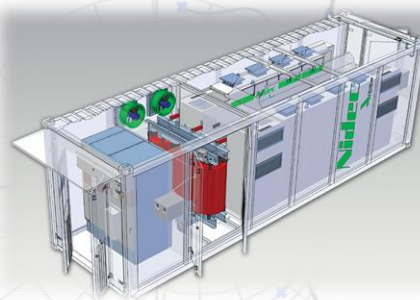




Introdução aos Sistemas de Armazenamento de Energia

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Tópicos a serem abordados

☐ Características – Sistemas elétricos modernos;



☐ Tecnologias de armazenamento de energia;



☐ Eficiência em sistemas de armazenamento;

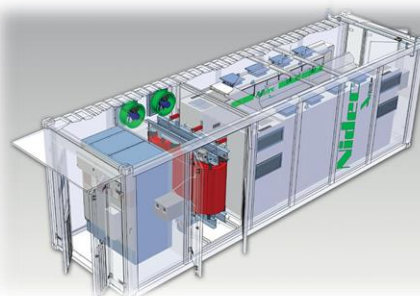
☐ Comparação de tecnologias.



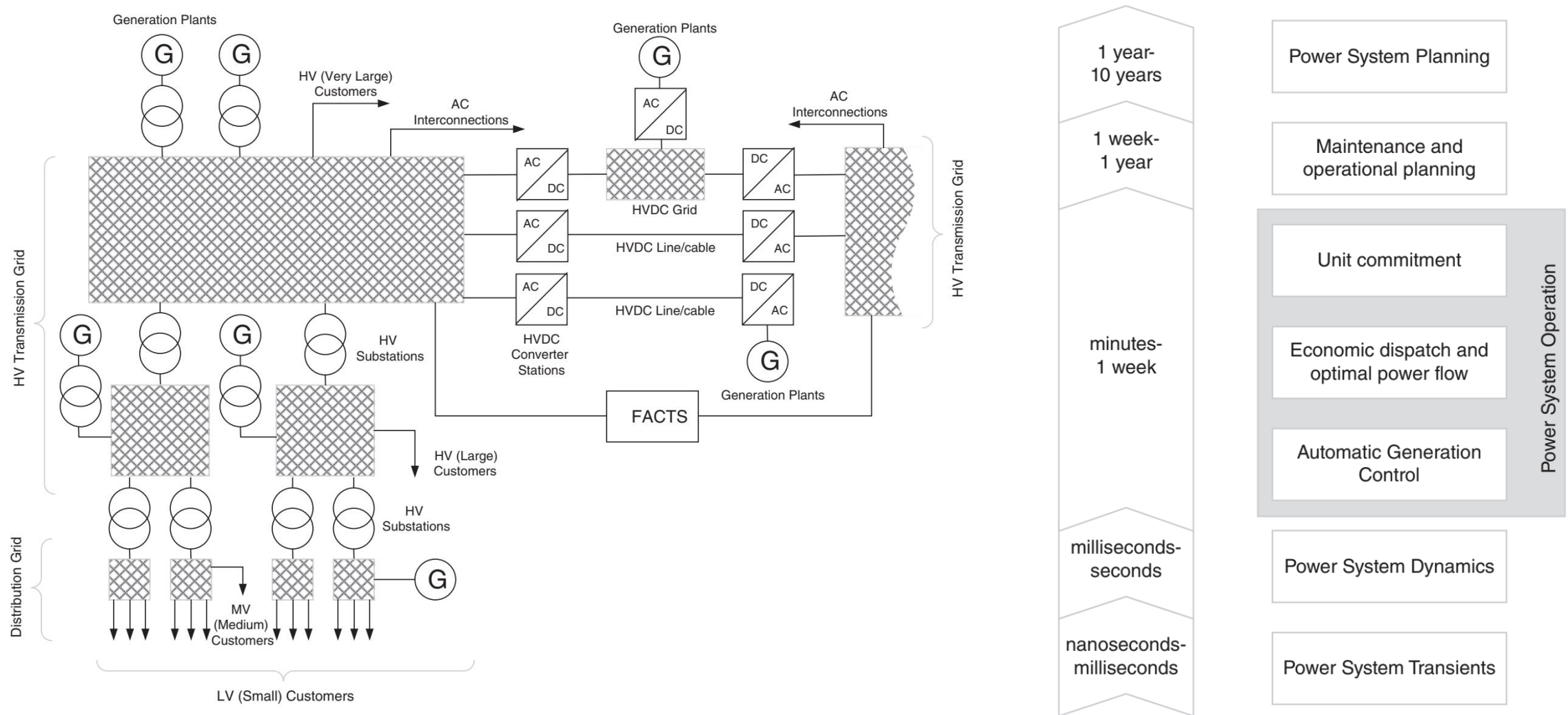


Características dos sistemas elétricos de potência modernos

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org

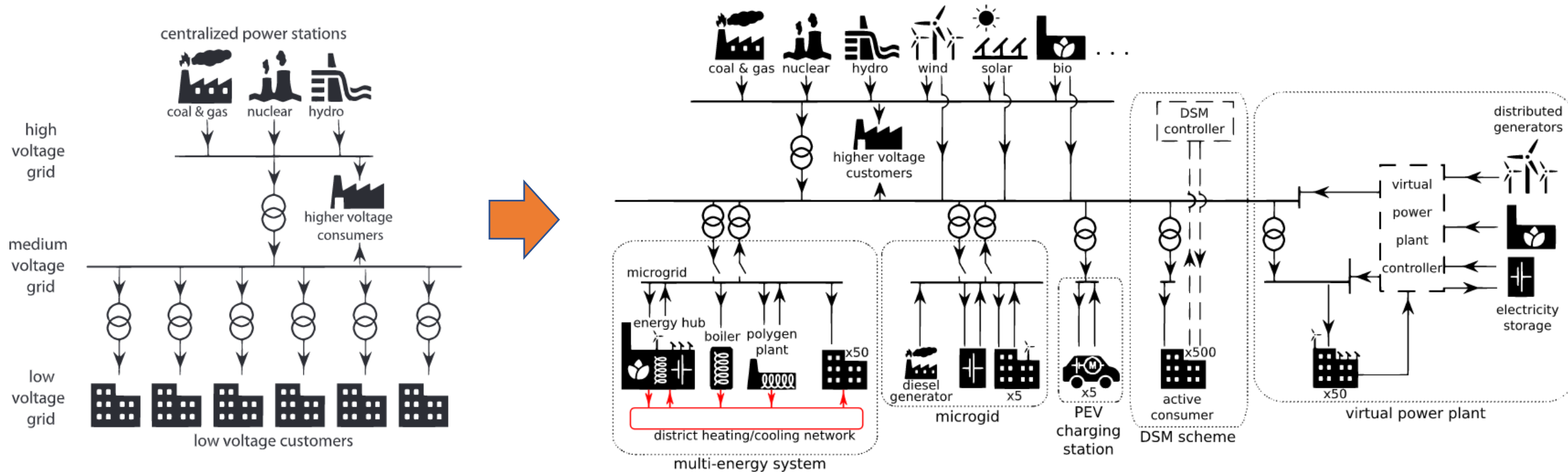


Estrutura básica de um sistema elétrico tradicional



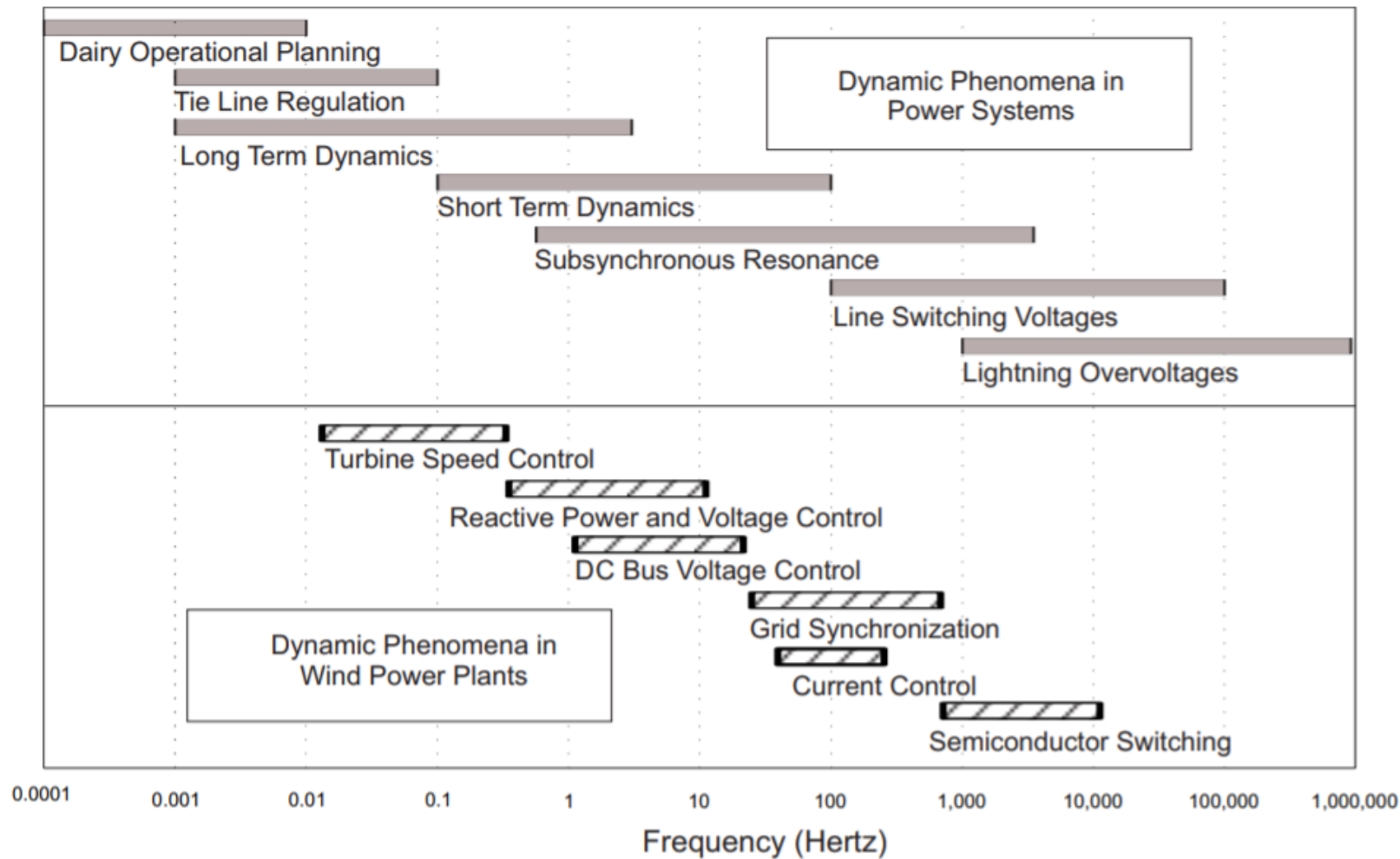
Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Mudança de paradigma: Geração distribuída



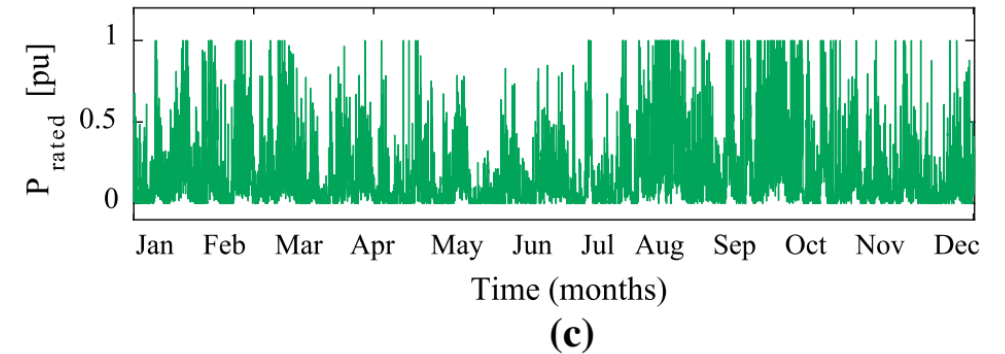
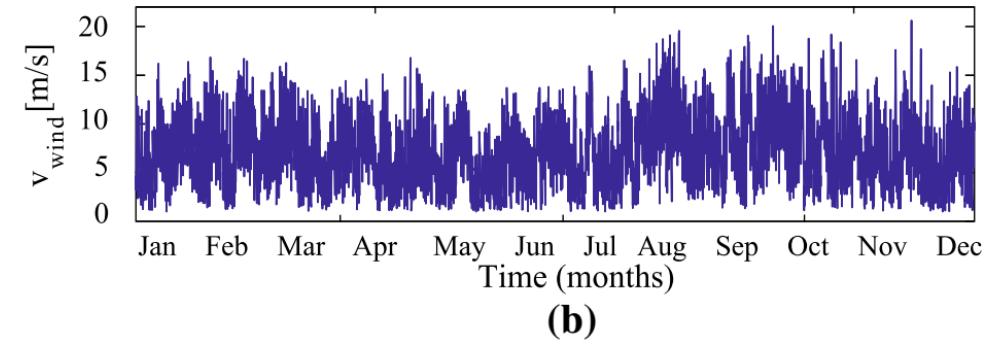
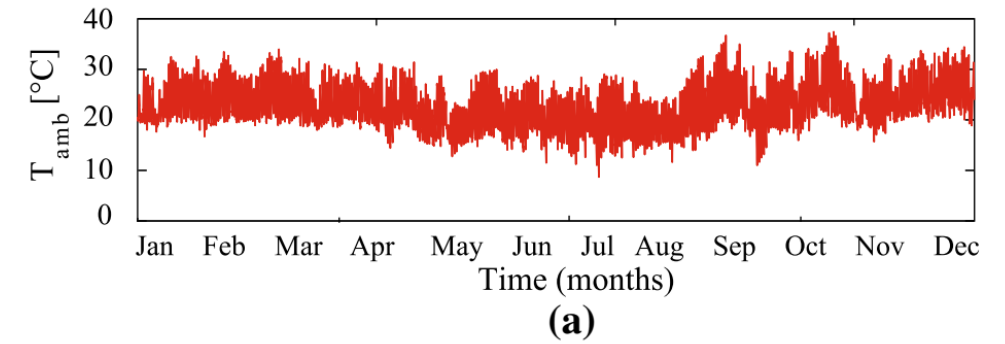
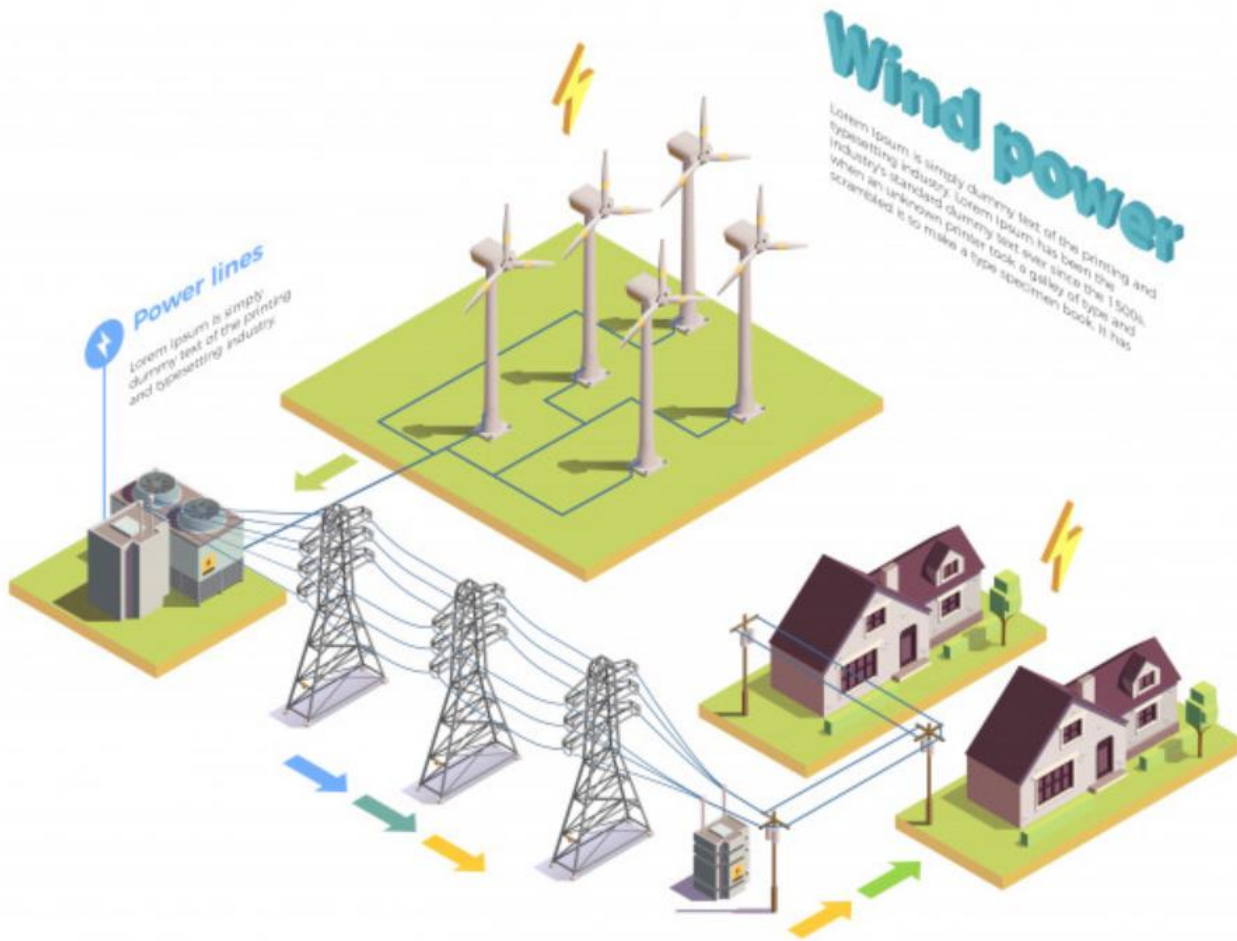
Fonte: Shaun Howell et. al., "Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 193-214, Set. 2017.

