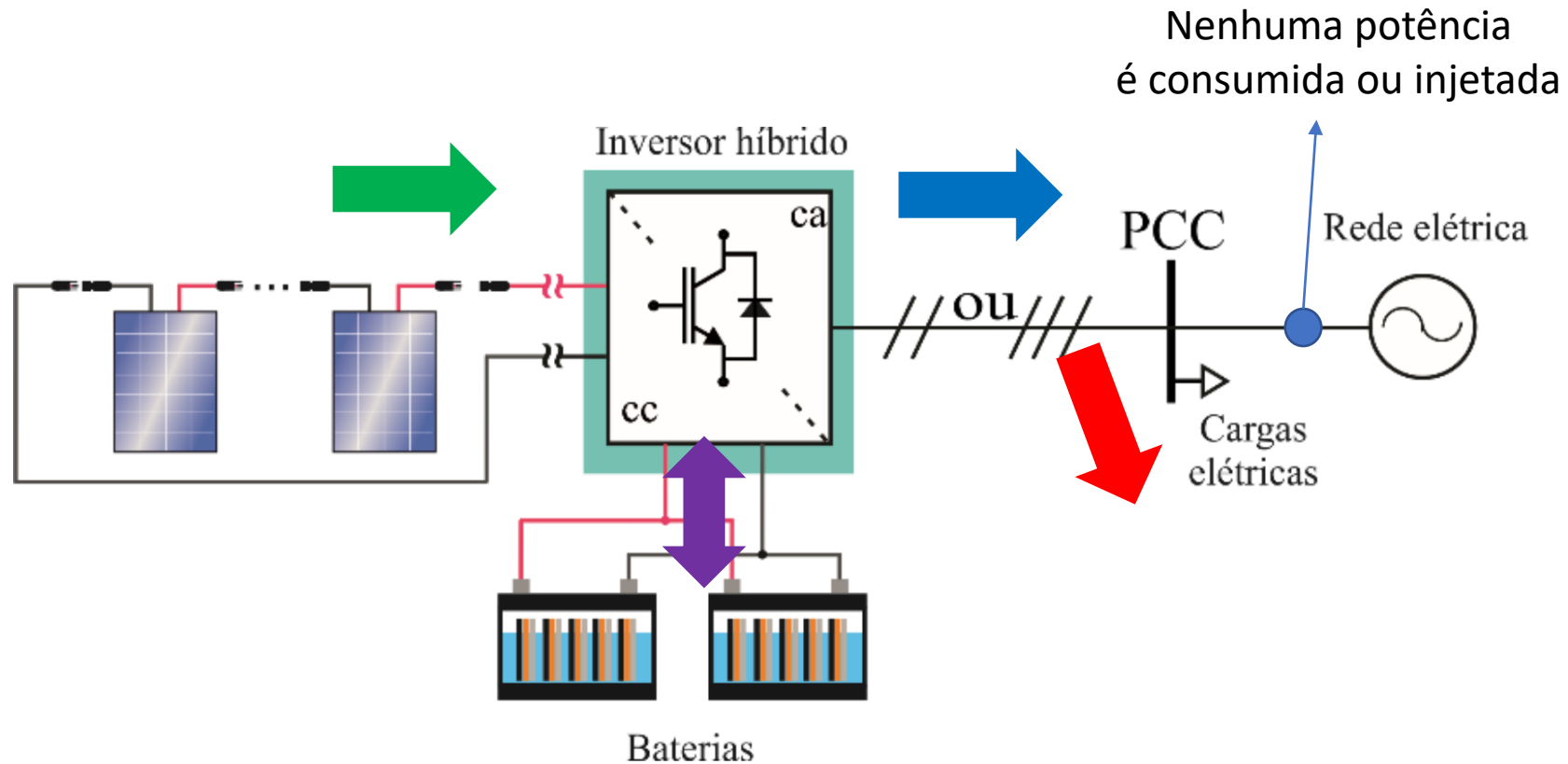
Fonte: DOE/EPRI 2015 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.

4) Autoconsumo – Mercado de fontes renováveis



Fonte: J. Figgener et. al “The development of stationary battery storage systems in Germany – A market review”. in *Journal of Energy Storage*. Vol 29. 2020

Inversor fotovoltaico híbrido on-grid



Fonte: J. Figgner et. al “The development of stationary battery storage systems in Germany – A market review”. in *Journal of Energy Storage*. Vol 29. 2020

Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: afcupertino@ieee.org



www.gesep.ufv.br



@GESEP



@gesep_vicosa



Gesep



Pesquise por:
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas
Fotovoltaicos



Pesquise por:
“EStimate”

Links interessante

- ❑ <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>
- Base de dados com informações de sistemas de armazenamento de energia
- Contem informações de potência e o serviço prestado. Considerações técnicas