



b.tu Brandenburg
University of Technology
Cottbus - Senftenberg
Hydrogen and Storage
Research Center



Seminário: Estado da Arte do Armazenamento de Energia e Inserção de Fontes Renováveis Intermitentes

A experiência da Alemanha no armazenamento eletroquímico

Dra. Cinthya Guerrero
Dipl.-Ing. Perco Krüger
Prof. Dr. Hans Joachim Krautz

19 e 20 de Março, 2018
São Paulo, Brasil



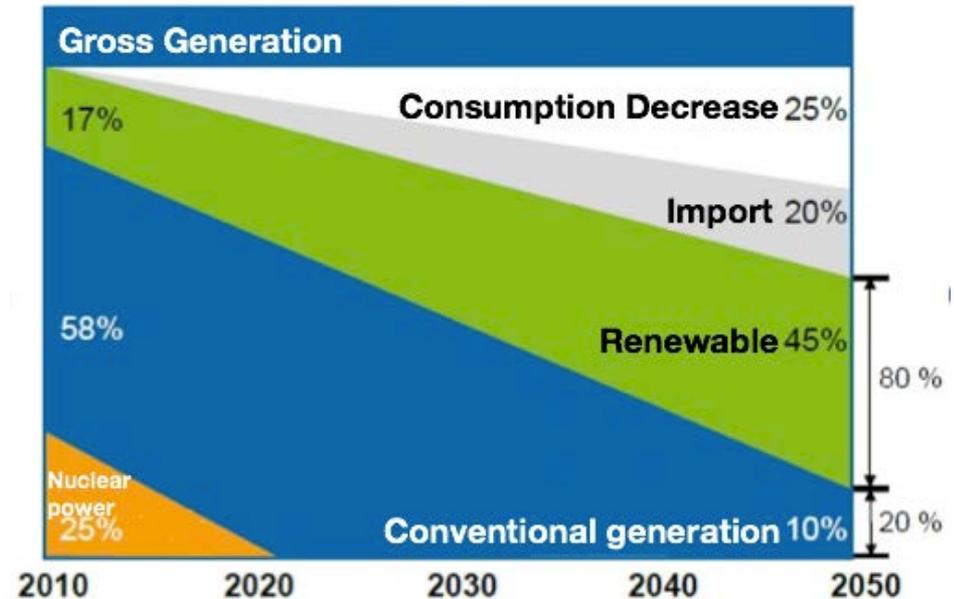
Conteúdo

1. Transição do sistema energético alemão: Objetivos políticos
2. Desenvolvimento tecnológico do armazenamento eletroquímico
3. A experiência da Alemanha no armazenamento eletroquímico
 - a) Baterias de pequena escala com sistemas fotovoltaicos
 - b) Armazenamento estacionário em grande escala
 - c) Veículos elétricos
4. Outros temas de P & D

1. *Transição do sistema energético alemão: Objetivos políticos*

- A política *Energiewende* (2010) reduzirá as emissões de gases de efeito estufa em 80% nos níveis de 1990

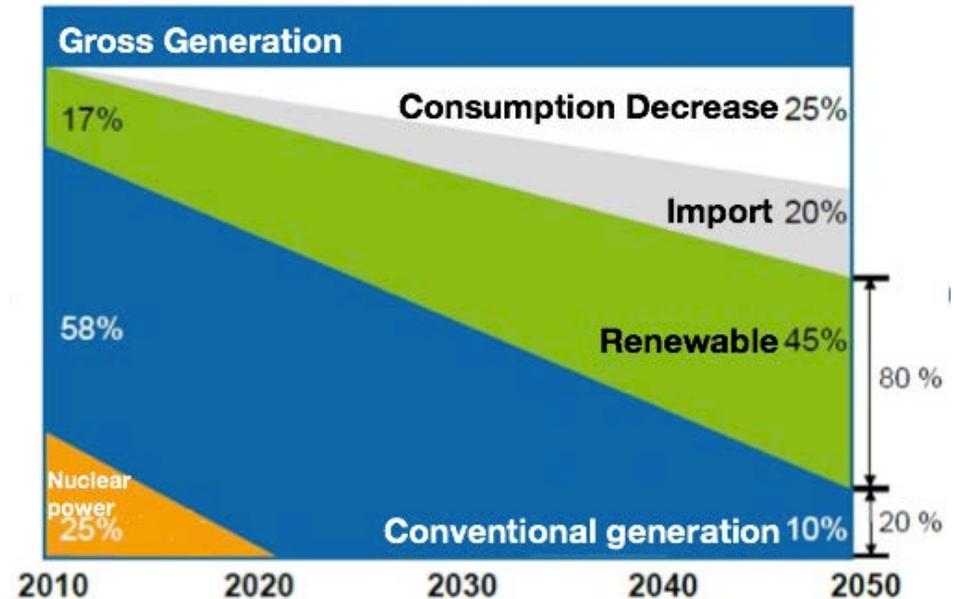
- Fechamento gradual das usinas nucleares até 2022
- Desenvolvimento de fontes de energia renováveis (atualmente ca. 30%. O objetivo é 80% em 2050)
- Modernização das redes de transmissão
- Aumento da eficiência energética



1. *Transição do sistema energético alemão: Objetivos políticos*

- A política *Energiewende* (2010) reduzirá as emissões de gases de efeito estufa em 80% nos níveis de 1990

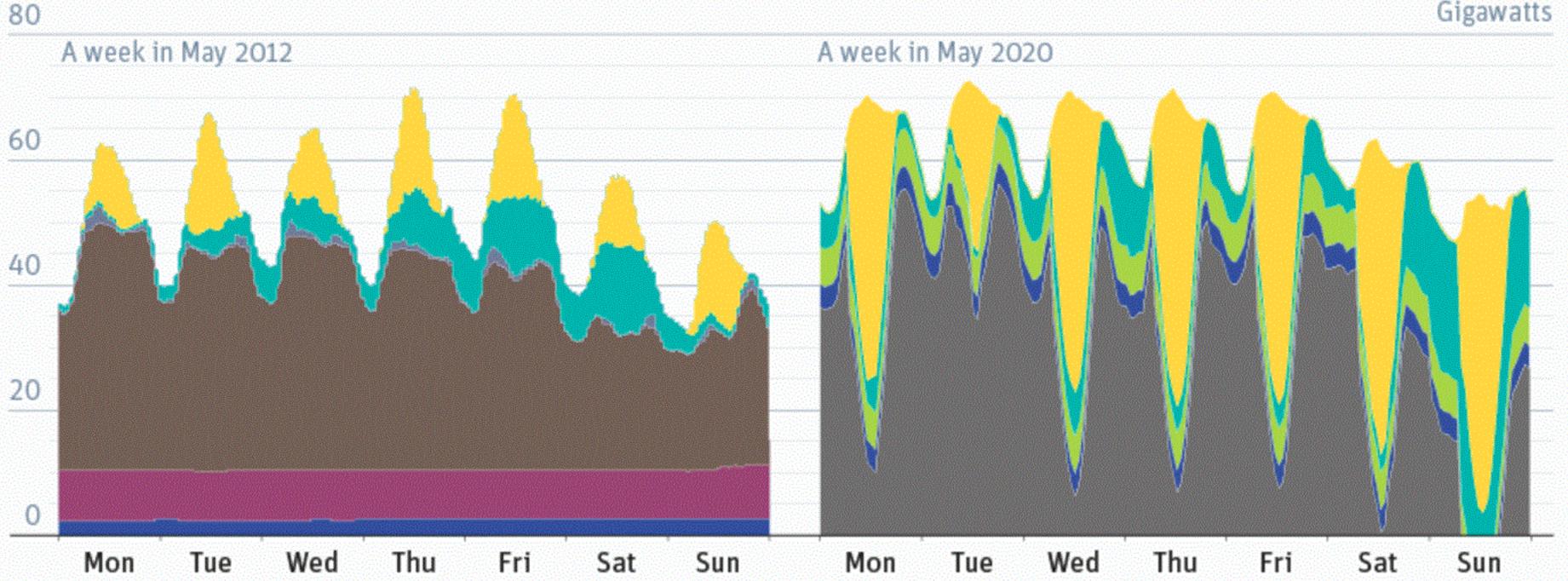
- Fechamento gradual das usinas nucleares até 2022
- Desenvolvimento de fontes de energia renováveis (atualmente ca. 30%. O objetivo é 80% em 2050)
- Modernização das redes de transmissão
- Aumento da eficiência energética



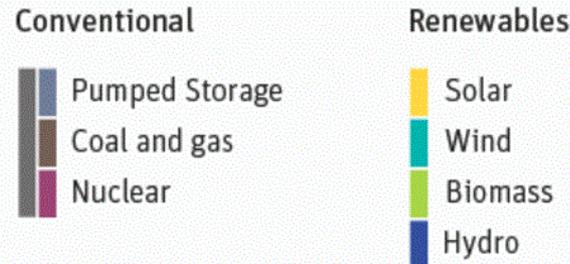
Fonte: EWI/Prognos/GWS Studie

A *Energiewende* da Alemanha traz grandes desafios!