Comparação das dinâmicas

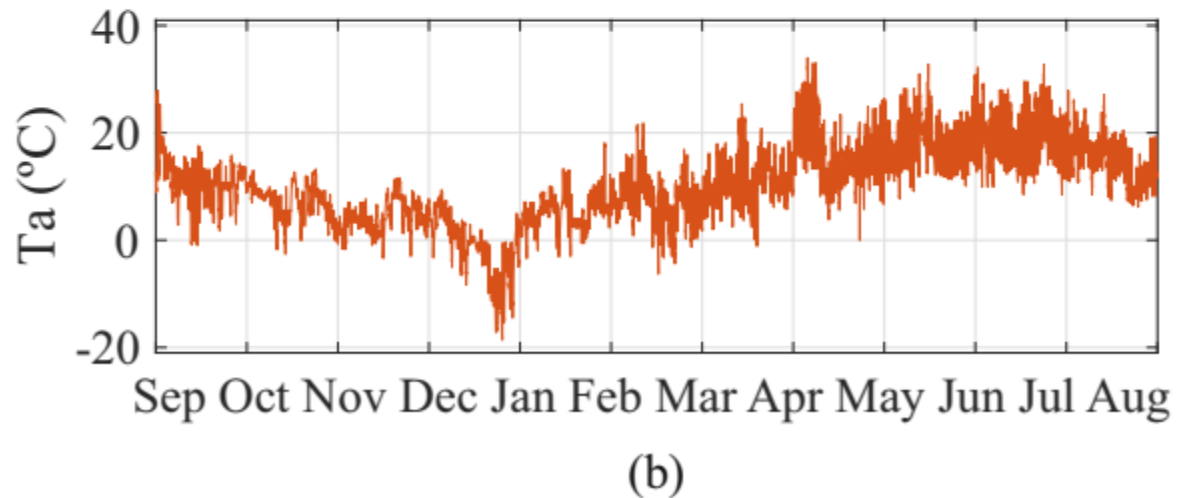
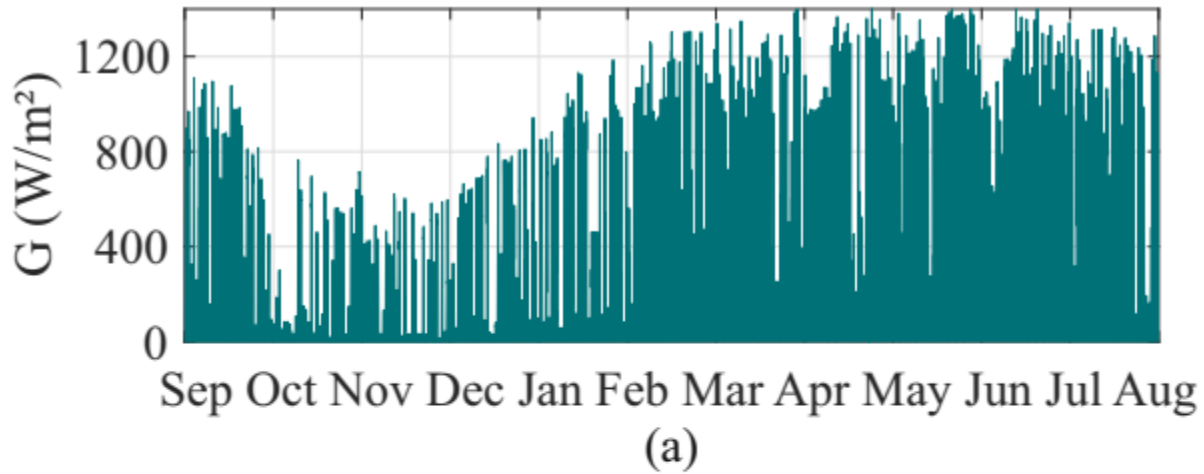


Fonte: H. A. Pereira, "Modeling of Full-Converter Wind Turbine Generators for Power System Studies," Tese de Doutorado. UFMG, 2015.

Intermitência de fontes renováveis – Energia Eólica

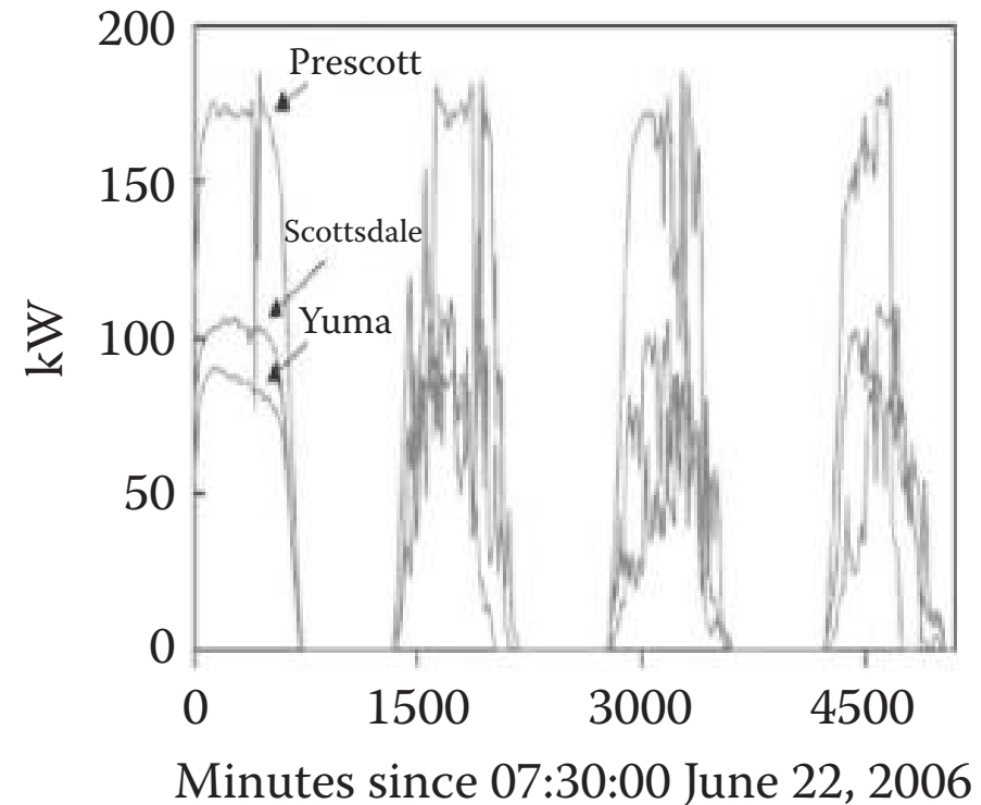
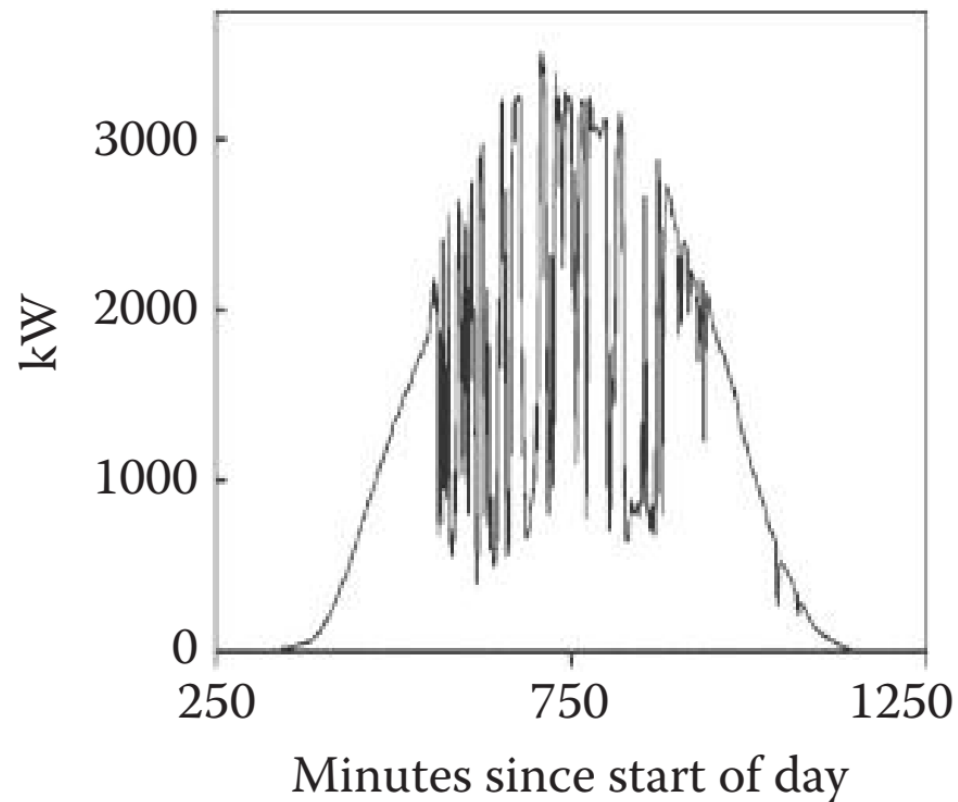


Intermitência de fontes renováveis – Energia Solar



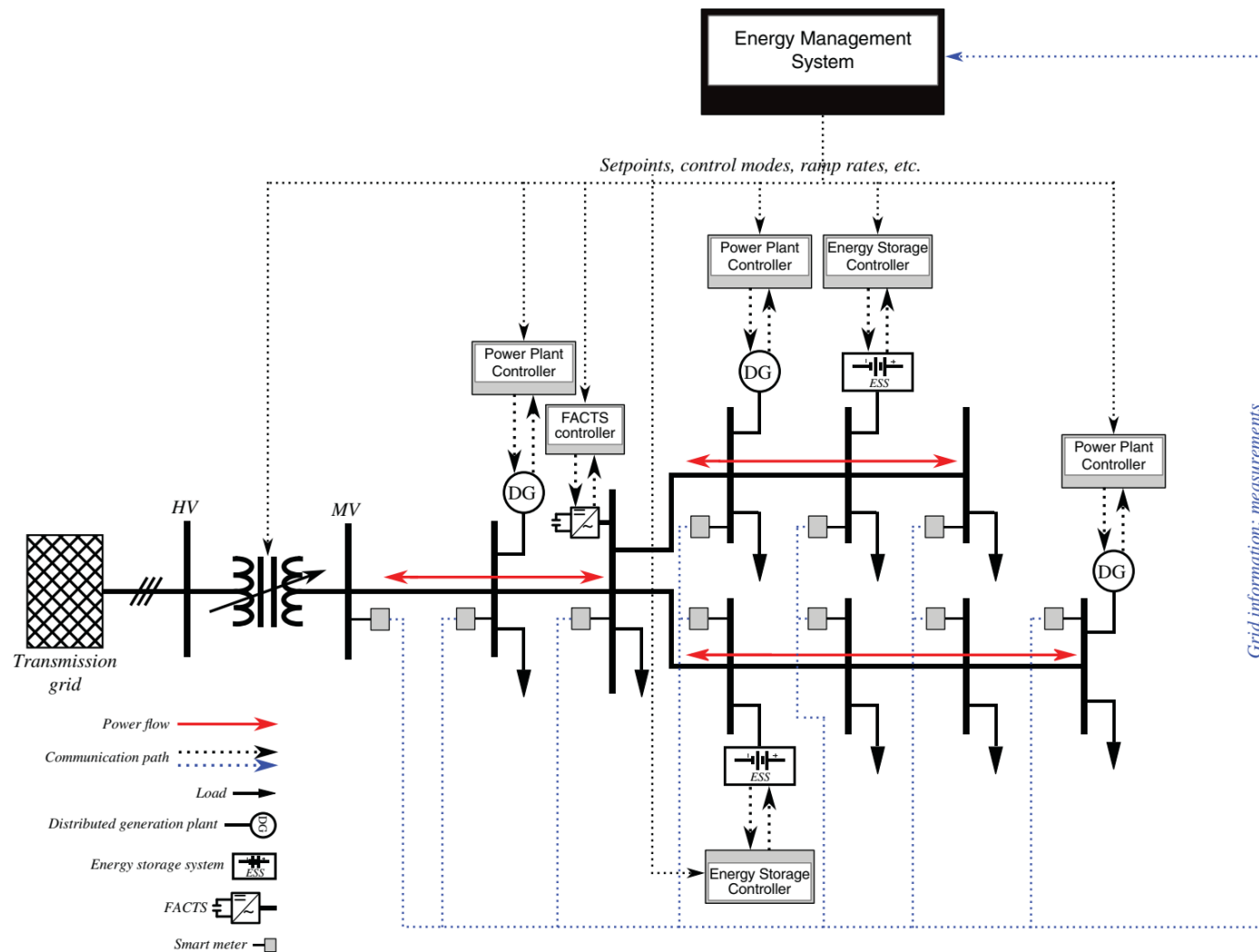
Intermitência de fontes renováveis – Energia Solar

Solar Variability Examples



Fonte: F. S. Barnes and J. G. Levine “Large Energy Storage Systems Handbook,” CRC Taylor & Francis Group, 2011.

Coordenação – Sistema de armazenamento e o SEP

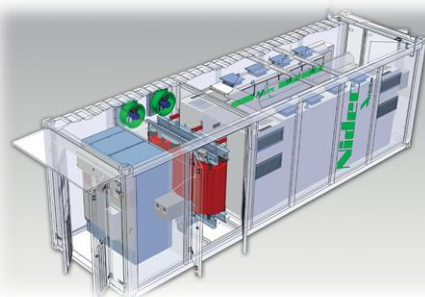


Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.



Tecnologias de armazenamento de Energia

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org

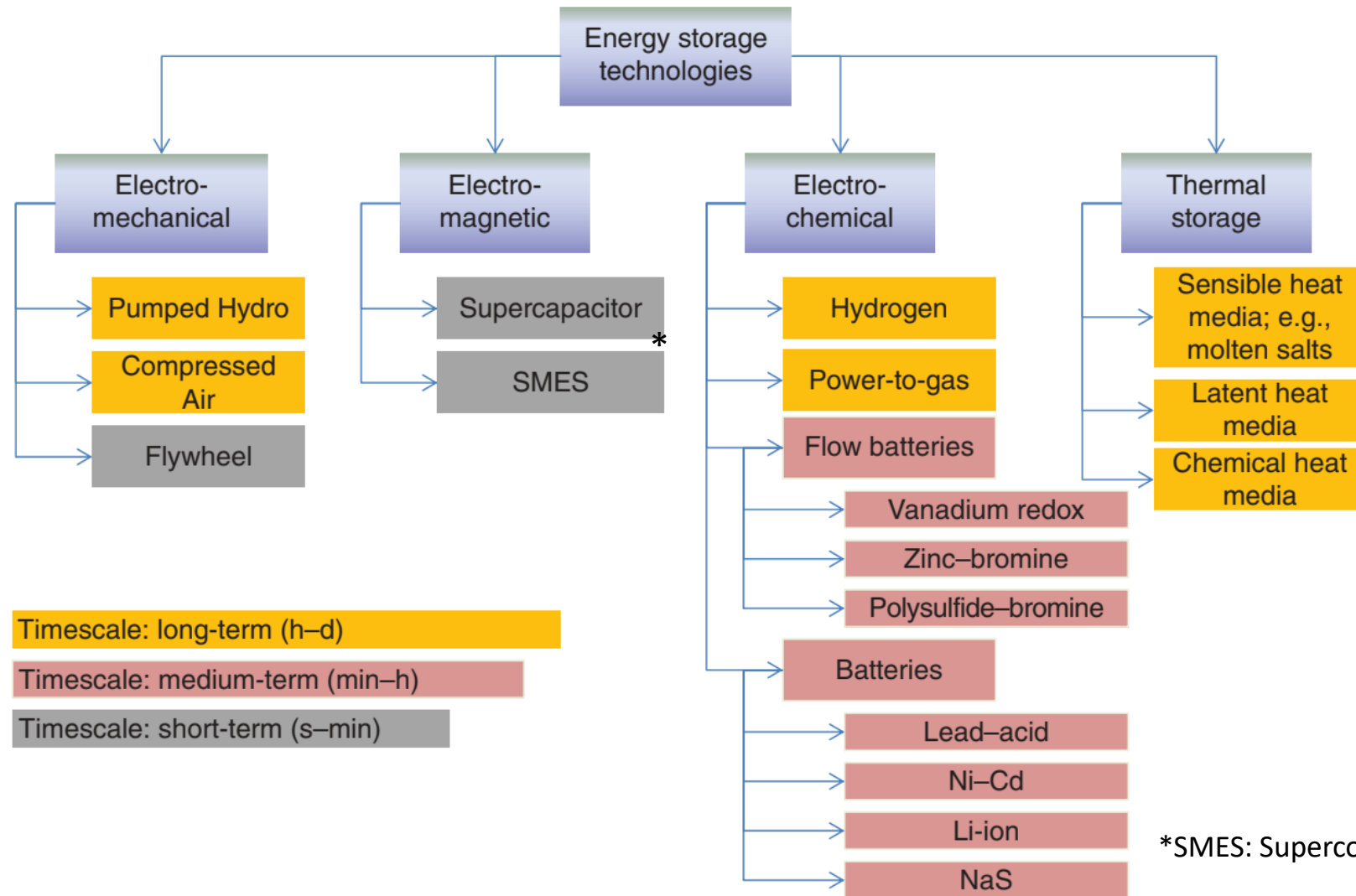


Formas de armazenamento de energia

- ☐ Energia potencial gravitacional;
- ☐ Pressão de um fluido comprimido;
- ☐ Ligação covalente de certas moléculas;
- ☐ Energia cinética;
- ☐ Campos elétricos e campos magnéticos.

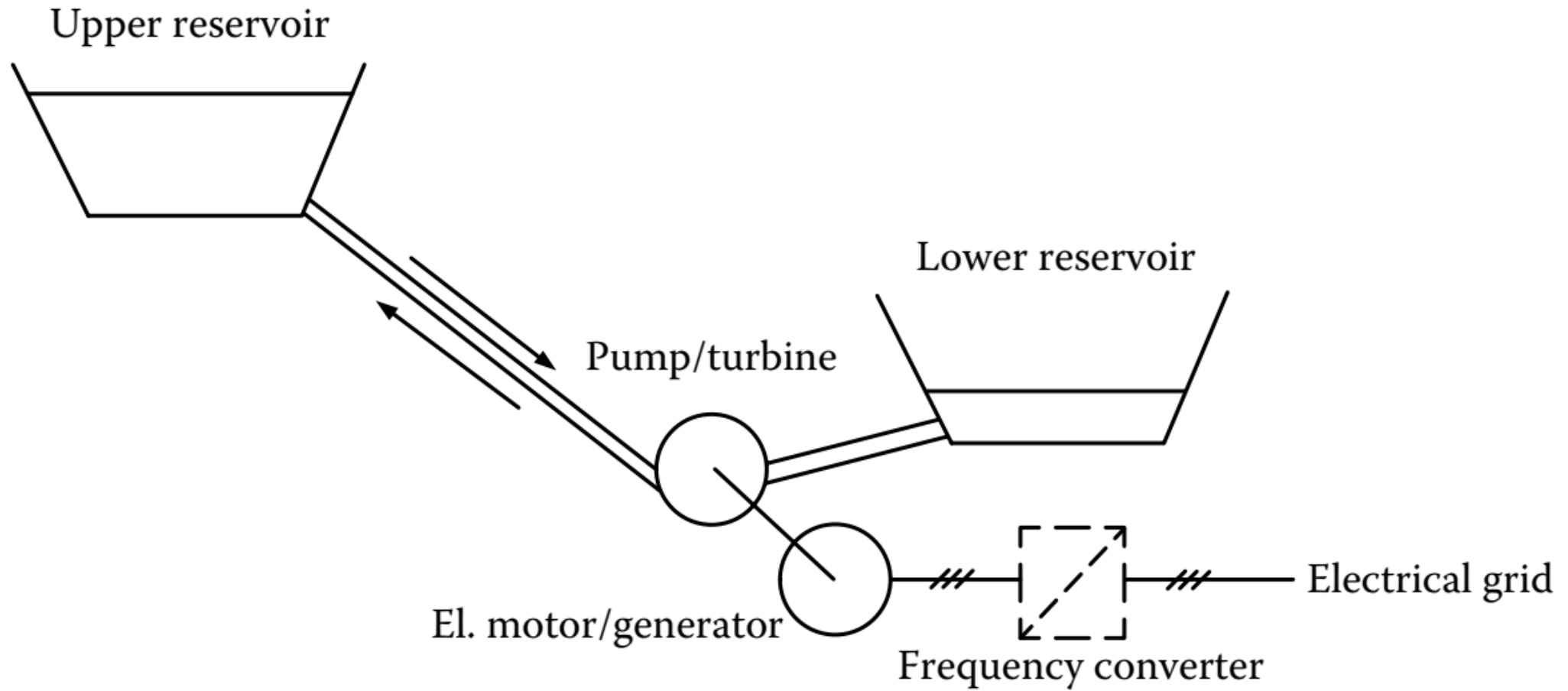


Tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Sistemas Hidroelétricos



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Sistemas Hidroelétricos

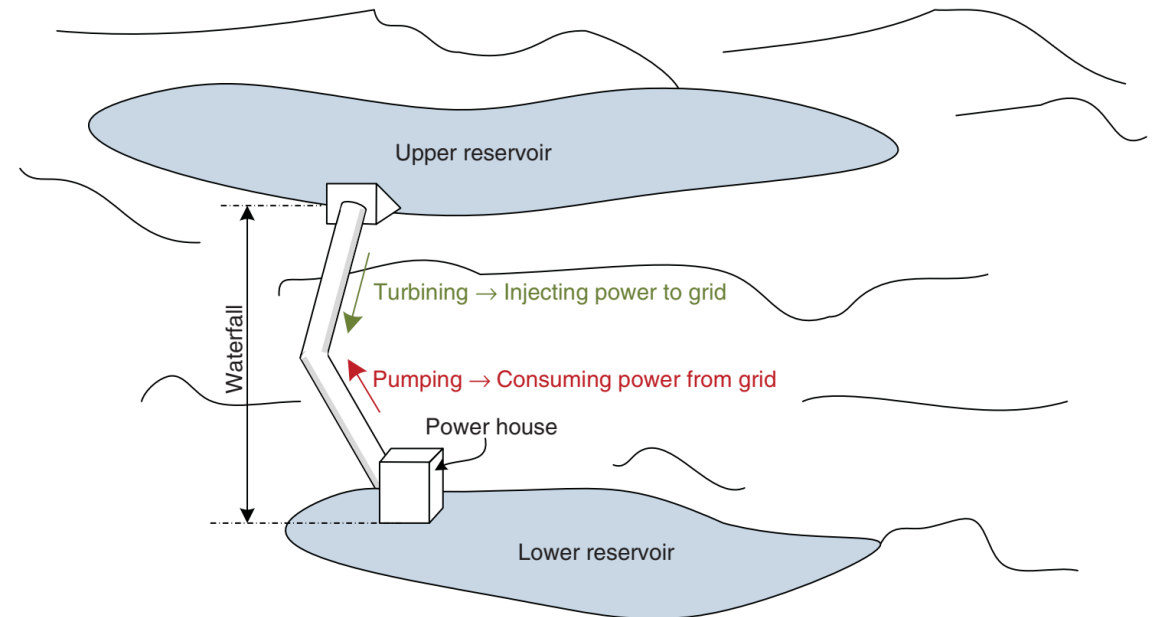
□ $E = \rho g H V$

□ Maior parcela do mercado;

□ Tecnologia madura (1890's);

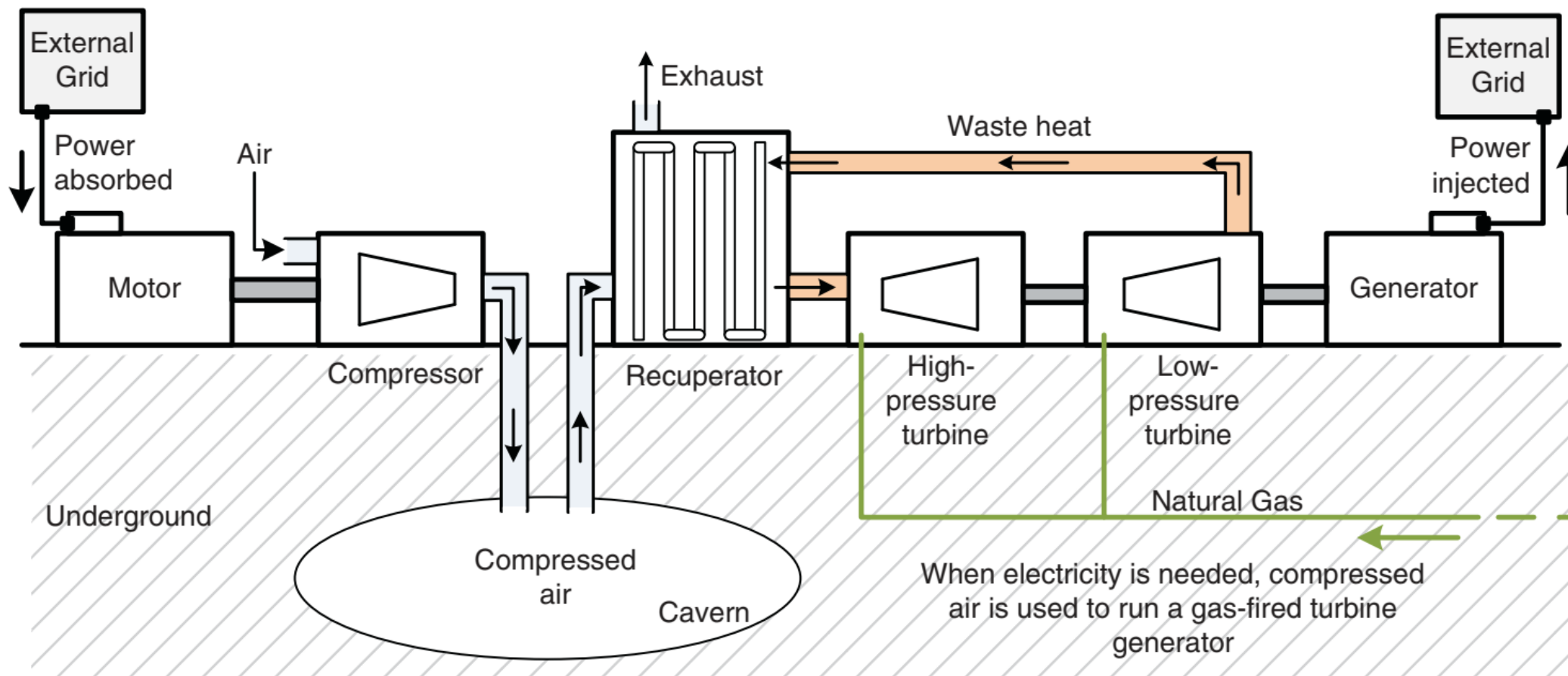
□ Eficiência na faixa de 65 a 75 %;

□ Tempo de operação → 30 a 50 anos.



Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

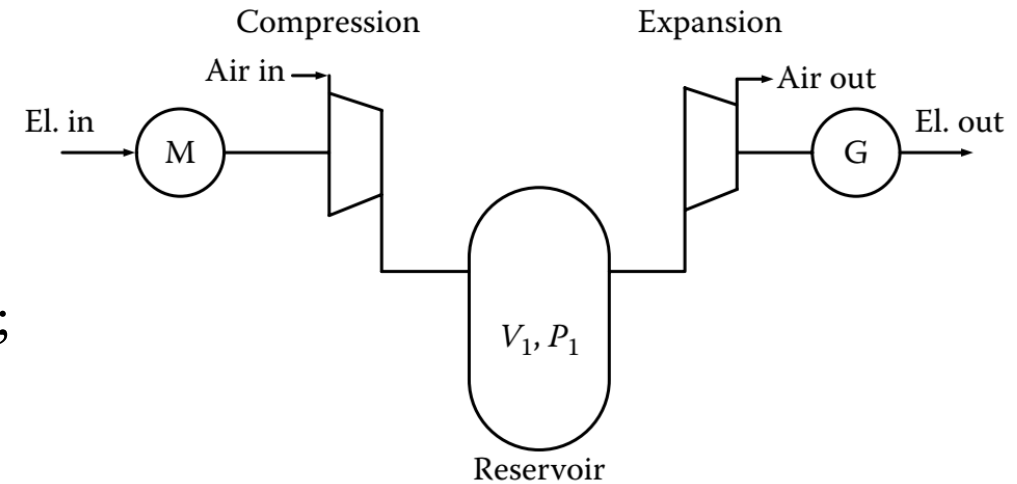
Sistemas Baseados em Ar Comprimido



Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Armazenamento por ar comprimido

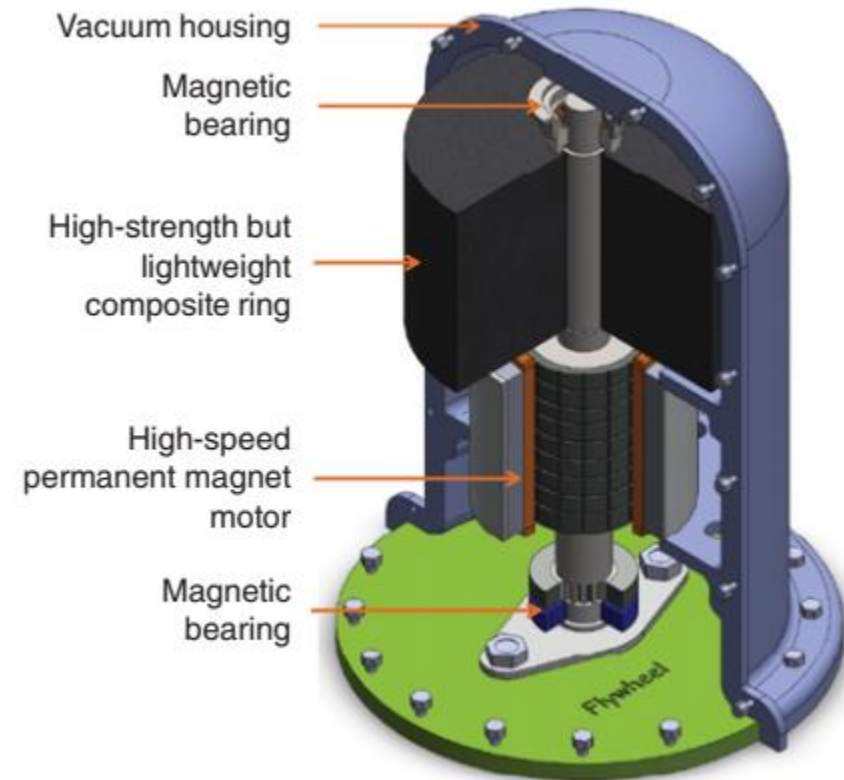
- ❑ $E < P_1 V_1 \left[\ln \left(\frac{P_1}{P_a} \right) - 1 + \frac{P_a}{P_1} \right]$
- ❑ Pressões em torno de 40 – 70 bar;
- ❑ Sistemas grandes dependem da existência de cavernas;
- ❑ Eficiência em torno de 70 %;
- ❑ Baixa auto descarga → compete com sistemas hidroelétricos;
- ❑ Tempo de operação → 40 anos;
- ❑ Sistema de 290 MW na Alemanha e um de 110 MW nos EUA.



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

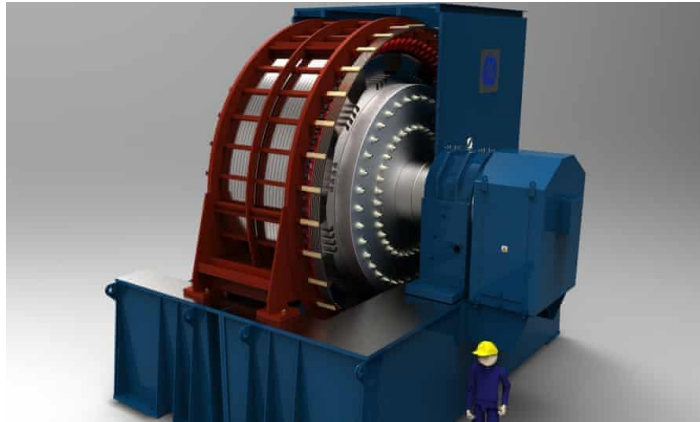
Armazenamento por massa girante - *Flywheel*

- ❑ $E = \frac{1}{2} J \omega^2$
- ❑ Sistemas com elevada vida útil - 10^7 ciclos;
- ❑ Dispositivos de alta tecnologia;
- ❑ Baixa velocidade → milhares de rpm;
- ❑ Alta velocidade → dezenas de milhares de rpm;
- ❑ Alta eficiência → em torno de 90 %;
- ❑ Aplicações de curto-termo → poucos minutos;



Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

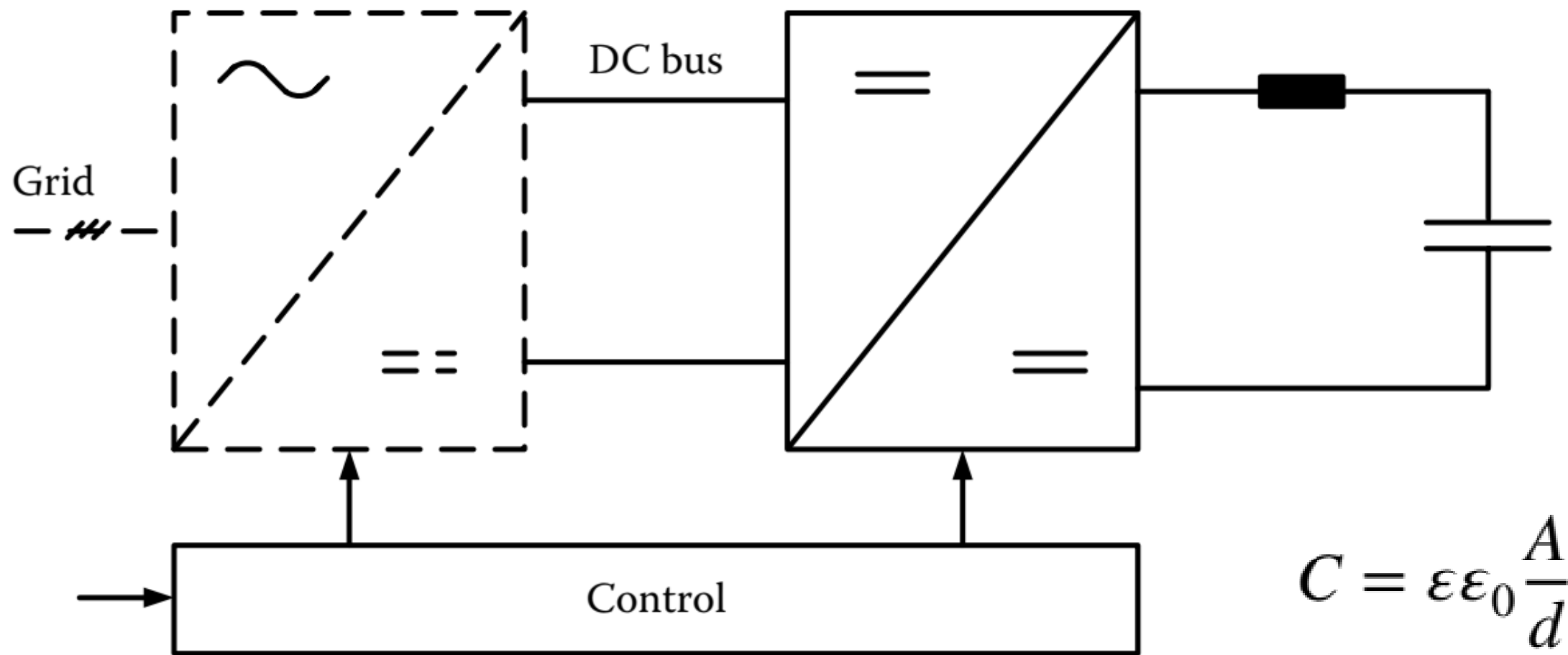
Armazenamento por massa girante - *Flywheel*



- Ten 100kW / 25 kWh flywheels
- Transformers and support equipment
- Electronics and controls inside container

Fonte: 1) <https://www.theguardian.com/business/2020/jul/06/giant-flywheel-project-in-scotland-could-prevent-uk-blackouts-energy>
2) Beacon Power.