A discrepância entre geração e consumo será um problema em todo o mundo



Demanda estimada de energia durante uma semana em 2012 e 2020 na Alemanha



Fonte: <https://energytransition.org>

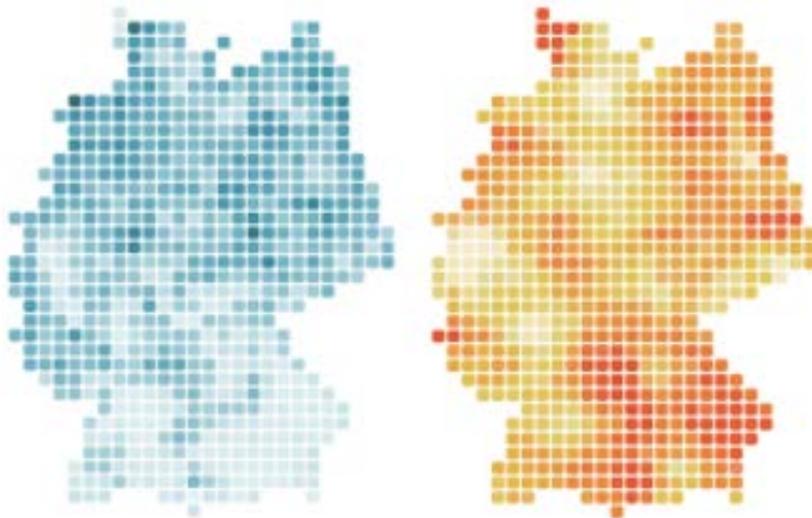
- **A Alemanha já acumulou experiência com a integração de grandes quantidades de energia renovável em suas redes**
- Em 2017, a capacidade instalada das tecnologias fotovoltaicas e eólicas na Alemanha representavam 41,8 e 52,3 GW. Juntas já excedem a demanda total de eletricidade da Alemanha (que oscila de 40 a 80 GW)



Tecnologias eólicas e fotovoltaicas

Source: Strom-report

- A Alemanha já acumulou experiência com a integração de grandes quantidades de energia renovável em suas redes
- Em 2017, a capacidade instalada das tecnologias fotovoltaicas e eólicas na Alemanha representavam 41,8 e 52,3 GW. Juntas já excedem a demanda total de eletricidade da Alemanha (que oscila de 40 a 80 GW)



Algumas partes da infraestrutura elétrica da Alemanha possuem grandes variações na geração

Ainda assim, a Alemanha conseguiu gerenciar os impactos na estabilidade e confiabilidade da rede

Tecnologias eólicas e fotovoltaicas

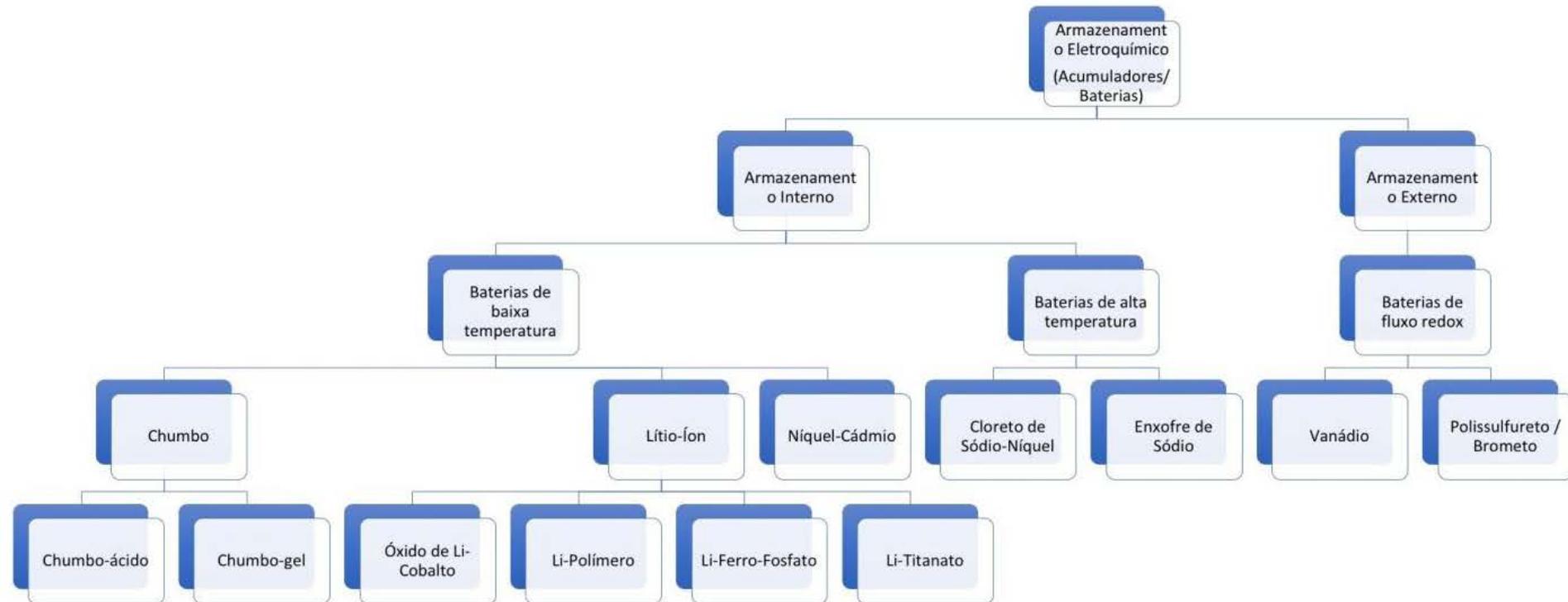
Source: Strom-report



Desafios do sistema energético alemão

- A integração de energias flutuantes na rede elétrica exige **grandes investimentos na rede de transmissão** e soluções de **armazenamento** inovadoras
- As condições geográficas da Alemanha colocam **restrições** significativas sobre a possibilidade de desenvolver novas capacidades de **armazenamento de bombeamento (centrais reversíveis)**.
- Capacidades de armazenamento rápidas são necessárias para equilibrar as **flutuações de curto prazo**. Soluções de armazenamento a longo prazo para deslocar as **cargas através das estações** também são necessárias
- Armazenamento de energia - desde baterias de pequena escala até soluções de “power to gas” em grande escala - desempenharão um papel fundamental na integração de energia renovável e para ajudar a manter a segurança da rede