Armazenamento por Supercapacitores



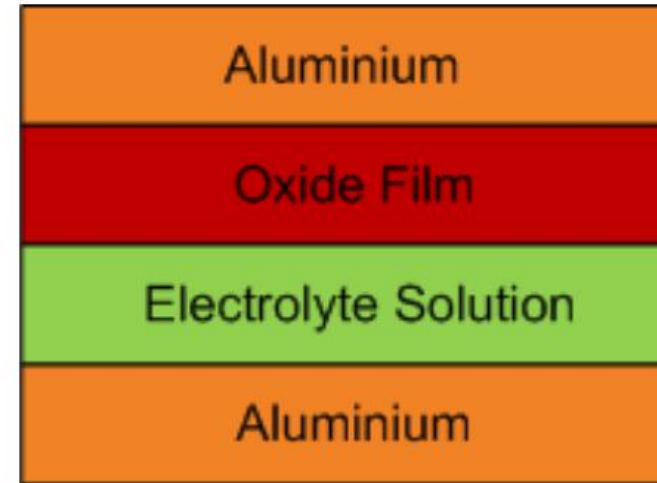
Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Capacitores



Sandwich

[Source: http://www.jhdeli.com/Templates/Cold_Sandwich.html]



Aluminum Electrolytic Capacitor

Capacitance

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

Ripple current rating

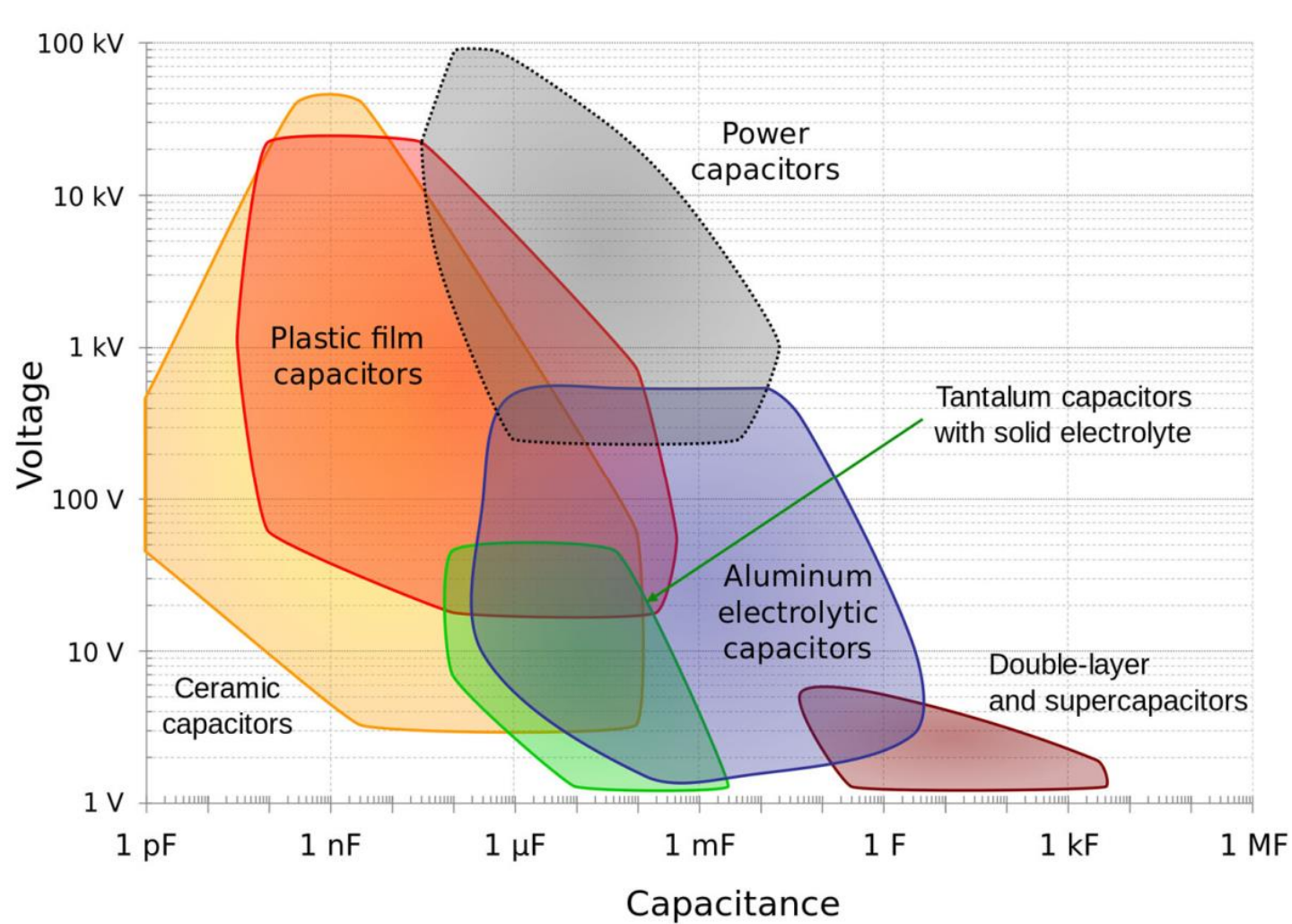
$$I_r = \sqrt{\frac{P_d}{R_s}} = \sqrt{\frac{h A \Delta T}{R_s}}$$

Volumetric efficiency

$$\eta_v = \frac{CV}{\text{volume}}$$

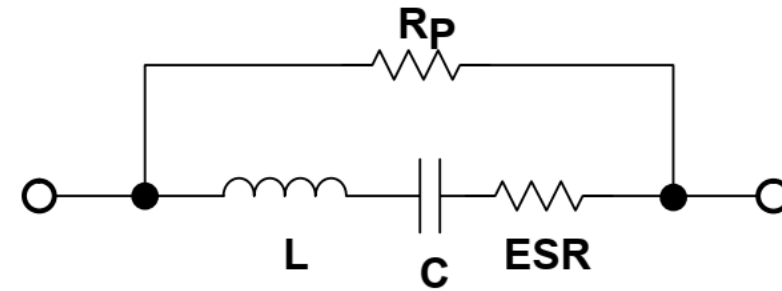
Fonte: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/243654015/IECON_2016_Cap_HW.pdf

Capacitores



Fonte: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/243654015/IECON_2016_Cap_HW.pdf

Circuito equivalente – Supercapacitor

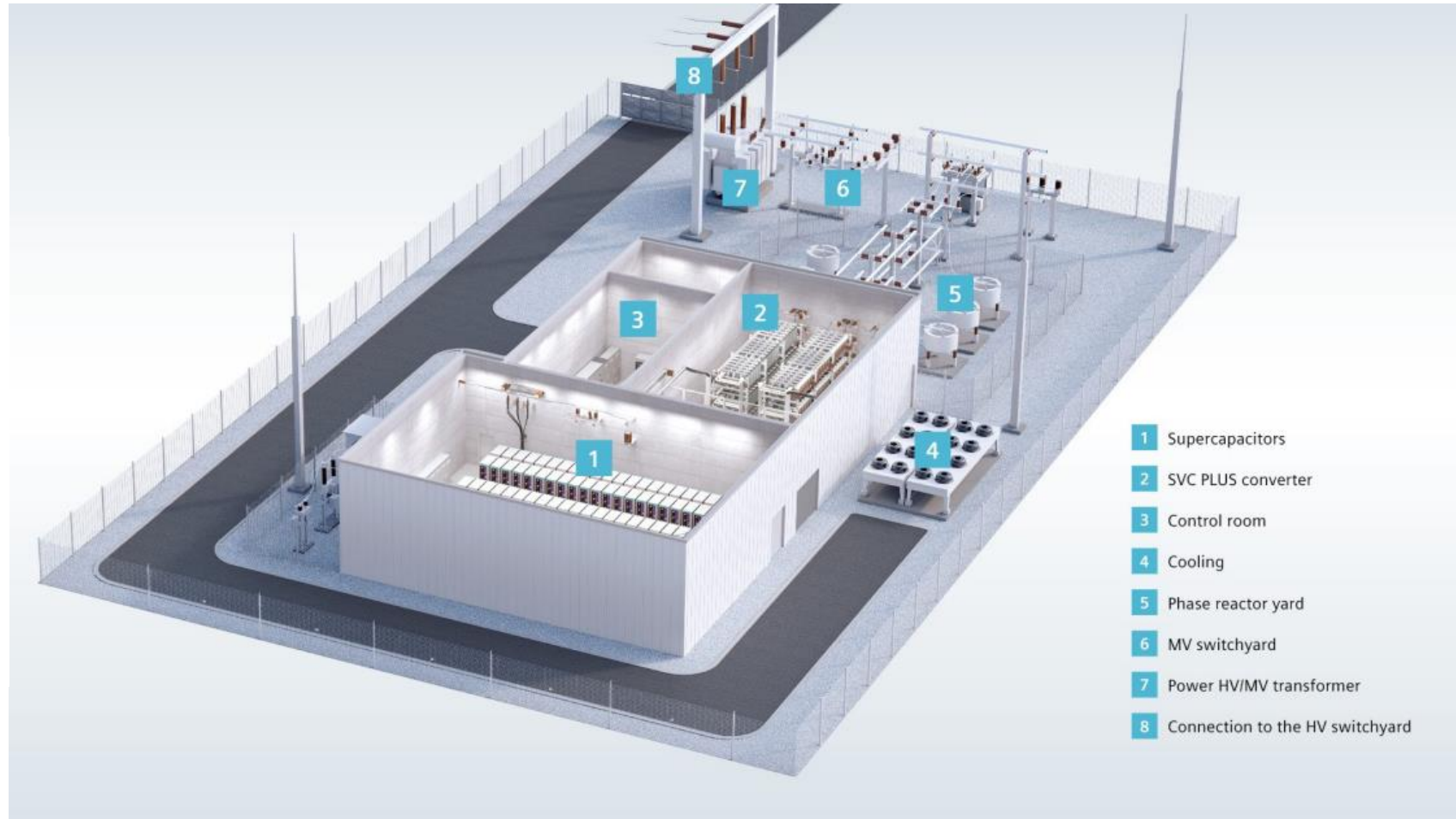
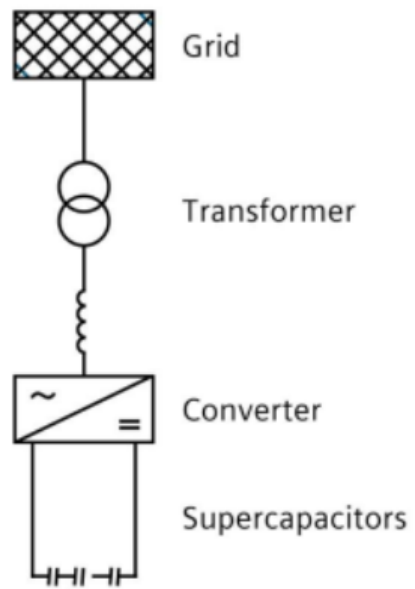


Fonte: Texas instruments. “Op Amps for Everyone”

- ❑ Efeito indutivo;
- ❑ Auto descarga ocasionada por R_p ;
- ❑ Perdas associadas a ESR .

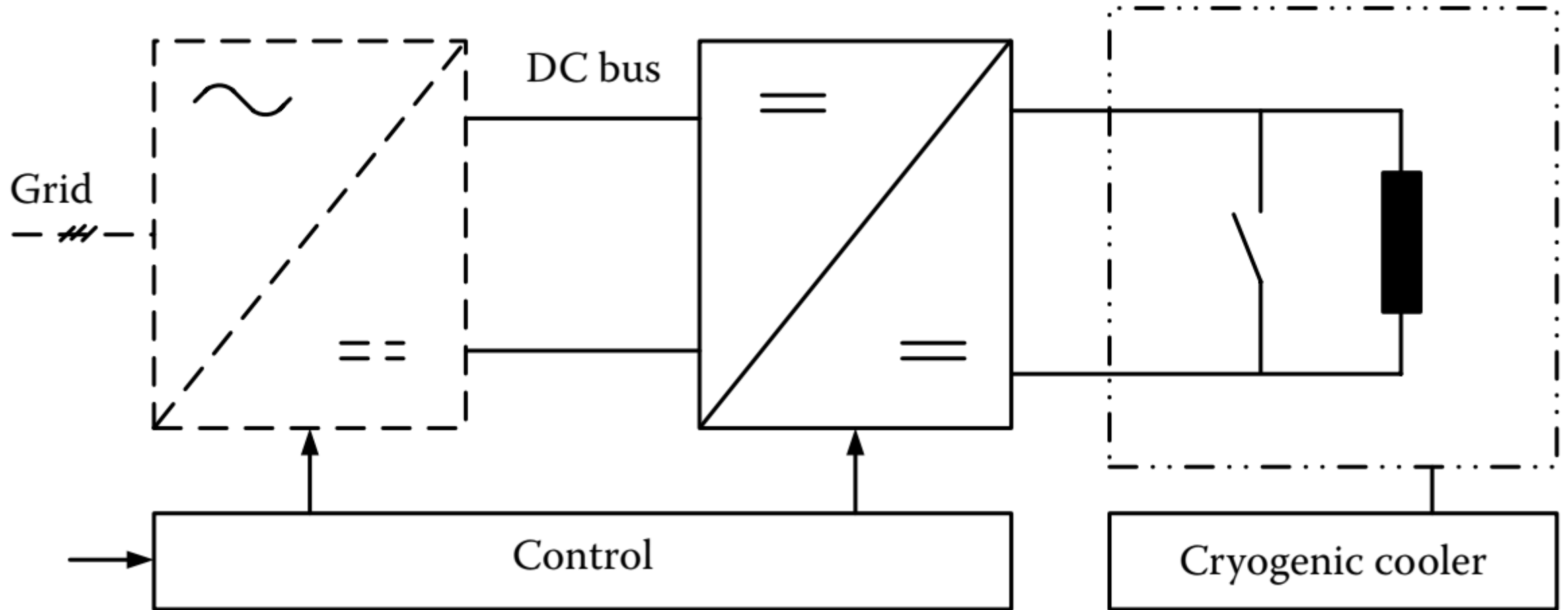
Fonte: https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/243654015/IECON_2016_Cap_HW.pdf

SVC Plus Frequency Stabilizer - Siemens



Fonte: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/facts/portfolio/svcplus-frequency-stabilizer.html>

SMES



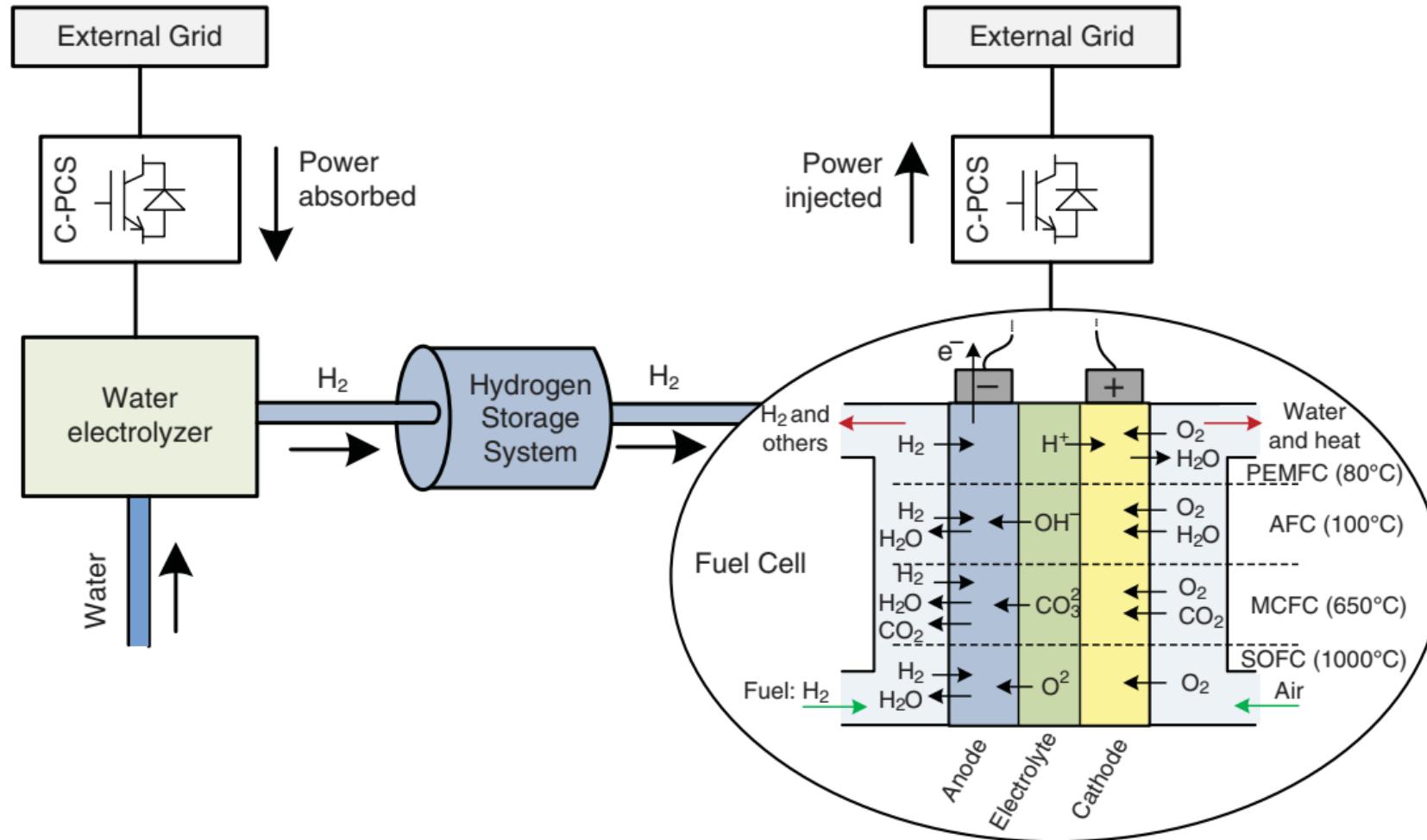
Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Exemplo de SMES



Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Armazenamento baseado em hidrogênio



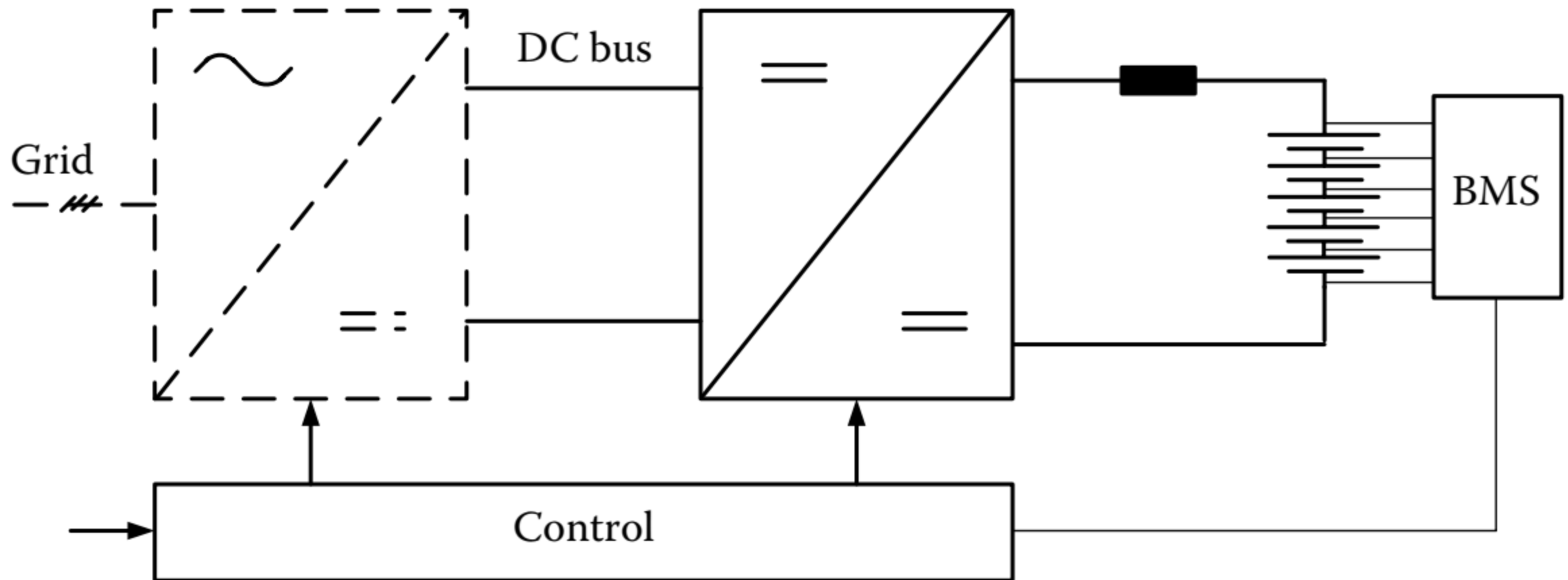
Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Armazenamento baseado em hidrogênio

- ❑ Faz uso de células combustíveis;
- ❑ Aplicações industriais:
 - PEMFC (próton exchange membrane full cell)
 - Temperatura de operação em torno de 80 °C;
 - Disponíveis no mercado (em torno de 100 kW).
- ❑ Alta potência
 - SOFC (solid oxide fuel cell);
 - Opera a 650 °C;
 - Pacotes de até 2 MW encontrados no mercado.
- ❑ Eficiências em torno de 42 %.

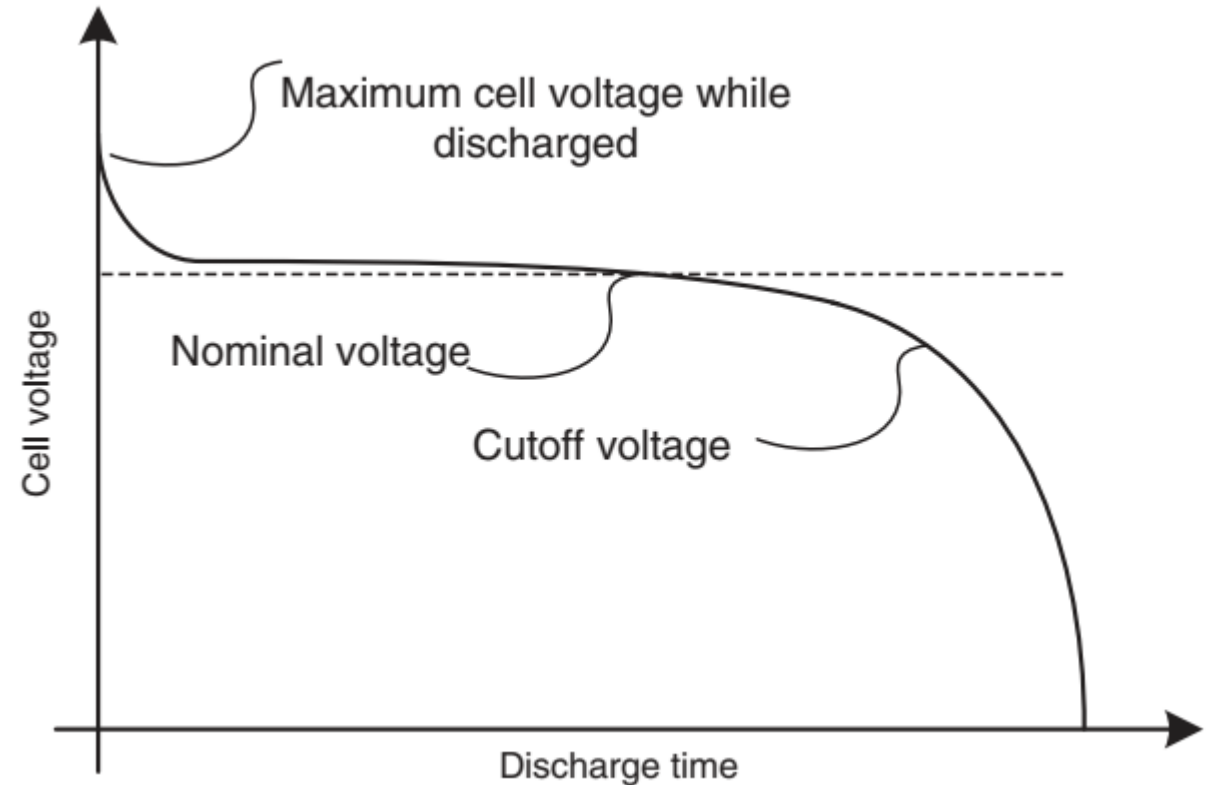
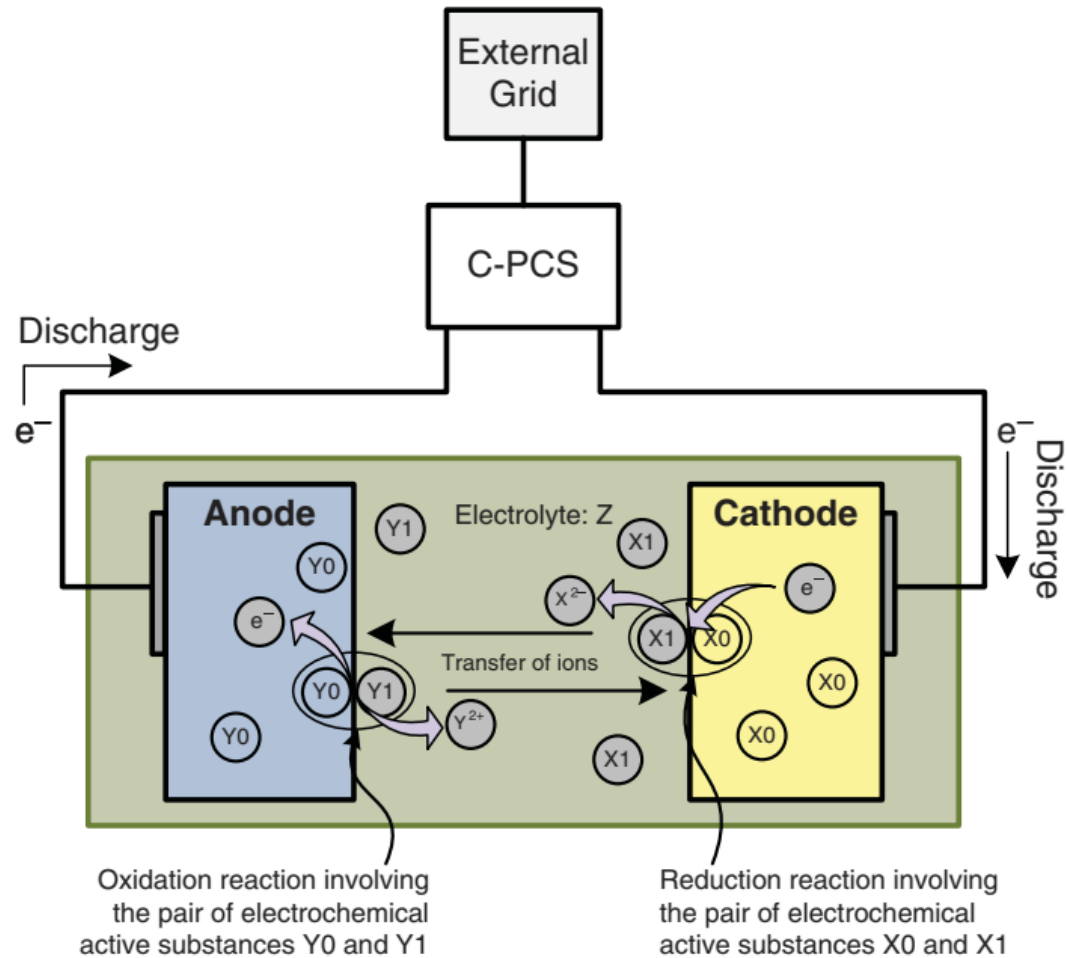
Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Armazenamento baseado em baterias



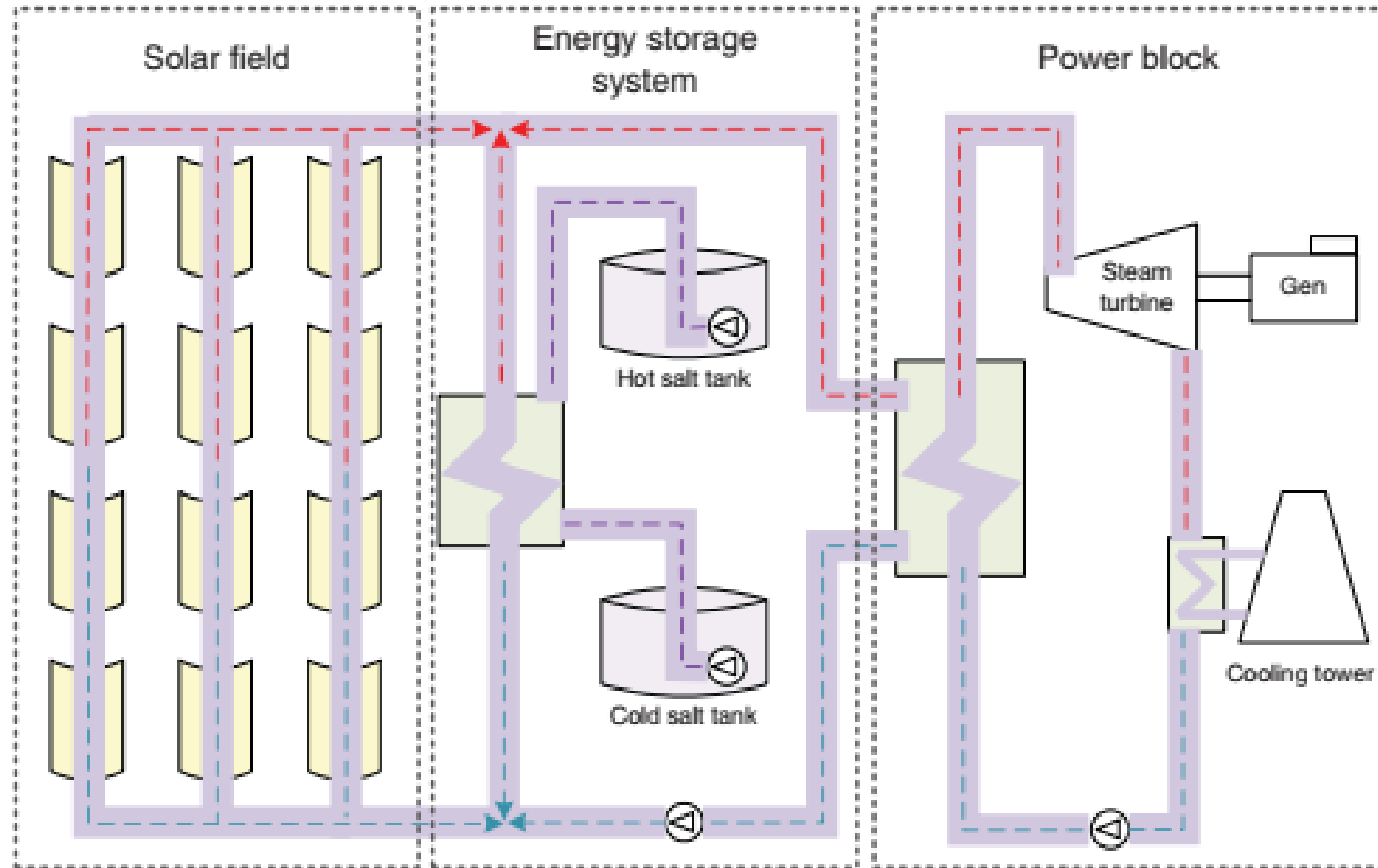
Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Armazenamento baseado em baterias



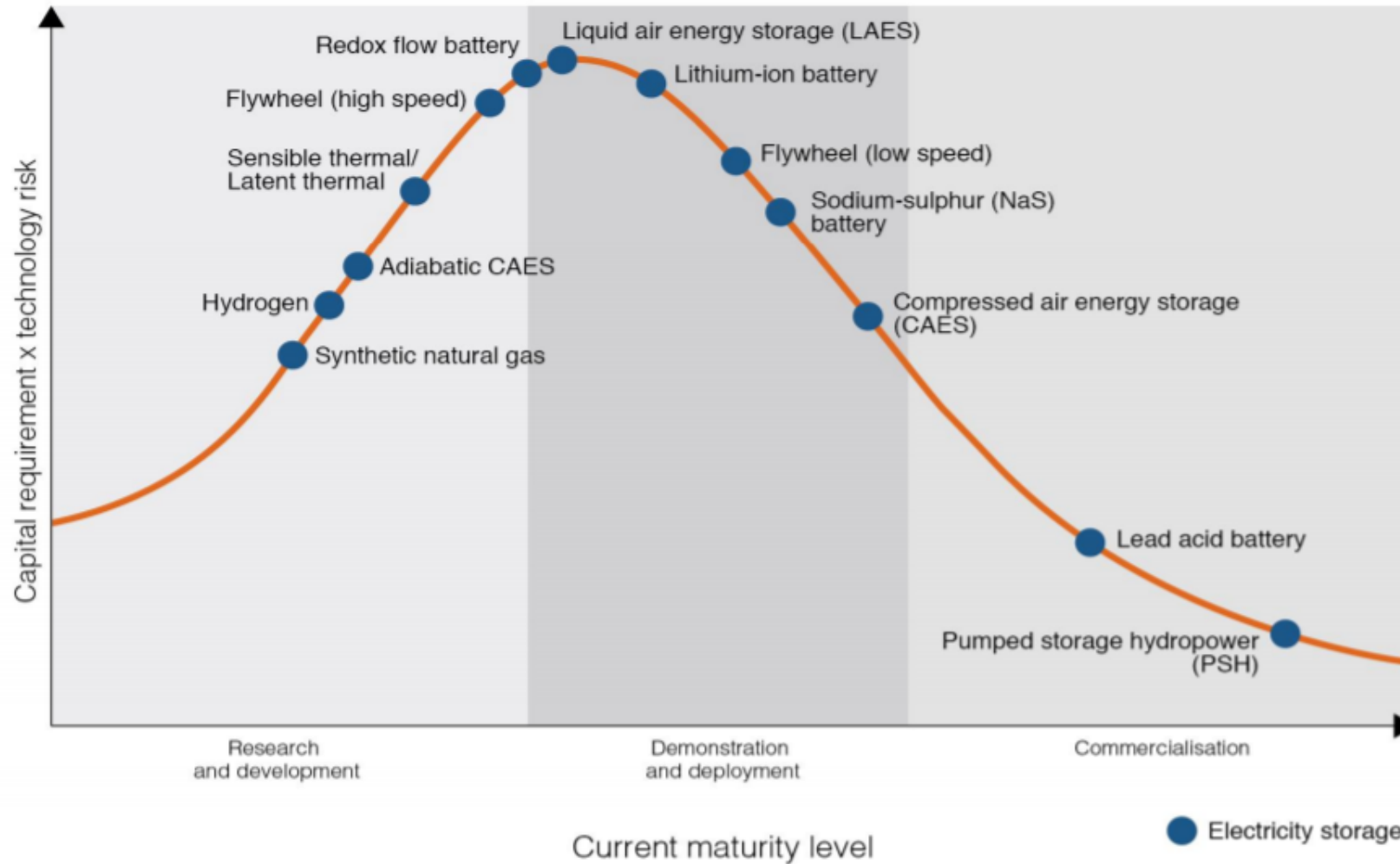
Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Armazenamento Térmico



Fonte: F. Díaz González, A. Sumper e O. Gomis-Bellmunt, "Energy Storage in power systems," John Wiley & Sons, 2016.

Nível de maturidade das tecnologias



Fonte: World Energy Council, “E-storage: Shifting from cost to value. 2016.

Obrigado pela Atenção



Bons estudos!



Dúvidas: afcupertino@ieee.org



www.gesep.ufv.br



@GESEP



@gesep_vicosa



Gesep



Pesquise por:
“GESEP UFV”



EStimate - Sistemas
Fotovoltaicos

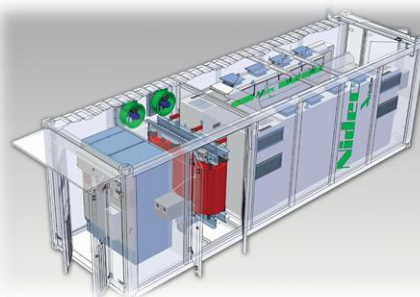


Pesquise por:
“EStimate”



Eficiência de sistemas de armazenamento

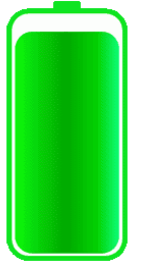
Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Algumas definições técnicas – armazenadores elétricos e eletroquímicos

- ❑ Capacidade C : quantidade de energia que pode ser recuperada do armazenador.

$$C = \int_0^t i(t) dt$$



- ❑ Profundidade de descarga DoD: Quantidade de eletricidade extraída do armazenador em relação a sua capacidade.

$$DoD = \frac{\int_0^t i_{dis}(t) dt}{C}$$

- ❑ Estado de carga SoC: Indica a quantidade de eletricidade disponível em relação a sua capacidade

$$SoC = \frac{C - \int_0^t i_{dis}(t) dt}{C} = 1 - DoD$$

Algumas definições técnicas – outras tecnologias

- A capacidade é medida em termos de energia armazenada:

$$E_{sto} = \int_0^t p(t) dt$$

- Além disso, SoC é substituído por SoE:

$$SoE = \frac{E}{E_{sto}}$$

Eficiência de sistemas de armazenamento de energia

- ❑ Figura de mérito importante para sistemas de armazenamento;
- ❑ Definição não é trivial, uma vez que existem diversos modos de operação:
 - Perdas por transferência de potência P_{ch} : Processo de carga e descarga;
 - Perdas por auto descarga P_0 : Sistema desabilitado.
- ❑ $P_{ch} \approx \alpha P^2$;
- ❑ $P_0 = f(SoE)$.
- ❑ $P_{loss} = \alpha P^2 + f(SoE) \Leftrightarrow E_{loss_{cyc}} = \int_0^{t_{cyc}} [\alpha P^2 + f(SoE)] dt$

Eficiência global normal e real

□ Eficiência global normal:

➤ η_{cn0} : Assume que a potência de carga e descarga são iguais e desconsidera auto descarga;