2. Desenvolvimento tecnológico do armazenamento eletroquímico

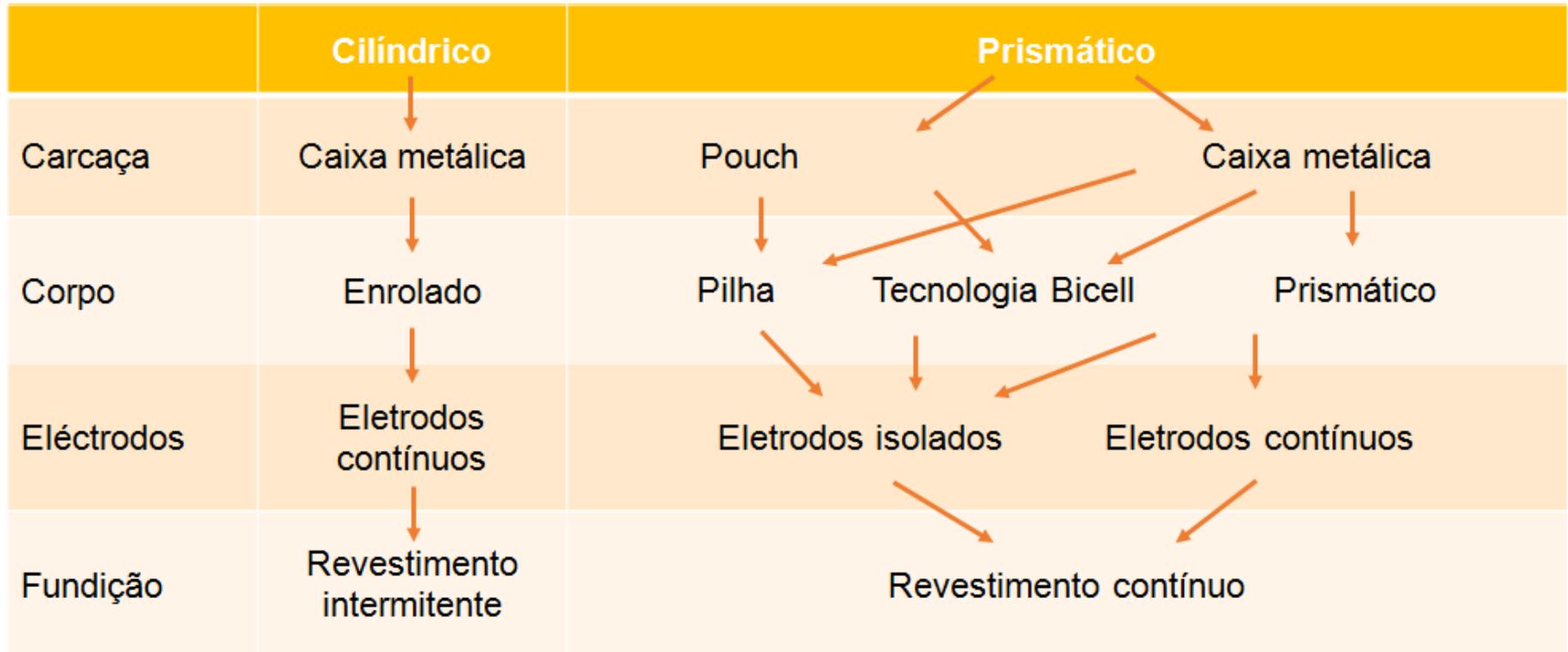


Visão Geral de Acumuladores Eletroquímicos Estacionários

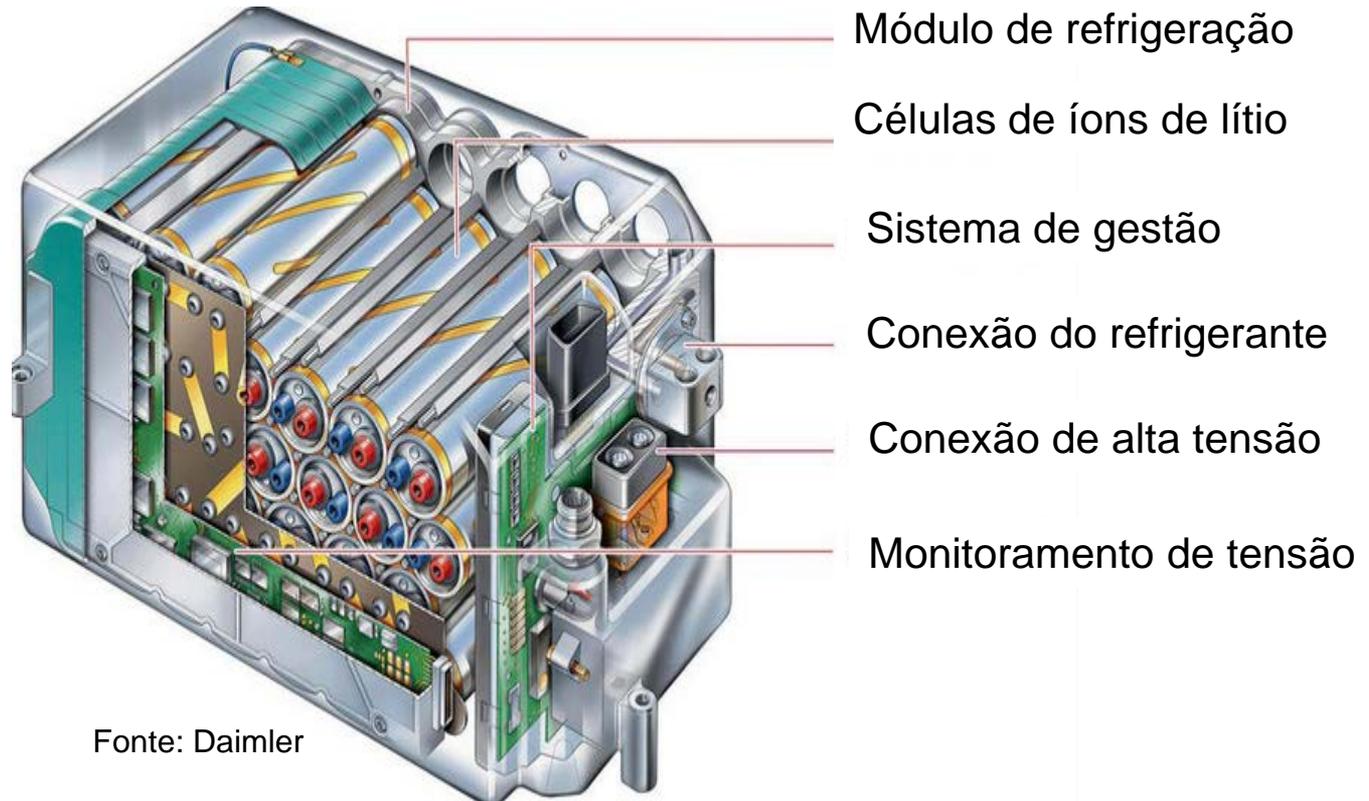
Visão geral dos parâmetros eletroquímicos de armazenamento e conversão

	Chumbo ácido	Li-Ion	NaS	Redox-flow
Eficiência Total [%]	70 - 85	80 - 90	70 - 80	60 - 75
Densidade de Energia [Wh/kg]	25 - 50	70 - 410	ca. 100	60 - 80
Durabilidade Cíclica [-]	500 - 5 000	2 000 - 10 000	5 000 - 10 000	> 10 000
Anos [a]	5 - 10	10 - 20	10 - 20	10 - 15
Descarga Própria	1 - 5 % mês	1 - 5 % mês	10 - 15 % dia	< 1 % mês
Custo de Sistema [€/kW]	500 - 800	1 000 - 1 200	1 000 - 1 200	1 000 - 1 500
Razão de Capacidade/Potência	1 - 2	1 - 1,2	6 - 8	> 10