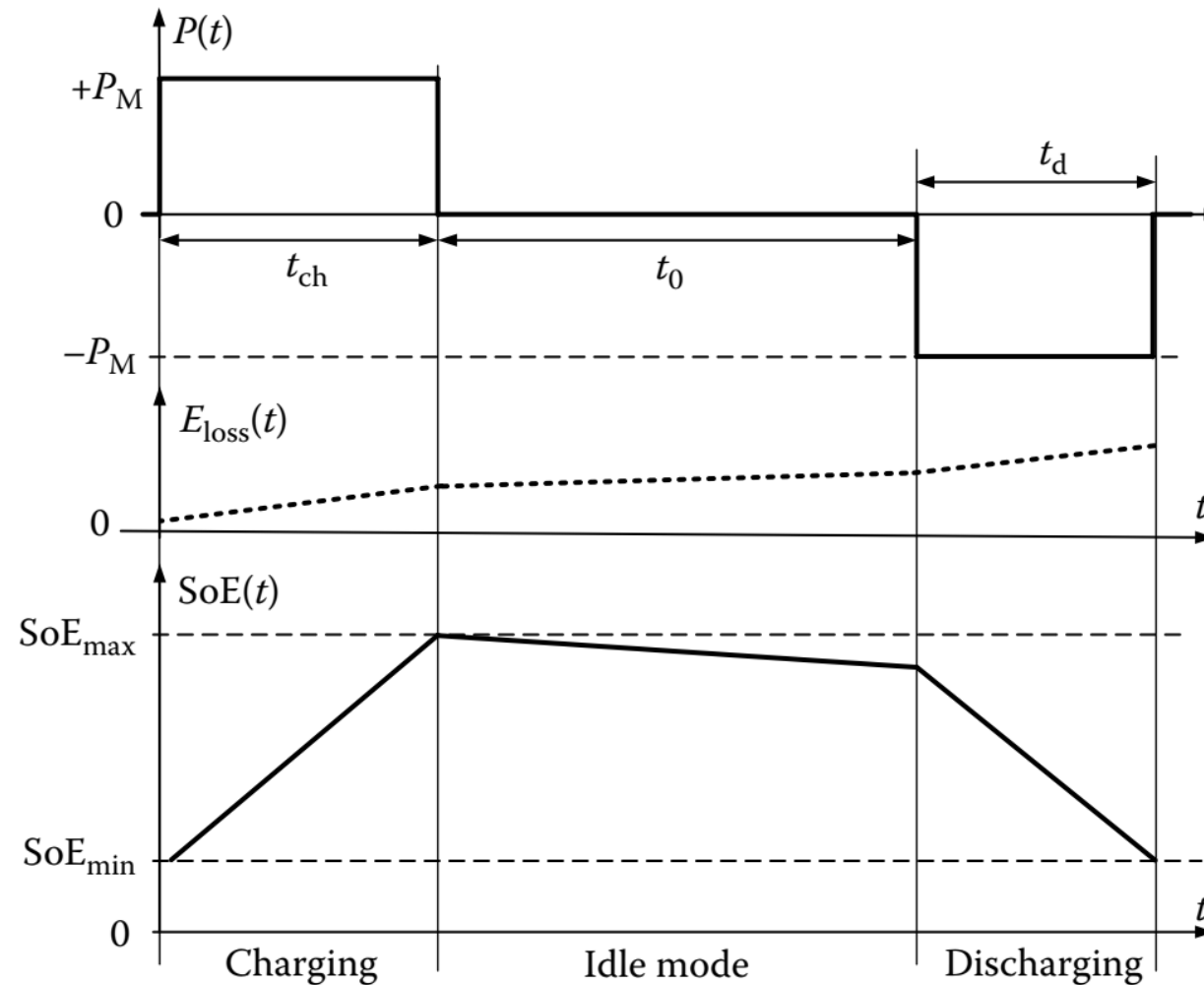
□ Eficiência global real:

➤ η_{cnt} : Considera o efeito da auto descarga;

□ Convenção: $P(t)$ é positiva durante carga e negativa durante descarga;

$$SoE(t) = SoE(t_0) + \frac{\int [P(t) - P_{loss}(t)] dt}{E_{sto}}$$

Exemplo de um perfil de operação – ESS



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Eficiência de sistemas de armazenamento de energia

□ Eficiência global normal:

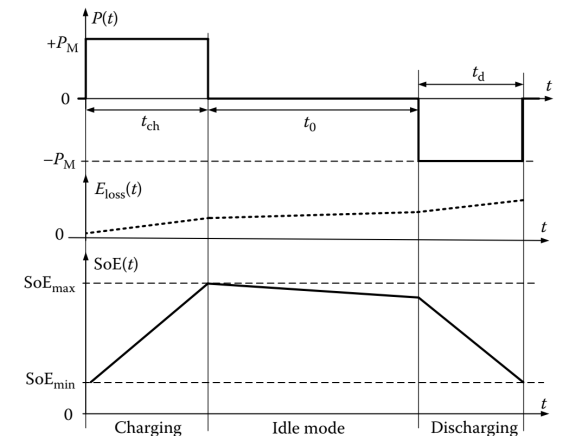
$$\eta_{cn0} = \frac{E_d}{E_{ch}} = \frac{P_M \cdot t_d}{P_M \cdot t_{ch}} = \frac{t_d}{t_{ch}}$$

□ Eficiência global real:

$$\eta_{cnt} = \frac{E_{ch} - E_{loss}}{E_{ch}} = \frac{P_M \cdot t_{ch} - \alpha P_M^2 (t_{ch} + t_d) - \int P_0(\text{SoE}(t)) dt}{P_M \cdot t_{ch}}$$

□ Se considerarmos que $t_d = \eta_{cnt} \cdot t_{ch}$:

$$\eta_{cnt} = \frac{1 - \alpha P_M}{1 + \alpha P_M} - \frac{\int P_0(\text{SoE}(t)) dt}{P_M \cdot t_{ch} (1 + \alpha P_M)}$$



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Eficiência de sistemas de armazenamento de energia

□ Eficiência instantânea de carga:

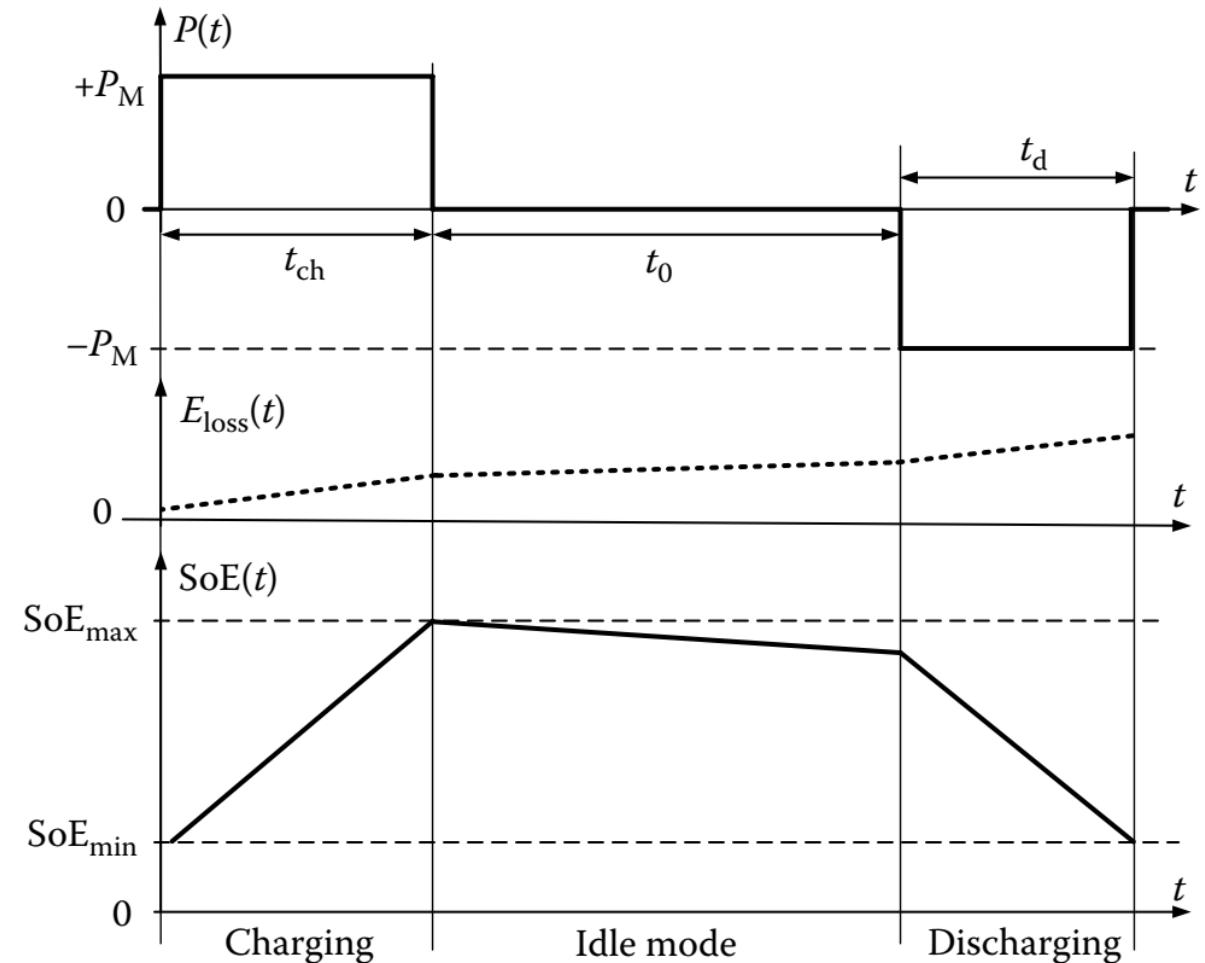
$$\eta_{\text{ch}} = \frac{P_M - \alpha P_M^2}{P_M} = 1 - \alpha P_M$$

□ Eficiência instantânea de descarga:

$$\eta_{\text{d}} = \frac{P_M}{P_M + \alpha P_M^2} = \frac{1}{1 + \alpha P_M}$$

□ Fator de alto descarga:

$$\eta_0 = \frac{\int P_0(\text{SoE}(t)) dt}{P_M t_{\text{ch}}}$$



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Eficiência de sistemas de armazenamento de energia

$$\eta_{\text{cnt}} = \frac{1 - \alpha P_M}{1 + \alpha P_M} \cdot \frac{\int P_0(\text{SoE}(t)) dt}{P_M \cdot t_{\text{ch}} (1 + \alpha P_M)} \Leftrightarrow \eta_{\text{cnt}} = (\eta_{\text{ch}} - \eta_0) \cdot \eta_d$$

❑ Expressão mostra a dependência da eficiência global em função das eficiências instantâneas;

❑ Importante notar um produto de eficiências! 

❑ Variável importante no projeto do sistema de conversão.

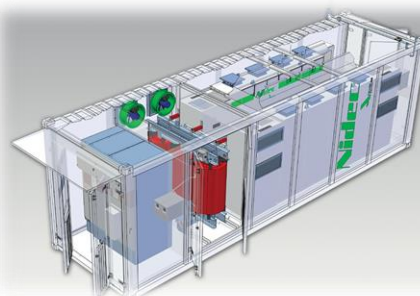
❑ Energia é o “produto final”!



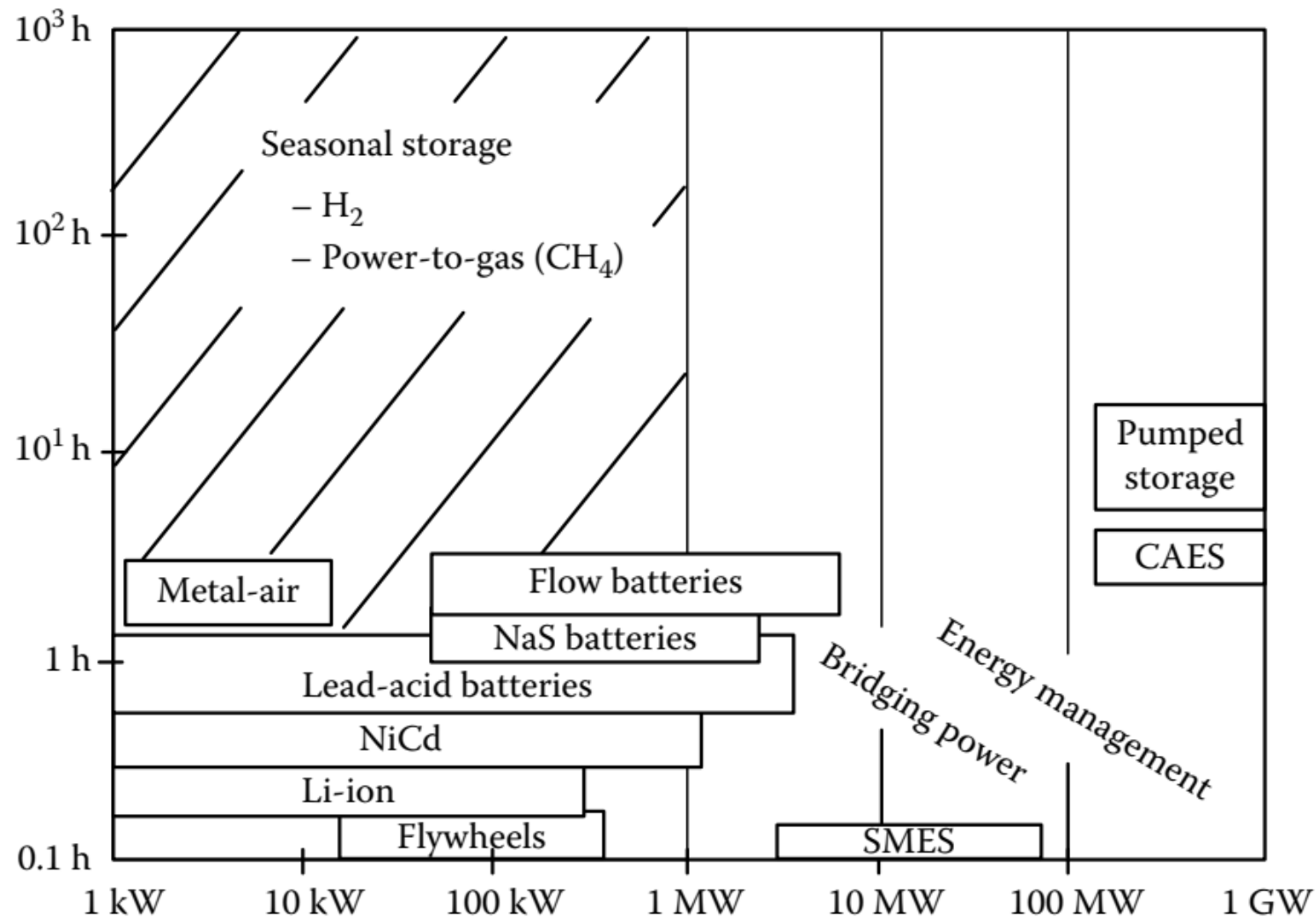


Comparação entre tecnologias

Prof. Allan Fagner Cupertino
afcupertino@ieee.org



Faixas de aplicação - tecnologias

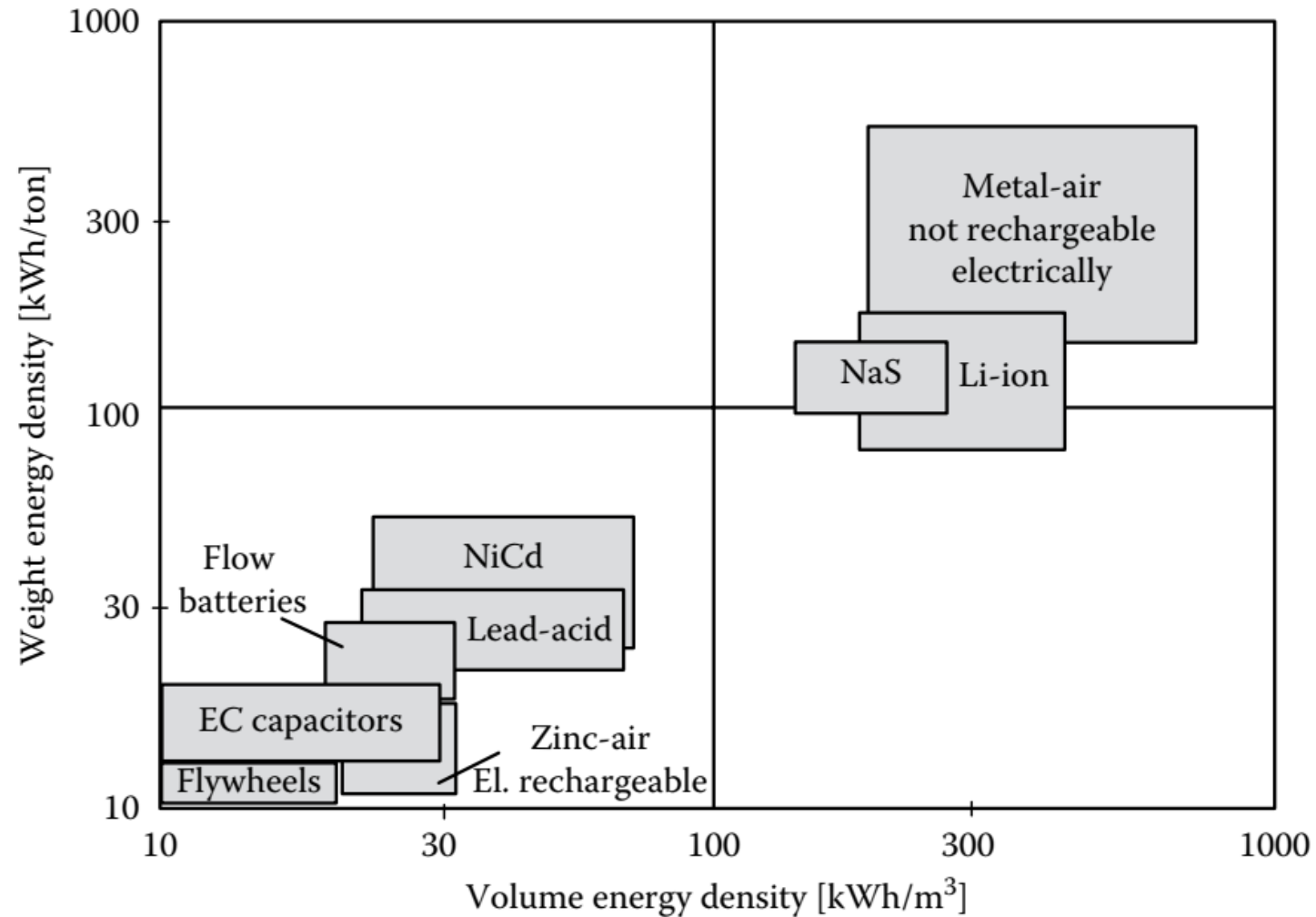


Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Figuras de mérito de sistemas de armazenamento

- ❑ Densidade de energia: $e_v \rightarrow$ Unidade: Wh/dm³ ou kWh/m³;
- ❑ Densidade de potência: $\rho_v \rightarrow$ Unidade: W/dm³ ou kW/m³;
- ❑ Densidade específica de energia: $e_m \rightarrow$ Unidade: Wh/kg ou kWh/ton;
- ❑ Densidade específica de potência: $\rho_m \rightarrow$ Unidade: W/kg ou kW/ton;

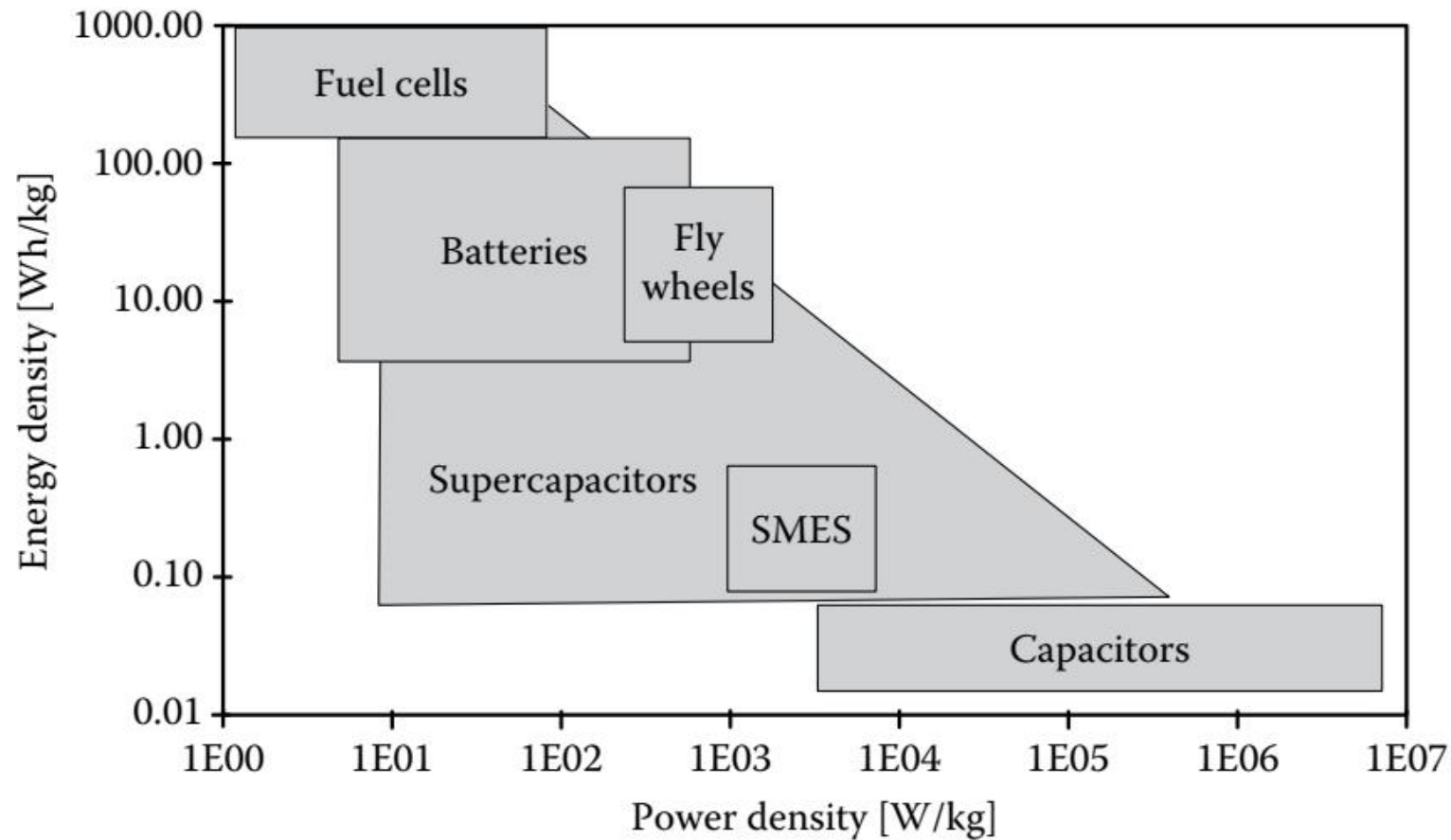
Densidade específica de energia versus densidade de energia



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

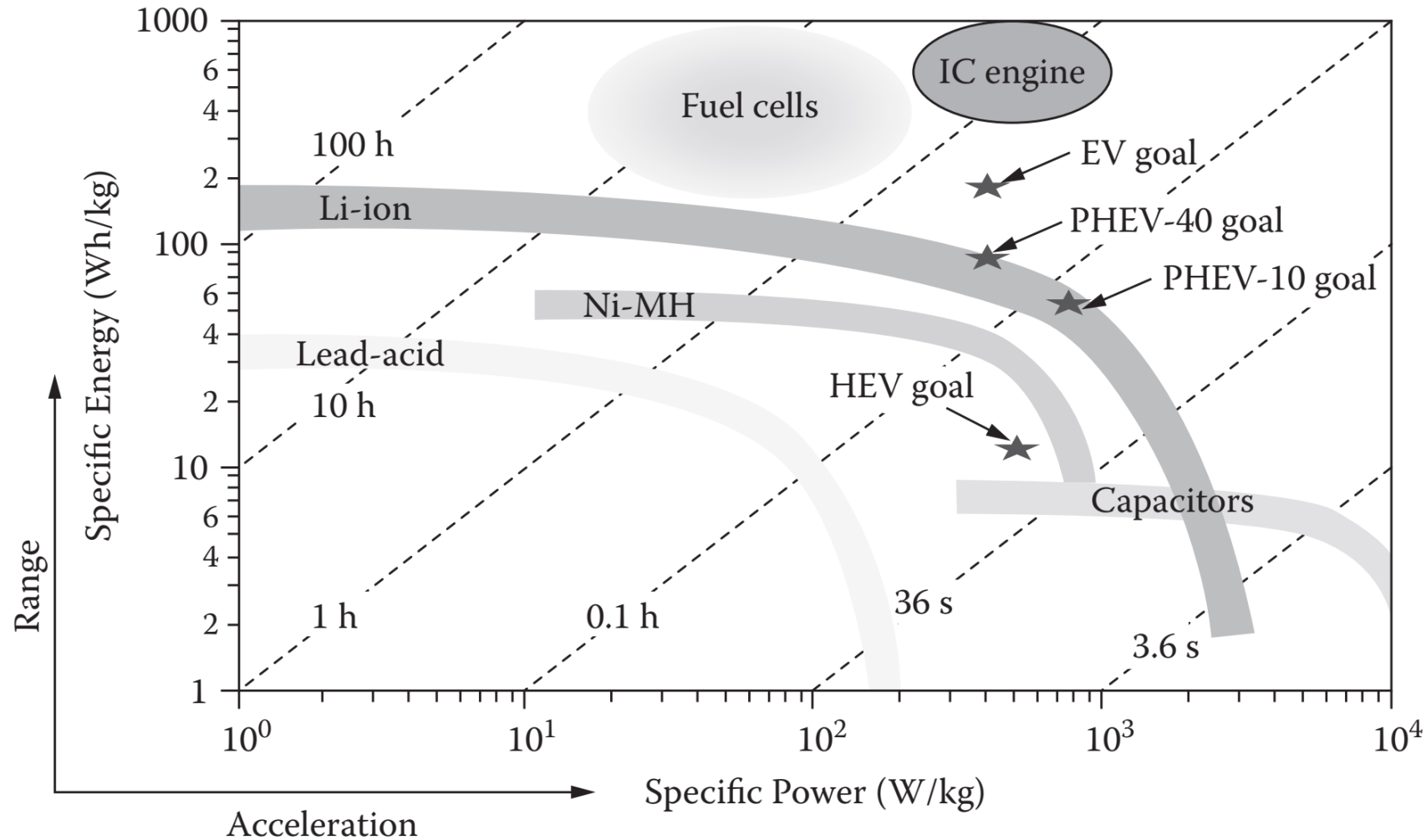
Diagrama de Ragone

❑ Gráfico de Ragone: e_m versus ρ_m com eixos logarítmicos.



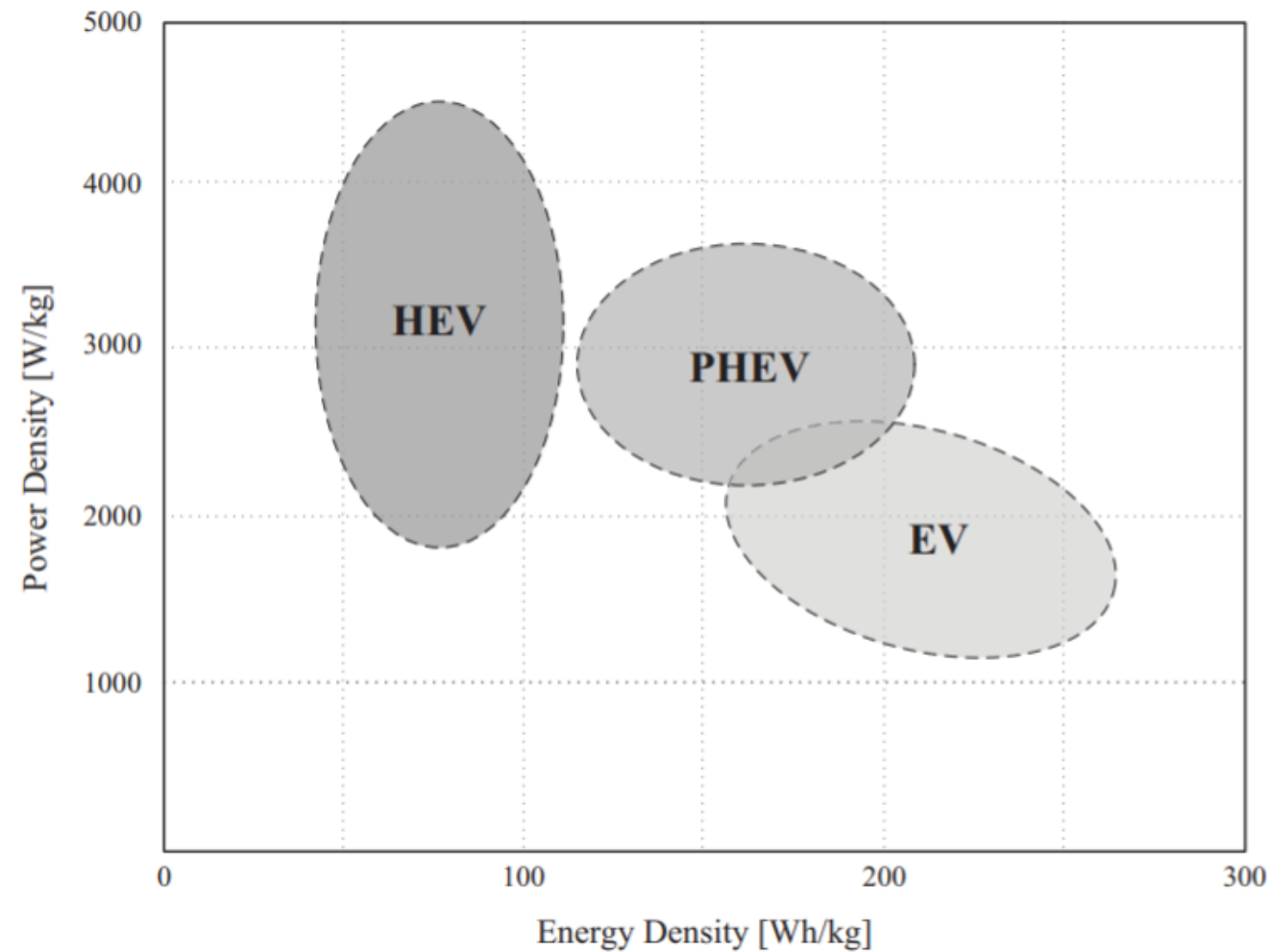
Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Diagrama de Ragone – Tecnologias para veículos elétricos



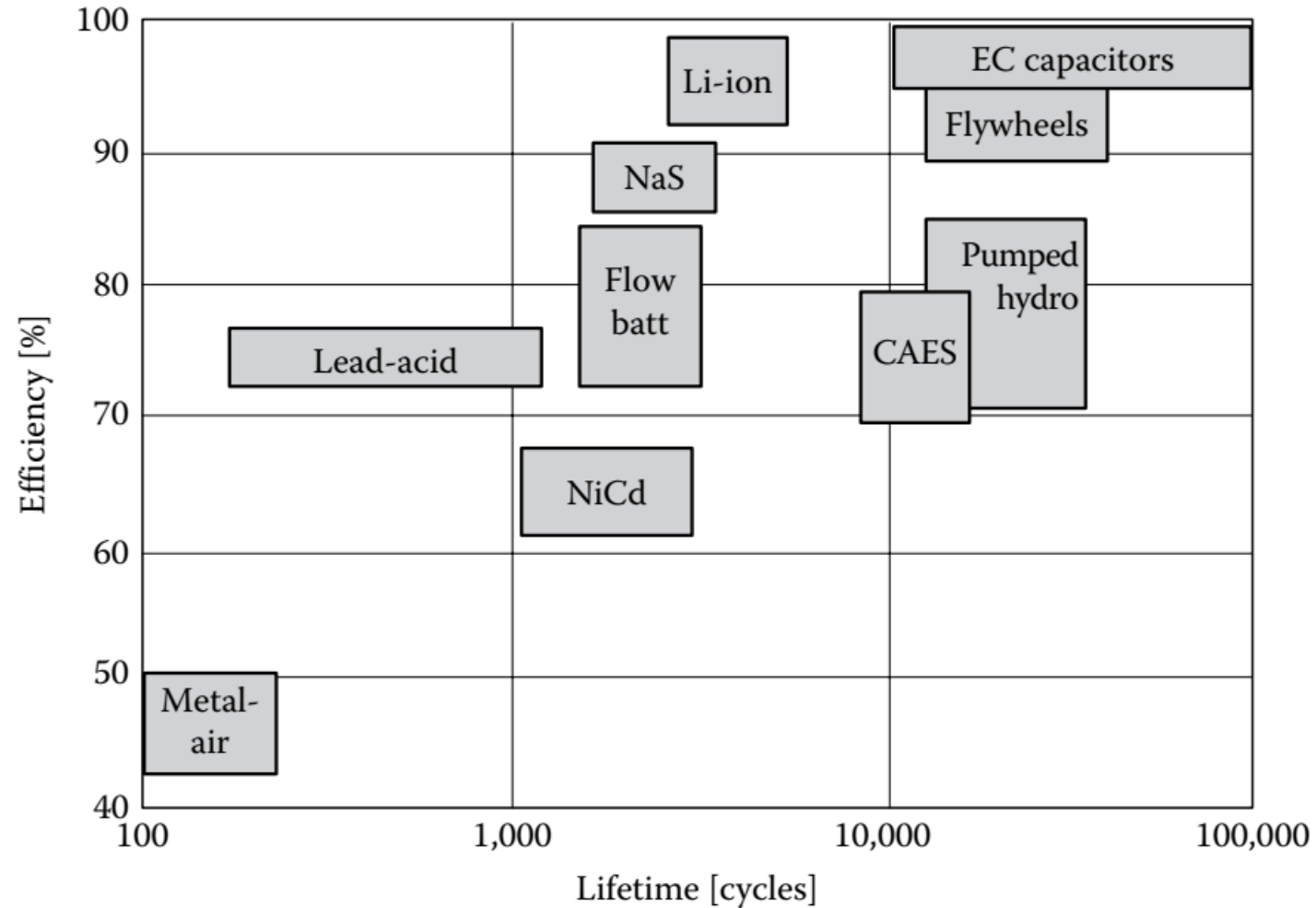
Fonte: F. S. Barnes and J. G. Levine "Large Energy Storage Systems Handbook," CRC Taylor & Francis Group, 2011.

Diagrama de Ragone – tecnologias para veículos elétricos



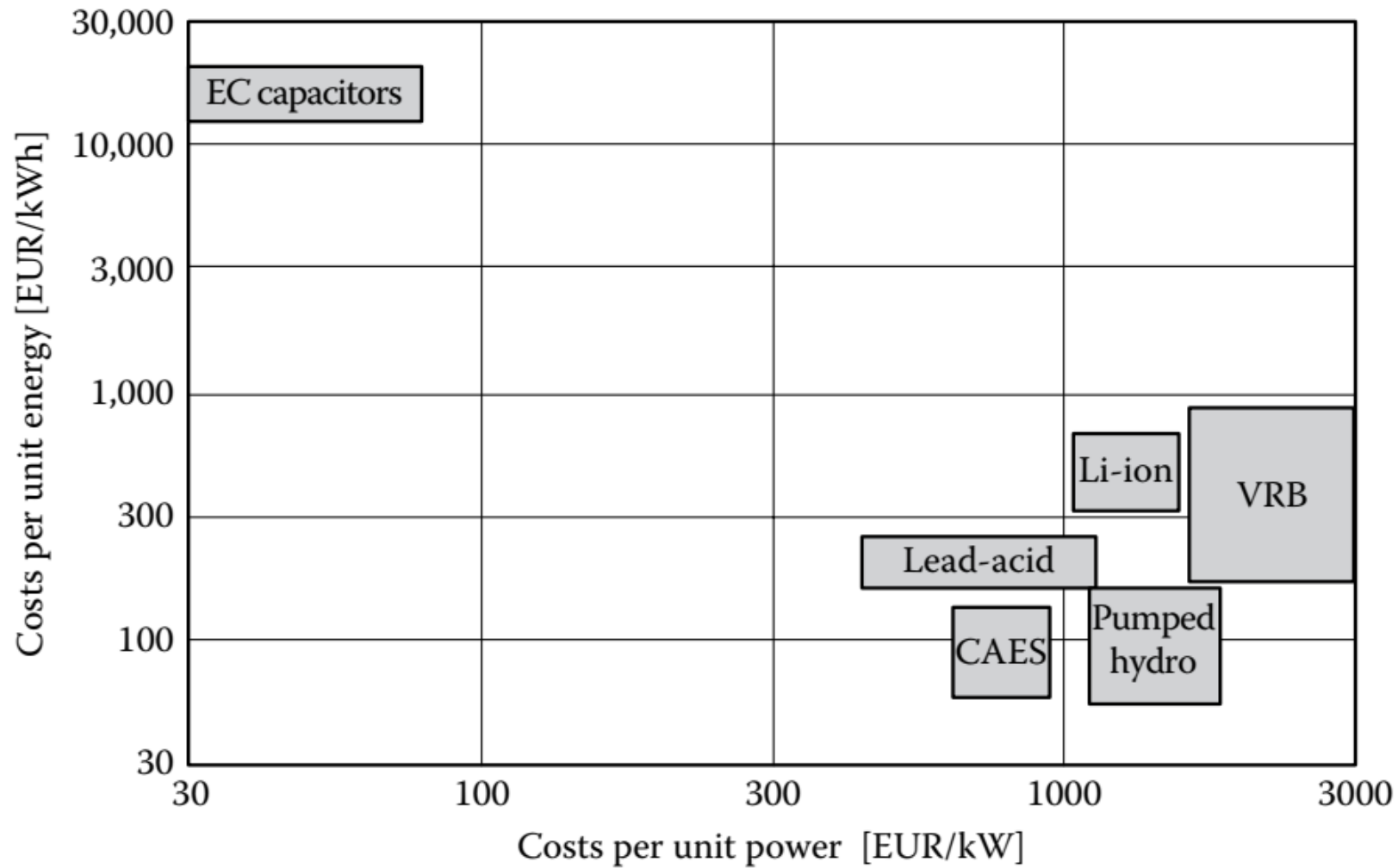
Fonte: A. Stan et. al. "A.-I. Stan et al., "Lithium Ion Battery Chemistries from Renewable Energy Storage to Automotive and Back-up Power Applications – An Overview," IEEE-OPTIM, pp. 713-720, 2014."