Células de íons de lítio

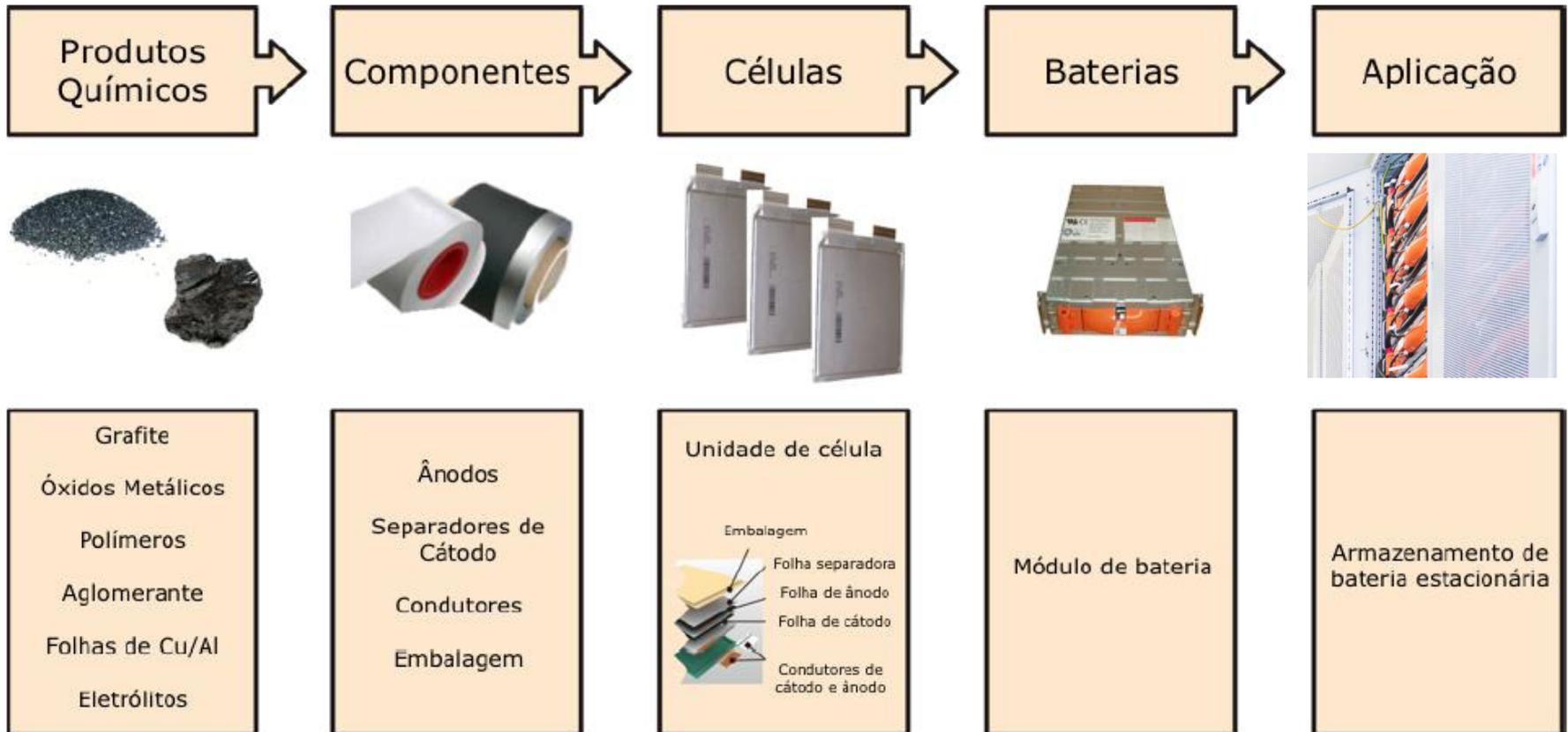


Fonte: Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Vieweg, Heidelberg 2013, ISBN 978-3-642-30652-5



Módulo de baterias de íon de lítio cilíndricas
Daimler

Etapas de fabricação



Fonte: Evonic and Energiequelle GmbH

Formatos Típicos de Células de Íons de Lítio

Célula Cilíndrica



- + Alto rendimento no invólucro do corpo celular
- Revestimento intermitente das bandas de eletrodos
- Maior risco de superaquecimento, (a detecção de pontos críticos demora mais tempo)

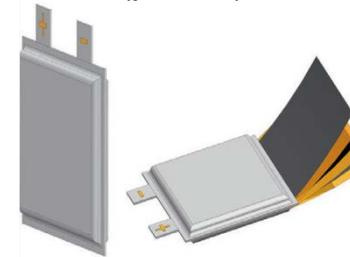
Célula Primária

Carcaça Metálica rígida



- + boa dissipação de calor
- + boa estabilidade
- Requer elaboração de ferramentas de termoformação e corte multi-estágio
- Tecnologia complexa, como soldagem a laser ou soldagem ultra-sônica requerida
- Reação feroz em caso de erro do que na célula de bolsa

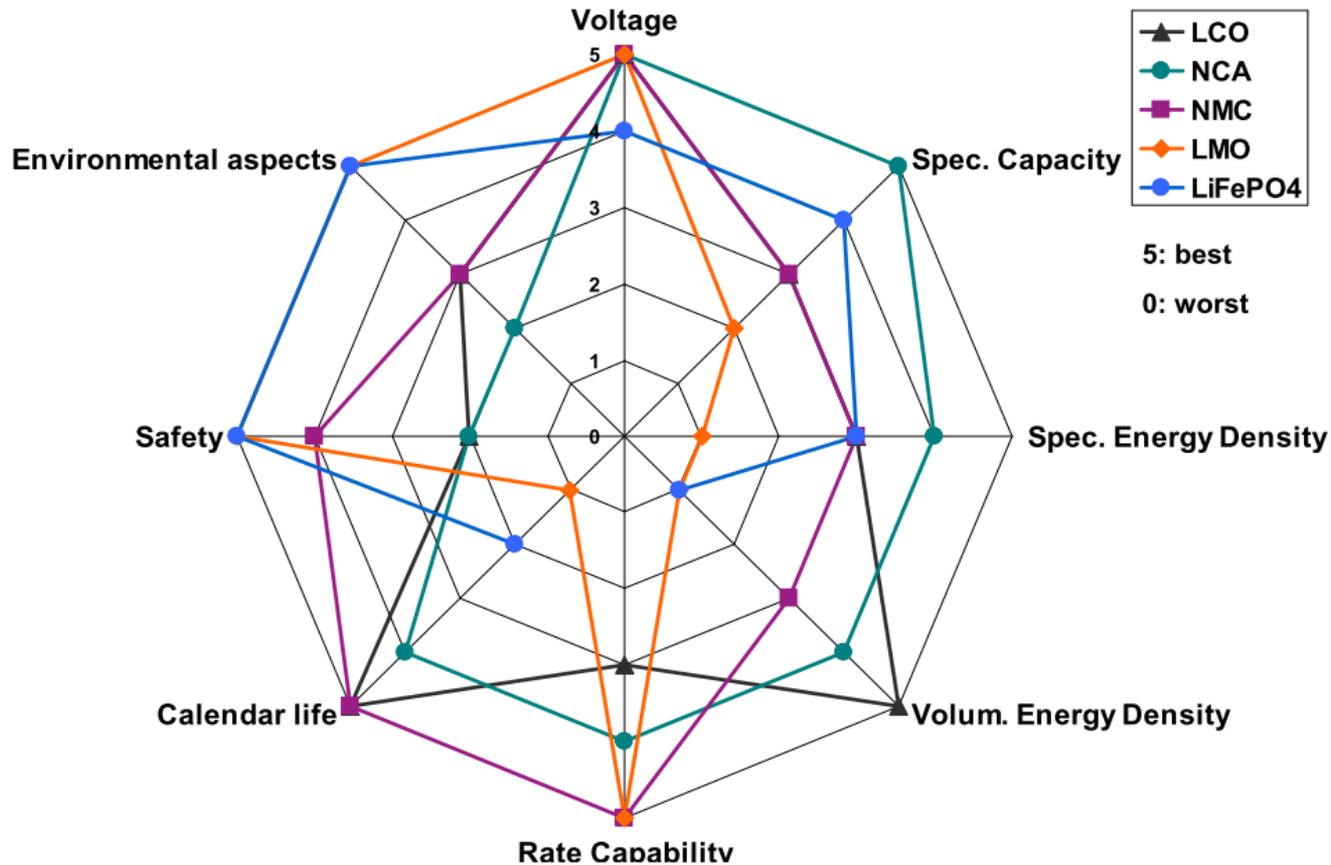
Célula de Bolsa (pouch)



- + boa dissipação de calor
- + produção simples
- + Barata
- + Possíveis correções de forma leve
- Difícil manejo para processamento posterior

Baterias de íons de lítio

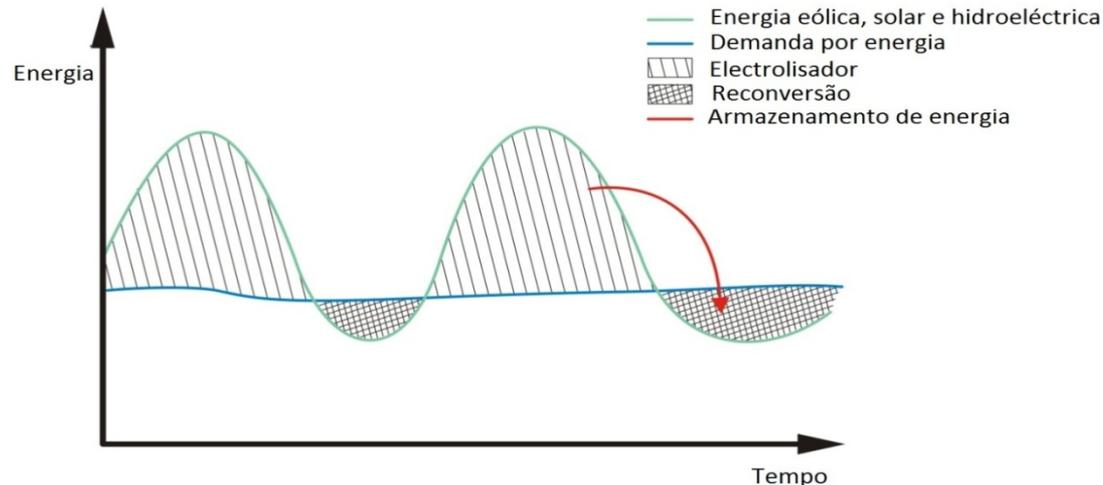
Comparação de diferentes tipos de materiais do cátodo



Fonte: Evonic Industries

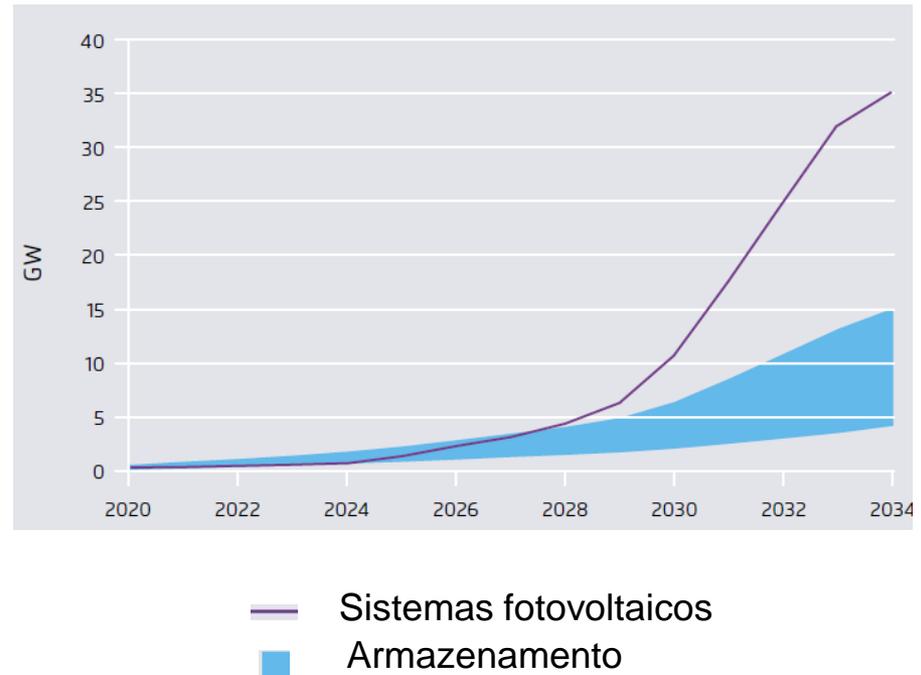
3. *A experiência da Alemanha no armazenamento eletroquímico*

- Armazenamento em baterias de pequena escala (em conjunto com sistemas fotovoltaicos)
- Armazenamento estacionário em grande escala, especialmente para a estabilização da tensão e a frequência nas redes elétricas
- Veículos elétricos



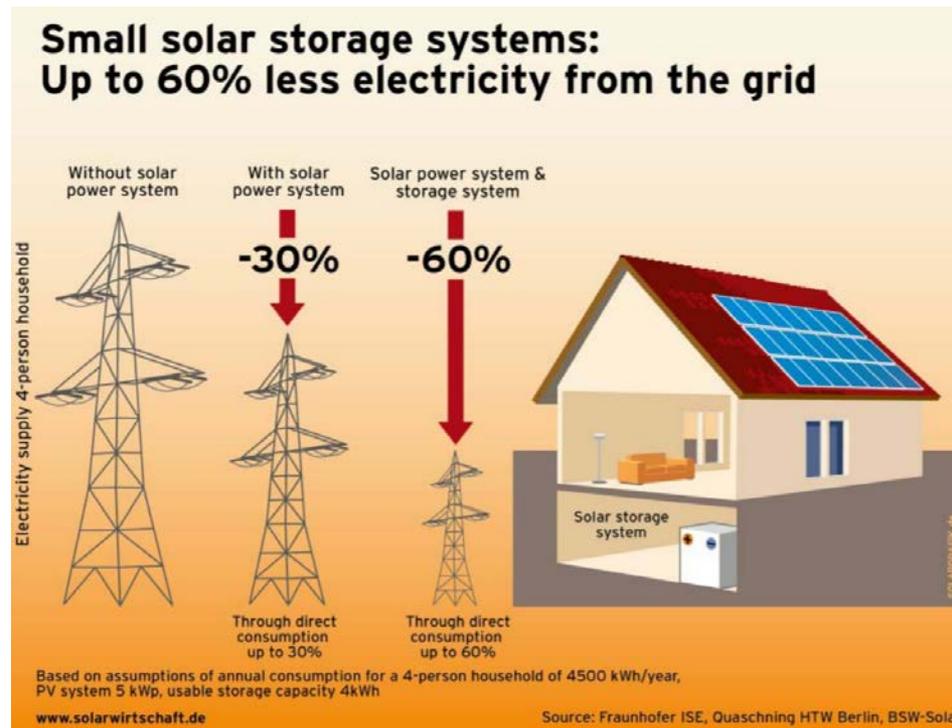
3.a. Baterias de pequena escala com sistemas fotovoltaicos

- Rápida implantação de sistemas solares no telhado: 1,4 milhões de usinas de energia em 2014
- Mais de 98% conectadas a redes descentralizadas de baixa tensão na proximidade de consumidores
- Cerca de 20% das novas instalações fotovoltaicas agora incluem baterias. O armazenamento de bateria está sendo oferecido como um retrofit (grande número de marcas no mercado)



Fonte: Agora: Stromspeicher in der Energiewende, 2014

- Programa de empréstimo de juros baixos (2013-2018) para apoiar os proprietários de PV que desejam adicionar armazenamento de até 30kW ao seu sistema
- Existem cerca de 25 mil instalações domésticas na Alemanha (capacidade total de 160 MWh) (World Energy Council, 2016). Poderá aumentar para 600 MWh até 2020



Fonte: www.solarwirtschaft.de

A eletricidade gerada e consumida localmente não precisa ser transportada em redes elétricas públicas

- **Distribuição mais equilibrada da energia solar alimentada nas redes**
Ajuda a evitar picos na produção de energia (reduzindo os riscos), alivia as redes de distribuição já parcialmente sobrecarregadas
- **Reduz a necessidade de novas linhas de transmissão de energia (evitando custos adicionais)**
A expansão das redes de transmissão está progredindo de forma hesitante devido ao baixo nível de aceitação entre a população, especialmente em áreas densamente povoadas.

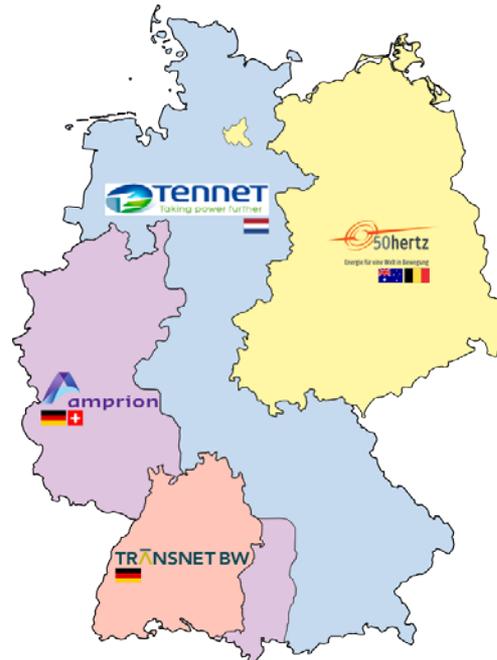


Fonte: Tesla Power Wall

3.b. *Armazenamento estacionário em grande escala*

- O fechamento de plantas de grande capacidade tornou-se o motor da implantação de sistemas de armazenamento de energia em grande escala
- Até 2040, cerca de 40 terawatt-hora (TWh) de eletricidade terá que ser armazenado regularmente, em alguns casos ao longo de vários meses