Eficiências Típicas versus Número de ciclos



Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Custos Típicos



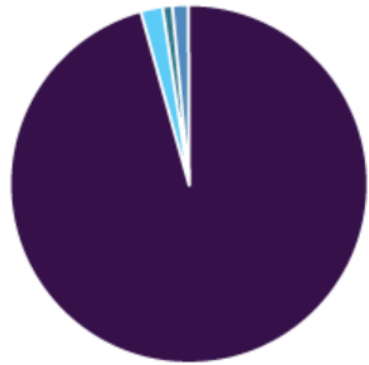
Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Systems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Resumo

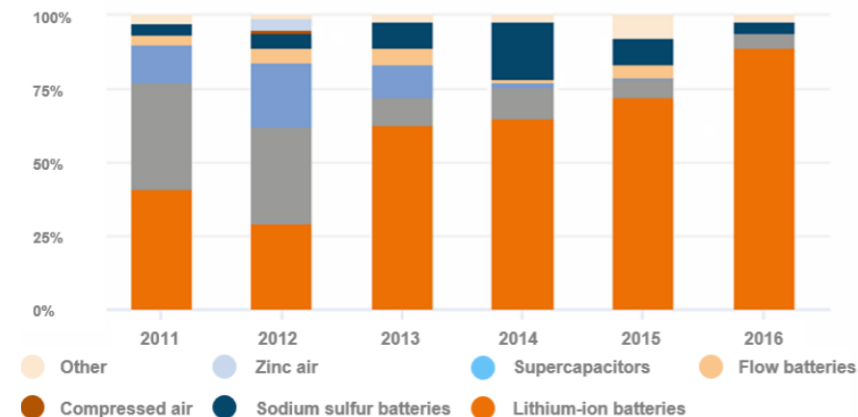
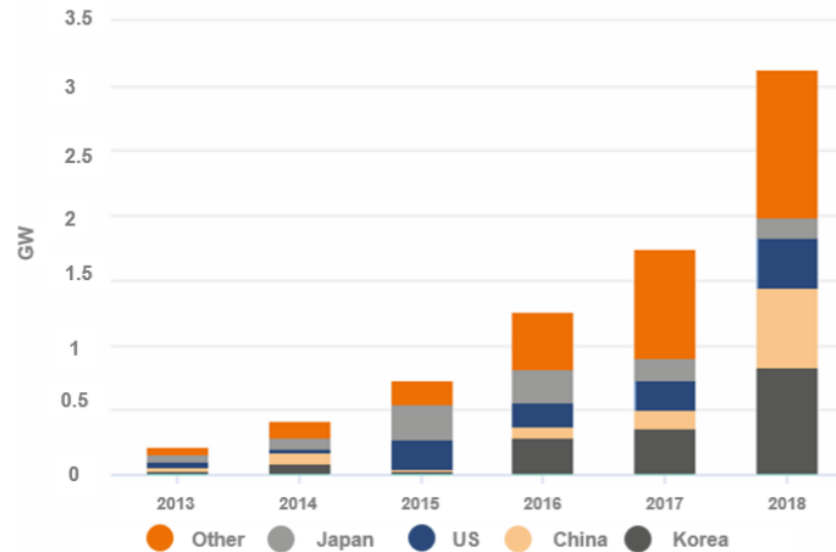
Technologies	Power Rating (MW)	Storage Duration (hours)	Cycling	Self-discharge (%)	Energy Density (Wh/l)	Power Density (W/l)	Efficiency (%)	Response Time
Super Capacitor	0.01-1	ms-min	10,000-100,000	20-40	10-20	40000-120000	80-98	10-20ms
SMES	0.1-1	ms-min	100000	10-15	approx 6	1000-4000	80-95	< 100ms
PHS	100-1000	4-12 hours	30-60 years	approx 0	0.2-2	0.1-0.2	70-85	sec-min
CAES	10-1000	2-30 hours	20-40 years	approx 0	2-6	0.2-0.6	40-75	sec-min
Flywheels	0.001-1	sec-hours	20000 - 100000	1.3-100	20-80	5000	70-95	10-20ms
Lead-acid Battery	0.001-100	1 min-8 hours	6-40 years	0.1-0.3%	50-80	90-700	80-90	<sec
NaS Battery	10-100	1 minute - 8 hours	2500-4400	0.05-20	150-300	120-160	70-90	10-20ms
Li-ion Battery	0.1-100	1 minute - 8 hours	1000-10000	0.1-0.3	200-400	1300-10000	85-98	10-20ms
Flow Battery	1-100	2-10 hours	12000-14000	0.2	20-70	0.5-2	60-85	10-20ms
Hydrogen	0.01-1.000	minutes - weeks	5-30 years	0-4	600	0.2-20	25-45	sec-min
SNG	50-1.000	hours - weeks	30 years	negligible	1800	0.2-2	25-50	sec-min
Molten Salt	1-150	hours	30 years	N/A	70-210	N/S	80-90	min

Fonte: A. Rufer. "Energy Storage: Sytems and Components," CRC Taylor & Francis Group, 2018.

Mercado de Sistemas de Armazenamento - 2019



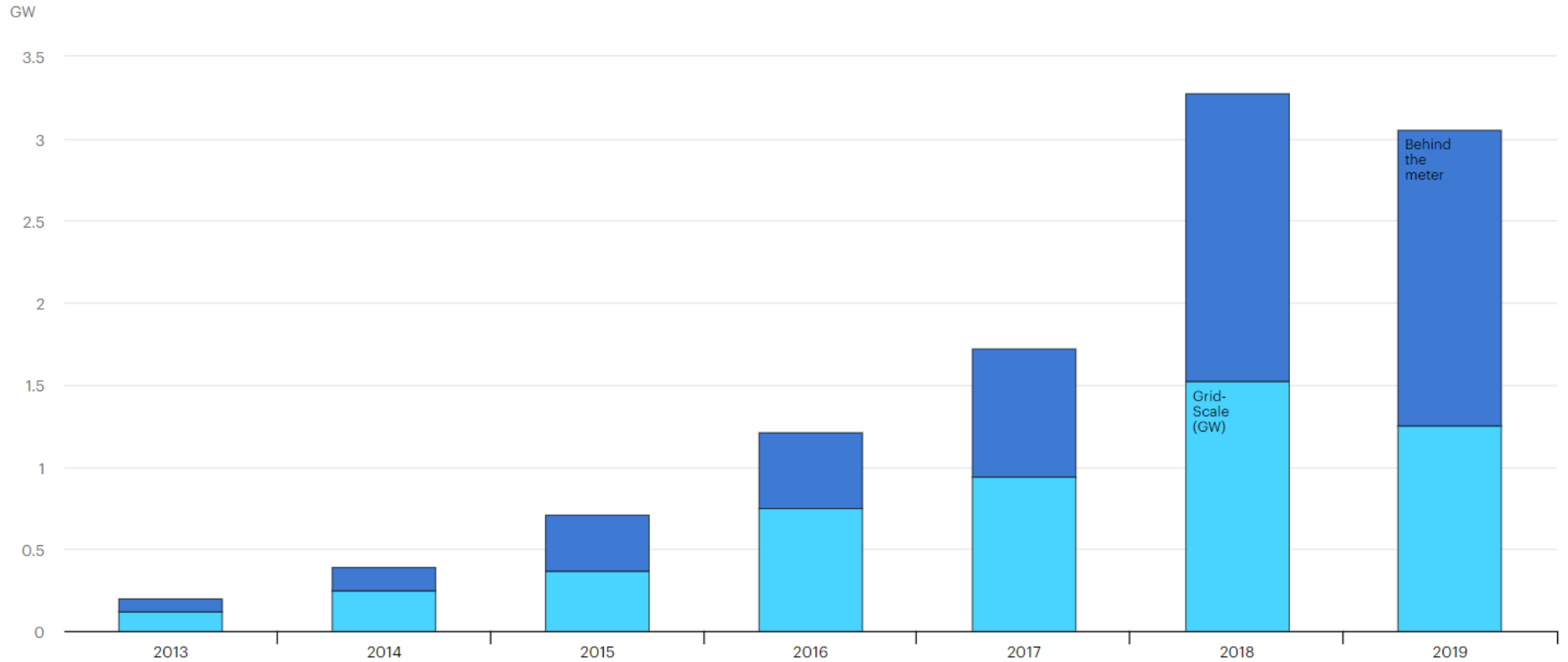
- Pumped Hydro
- Electrochemical
- Electromechanical
- Thermal



Fonte: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/energy-storage-systems-market>.

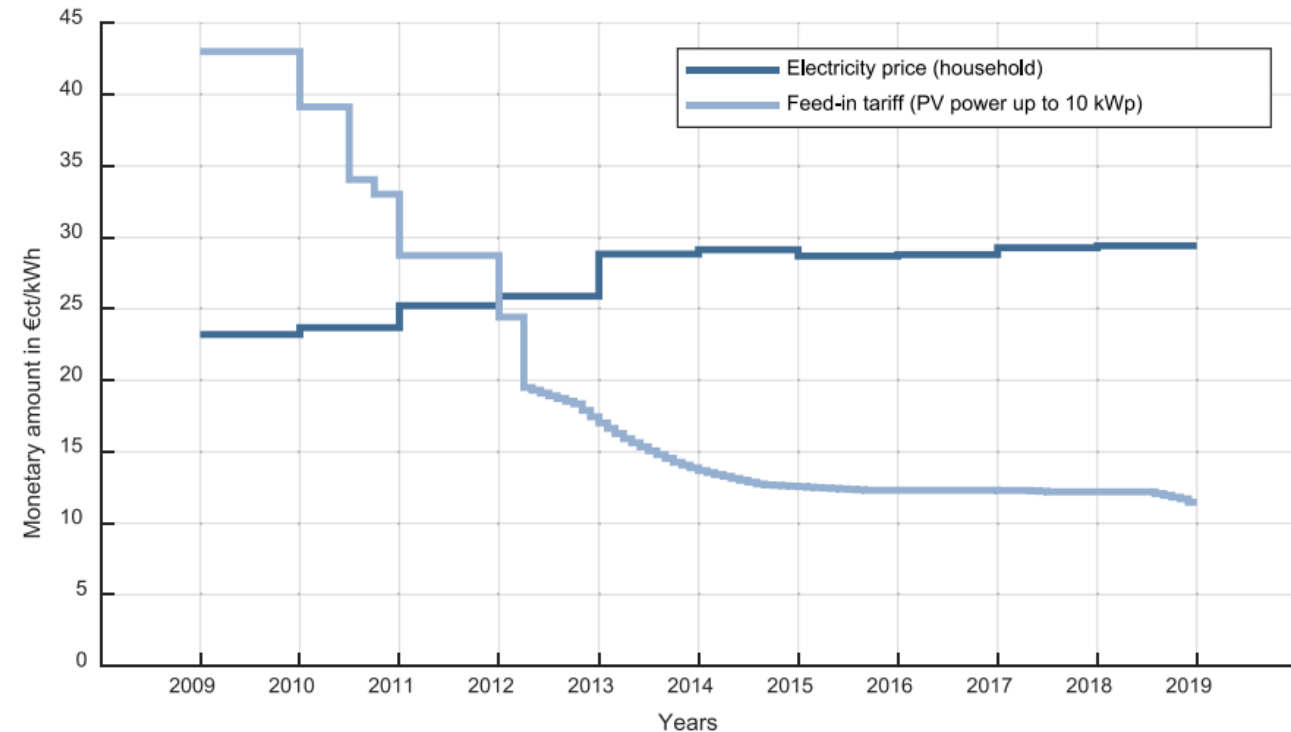
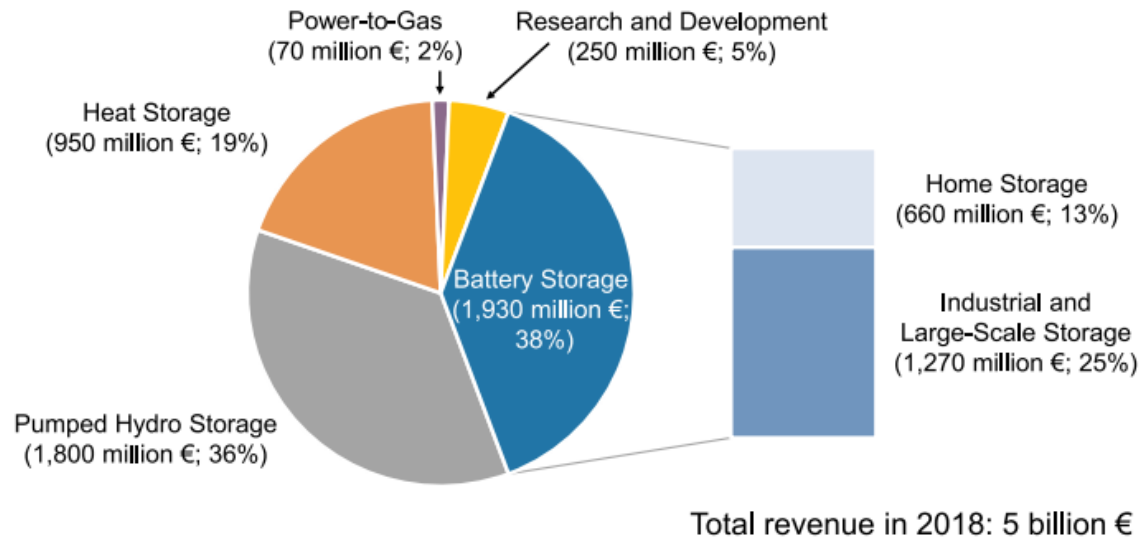
Fonte: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>.

Mercado de Sistemas de Armazenamento



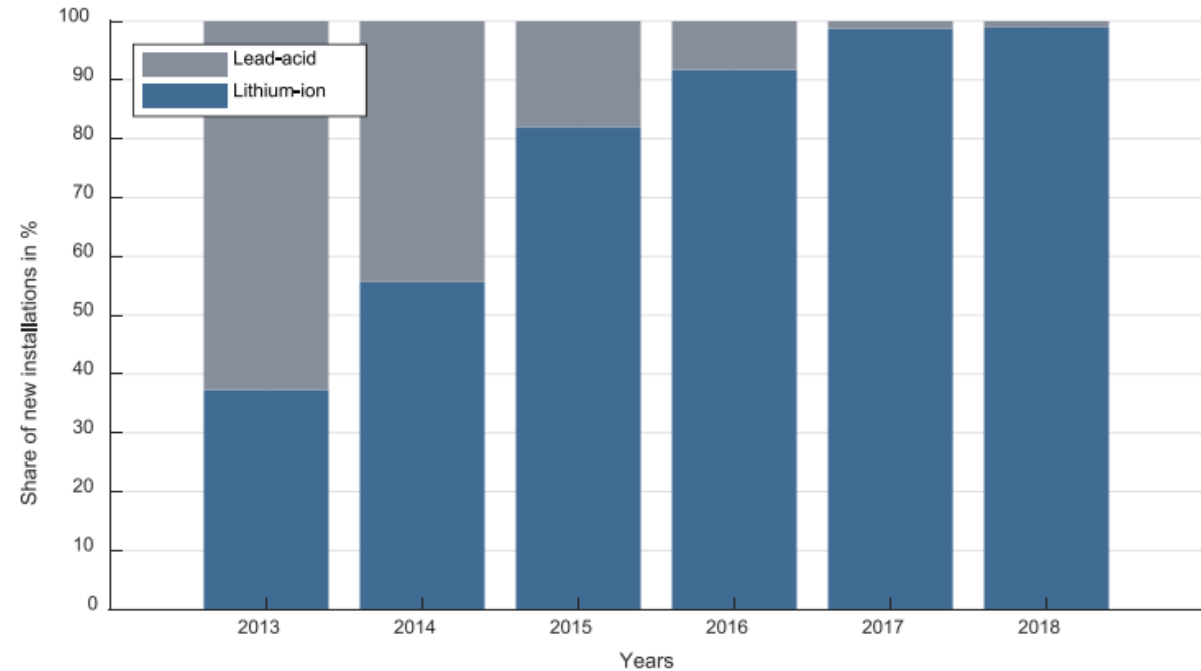
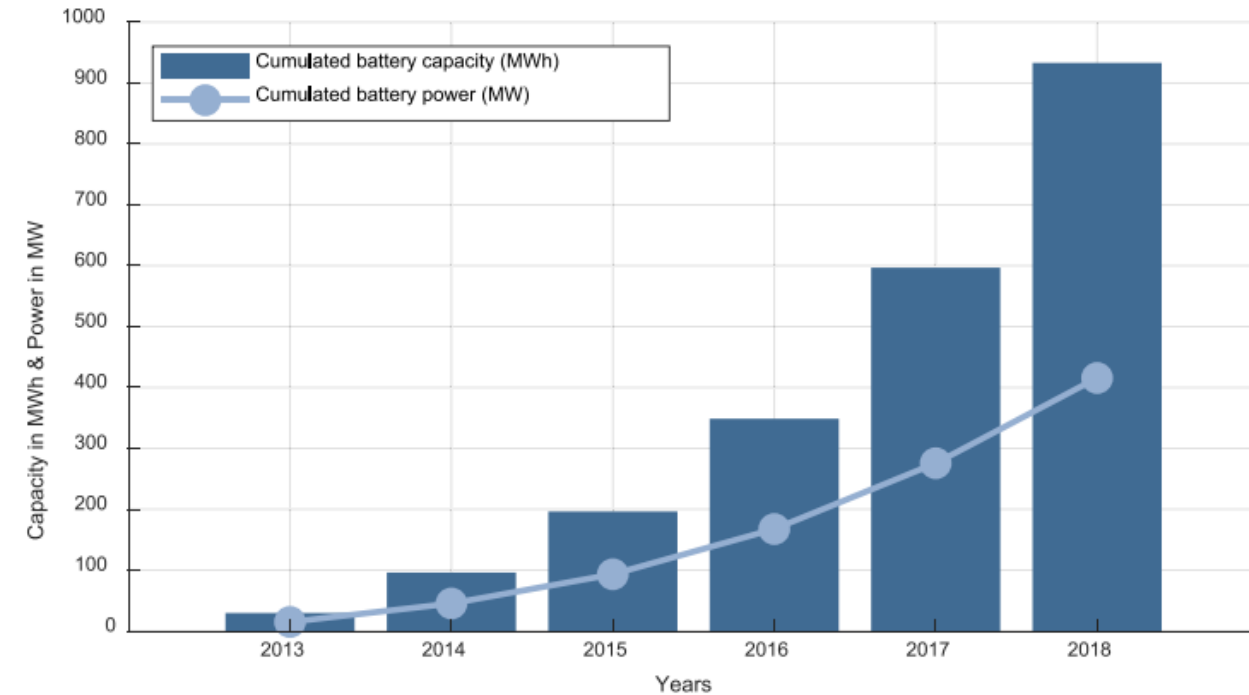
Fonte: <https://www.iea.org/reports/energy-storage>.

Crescimento – mercado Alemão



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

Crescimento – mercado alemão - baterias



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”