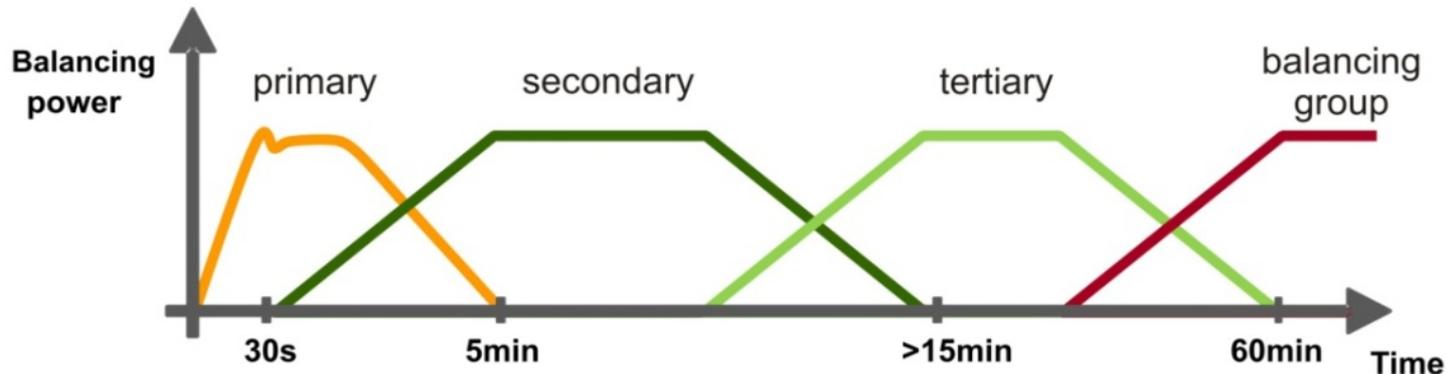
Operadores de sistemas de transmissão



Fonte: McLloyd, Regelzonen mit Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland

Até agora, a necessidade da reserva primária tem sido fornecida principalmente por usinas convencionais. Atualmente, instalações de baterias de grande porte para fornecer energia de reserva estão sendo implementadas. Em segundos, elas podem equilibrar as flutuações de frequência na fonte de energia alimentando energia na rede quando a frequência é muito baixa ou armazenando energia quando a frequência é muito alta.

System services



Fonte: UCTE OH

Armazenamento em baterias em grande escala na Alemanha

Braderup (2014)

Bosch (Hybrid storage)

Li-Ion: 2 MW / 2,4 MWh

VRB: 0,3 MW / 1,2 MWh

Hamburg (2015)

Bosch (2nd Life)

Li-Ion: 2 MW / 2 MWh

Dörverden (2016)

ads-tec

Li-Ion: 3 MW / ca. 4 MWh

Herne, Lünen, Duisburg,
Bexbach, Fenne, Weihe
(2016 / 2017)

Steag

Li-Ion: 6 x 15 MW

Aachen (2016)

Battery storage power station

„M5BAT“ (RWTH Aachen)

Hybrid battery storage

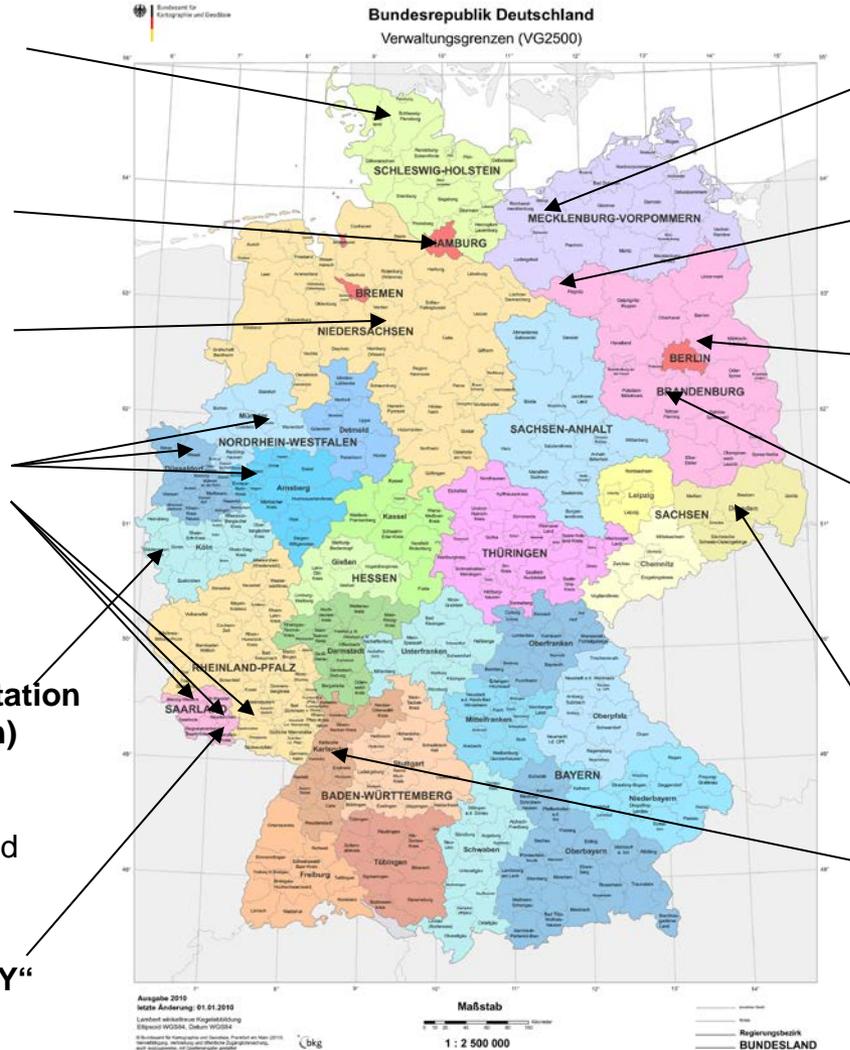
5 MW / 5 MWh

Different Li-Ion- & lead-acid
battery technologies

Völklingen-Fenne (2013)

Research project „LESSY“

Li-Ion: 1 MW / 0,67 MWh



Schwerin (2014)

WEMAG

Li-Ion: 5 MW / 5 MWh

Alt Daber (2014)

Belectric (RWE)

Lead: 1,3 MW / 2 MWh

Neuhardenberg (2016)

Upside

Li-Ion: 5 MW / 5 MWh

Feldheim (2015)

EnergieSource

**Leuchtturmprojekt „SDL Batt“
(Energiequelle, BTU Cottbus)**

Li-Ion: 10 MW / 10,7 MWh

Dresden (2015)

DREWAG

Li-Ion: 2 MW / 2,7 MWh

Pfinztal (2017)

**Large project „RedoxWind“
(Fraunhofer ICT)**

VRB: 2 MW / 20 MWh

Armazenamento em baterias em grande escala no mundo

Nr.	Nome Localização	Tipo de Bateria	MW
1.	Sendai Substation Pilot Project Localização: Sendai, Miyagiken, Japão	Bateria de íons de lítio	40
2.	Duke Energy's Notrees Wind Storage Demonstration Project Localização: Goldsmith, Texas, Estados Unidos	Bateria avançada de chumbo ácido	36
3.	Rokkasho Village Wind Farm Localização: Rokkasho, Japão	Bateria de sódio e enxofre	34
4.	Laurel Mountain Localização: Elkins, West Virginia, Estados Unidos	Bateria de íons de lítio	32
5.	Battery Energy Storage System (BESS) Localização: Fairbanks, Alaska, Estados Unidos	Bateria de níquel-cádmio	27
6.	Primus Power Corporation: Wind Firming Energy Farm Localização: Modesto, California, Estados Unidos	Zinco / cloreto Bateria Redox Flow	25
7.	GM & ABB Volt Battery Localização: Detroit, Michigan, Estados Unidos	Bateria de íons de lítio	25
8.	Angamos Localização: Mejillones, Chile	Bateria de íons de lítio	20
9.	Los Andes Li-Ion Battery System Localização: Copiapo, Chile	Bateria de íons de lítio	12
10.	Auwahi Wind Farm Battery Storage System Localização: Kula, Hawaii	Bateria de íons de lítio	11
11.	Kaheawa Wind Power Project II Localização: Maalaea, Hawaii	Bateria avançada de chumbo ácido	10
12.	WEICAN Durathon Battery Project Localização: Prince Edward Island, Canada	Bateria de sódio / níquel / cloreto	10

Sistema de armazenamento de energia solar em baterias de chumbo ácido com capacidade instalada de 1.3 MW (Belectric)

A Belectric instalou um sistema de armazenamento de energia em uma usina de energia solar de grande porte na Alemanha, na planta solar Alt Daber. A unidade de buffer de energia da Belectric em Alt Daber foi a primeira instalação desse tipo na Europa para atender o controle primário.



Fonte: Belectric

Baterias de grande escala de Steag com capacidade de 90 MW

- Em 2016/2017, o grupo de energia Steag encomendou seis sistemas de armazenamento de bateria com uma potência total de 90 MW: Lünen, Herne e Duisburg-Walsum na Renânia do Norte-Vestefália, bem como Bexbach, Völklingen-Fenne e Weiher no Saarland.
- Steag quer usar as baterias para substituir o controle das usinas de energia convencionais e fornecer energia de controle mais flexível
- A pré-qualificação para ser parte do sistema de controle primário foi bem-sucedida em 2017. O financiamento do projeto foi de 100 milhões de euros



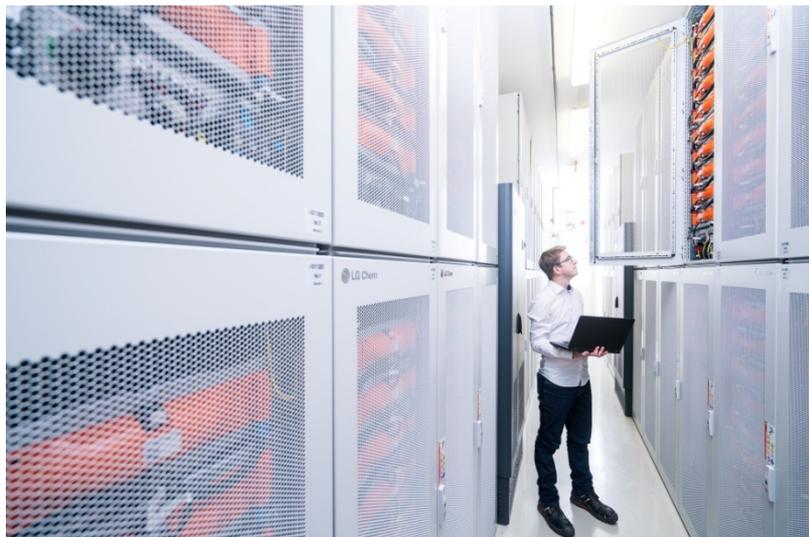
Fonte: Steag

Baterias de Energiequelle em Feldheim com capacidade de 10 MW

- Em Brandemburgo, na aldeia autônoma de Feldheim, uma grande unidade de armazenamento em baterias foi posto em operação.
- O armazenamento de bateria de ions de litio foi pré-qualificado com sucesso para fornecer energia de controle primário em 2016.
- Projetada para fornecer serviços de regulação de frequência e ajudar a integrar mais energia eólica na rede.



Fonte: Laboratório da BTU Cottbus, parceiro do projeto



Fonte: Energiequelle

Armazenamento em baterias em Chemnitz 10 MW / 16 MWh

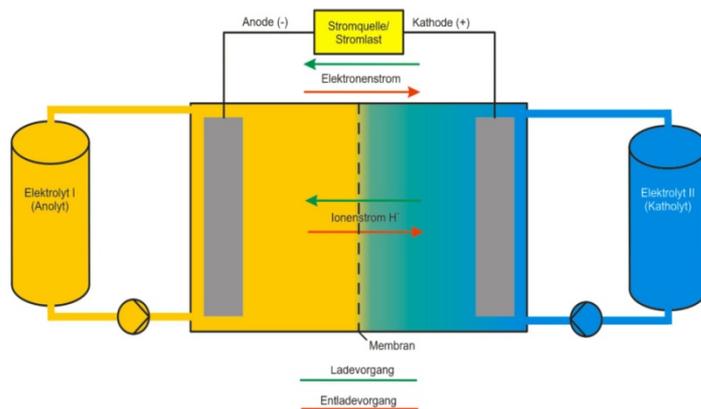
- Em Chemnitz, uma instalação de armazenamento de 16 MWh foi construída pela empresa "eins Energie in Sachsen".
- A Belectric GmbH foi contratada para a construção do armazenamento.
- O sistema de armazenamento foi pré-qualificado pelos operadores do sistema de transmissão para fornecer energia de controle primário (PRL). O sistema de armazenamento consiste em módulos de bateria da Samsung SDI com tecnologia de íon de lítio (capacidade total: 15,9 megawatt-hora), cinco transformadores cada um com potência de 3 MVA (megavolt ampere) e cinco inversores com 3,28 MVA cada.



Fonte: Belectric

Outros projetos

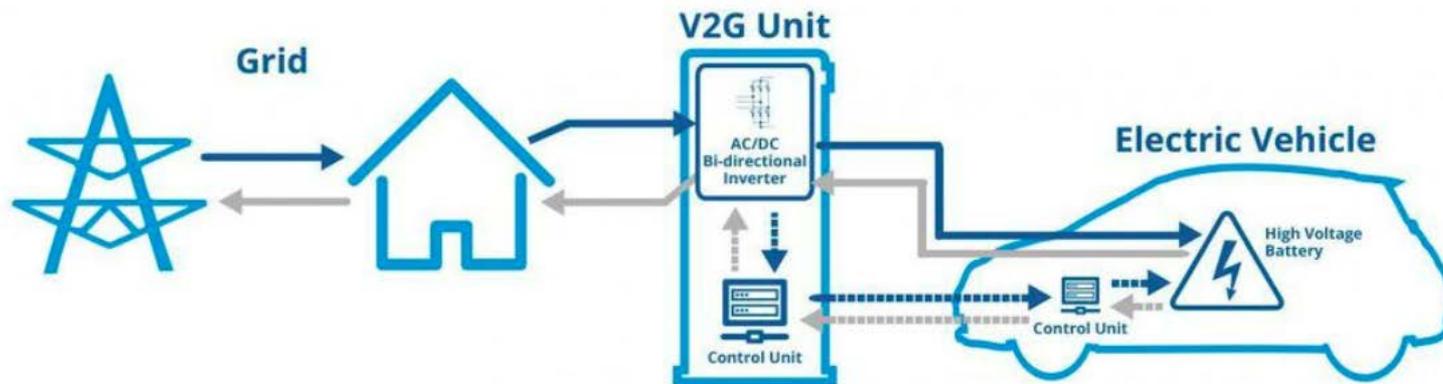
Atualmente, uma bateria Redox Flow de 20 MWh tem sido encomendada em Pfinztal, que vai armazenar energia eólica em uma solução de eletrólito de vanádio. Este armazenamento será acoplado diretamente a uma turbina eólica. Esta conexão economiza as perdas da conversão em corrente alternada (em comparação com um acoplamento do lado da linha).



Fonte: <https://cleantechnica.com>

3.c. Veículos elétricos

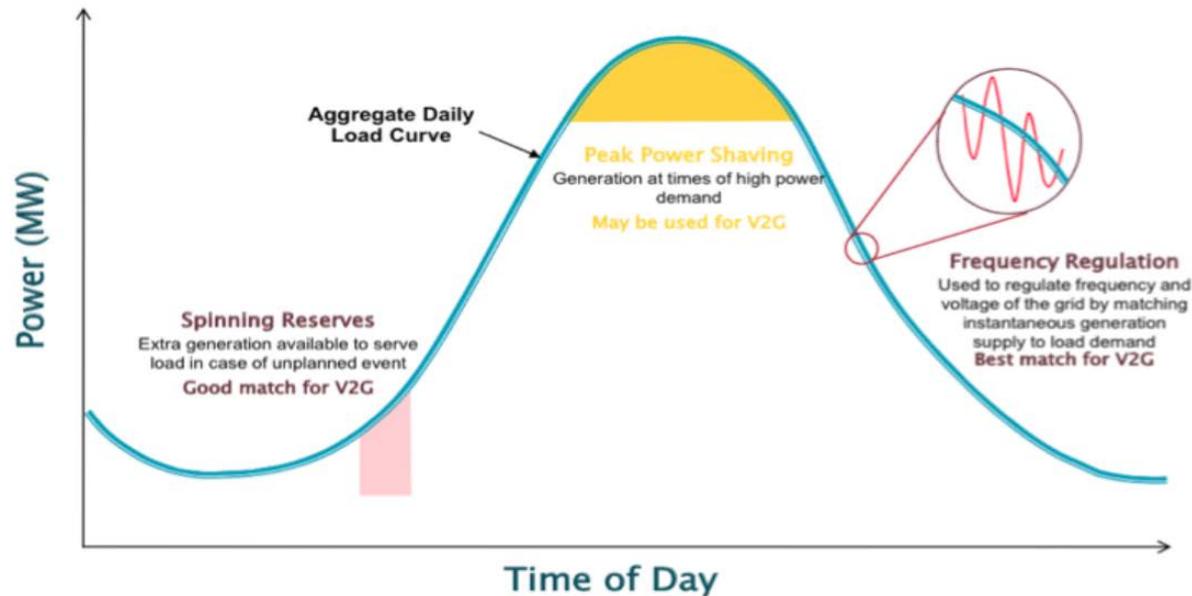
- O mercado de veículos elétricos está conduzindo um desenvolvimento substancial de baterias.
- As emissões de gases com efeito de estufa na Alemanha totalizam ca. 900 mi. de ton de CO₂. O setor de transporte representa ca. 150 mi. de ton, das quais 85 mi. são atribuíveis ao transporte privado
- Na União Europeia, espera-se que a porcentagem de energias renováveis no setor de mobilidade aumente para 10% até 2020 (Directiva UE 2009/28 / CE)



Fonte: Fleetcarma

Grid-to-Vehicle (G2V) e Vehicle-to-Grid (V2G)

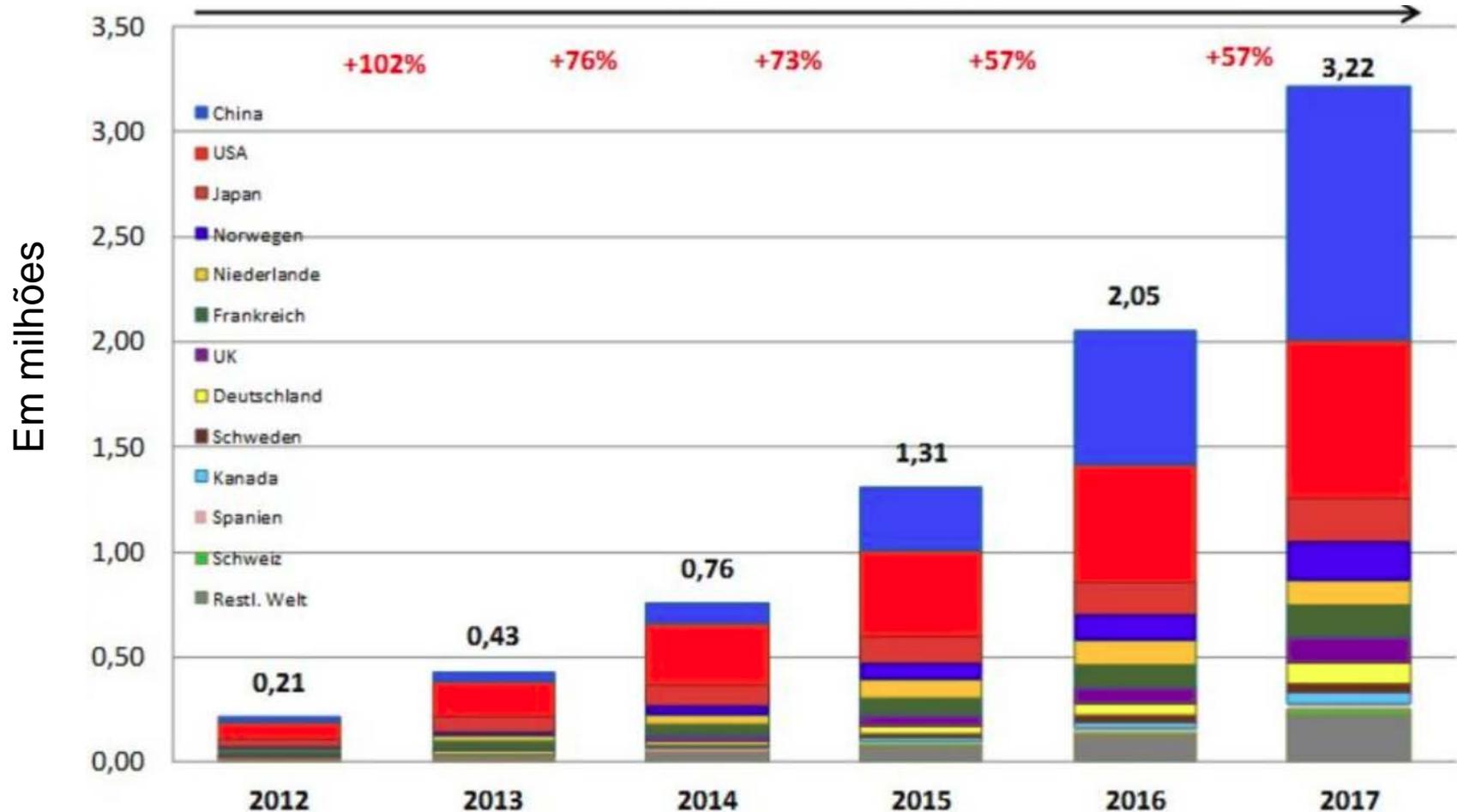
- Recarregando baterias durante o período de demanda reduzido (durante a noite)
- Estabelecimento de uma infra-estrutura de tarifação para veículos elétricos.
- Nivelamento de carga



Fonte : US DOD

Estoque mundial de veículos elétricos de 2012 a 2017

Taxa de crescimento anual



Fonte: ZSW

- O “carregamento rápido” fornece um veículo elétrico com uma carga de 80% em apenas 25 minutos
- Tesla Motors e BMW: própria rede de estações de carregamento nos EUA, Japão, China e Europa
- Carregadores rápidos: 1,686 nos EUA, 3,028 na Europa e 6,469 no Japão
- Total no Japão: 40.000 pontos de recarga (contra 35.000 estações de enchimento)



Fonte: Nissan



Fonte: Ford

4. Outros temas de P & D

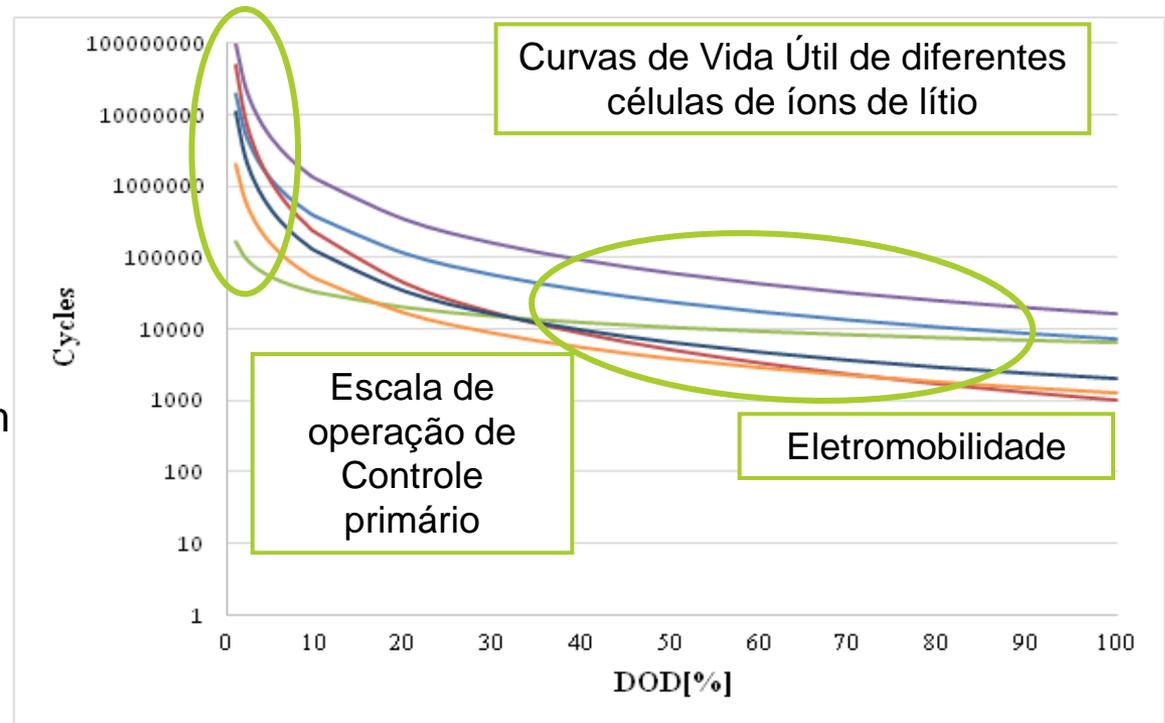
- Análise do envelhecimento dos componentes da planta, em particular das células da bateria;
- Otimização do conceito de refrigeração para economizar energia auxiliar
- Consideração das probabilidades de falha dos componentes da planta
- Otimização do gerenciamento de energia (distribuição da carga dependendo do status das unidades de armazenamento, racks, módulos, células)
- Análise de diferentes estratégias operacionais
 - Distribuição do requisito de desempenho para todas as unidades de armazenamento, ou
 - Conexão de unidades de armazenamento conforme necessário (positivo: economia de energia auxiliar, negativo: aumento do envelhecimento dos componentes, confiabilidade das operações de comutação)



Envelhecimento de bateria no Controle primário

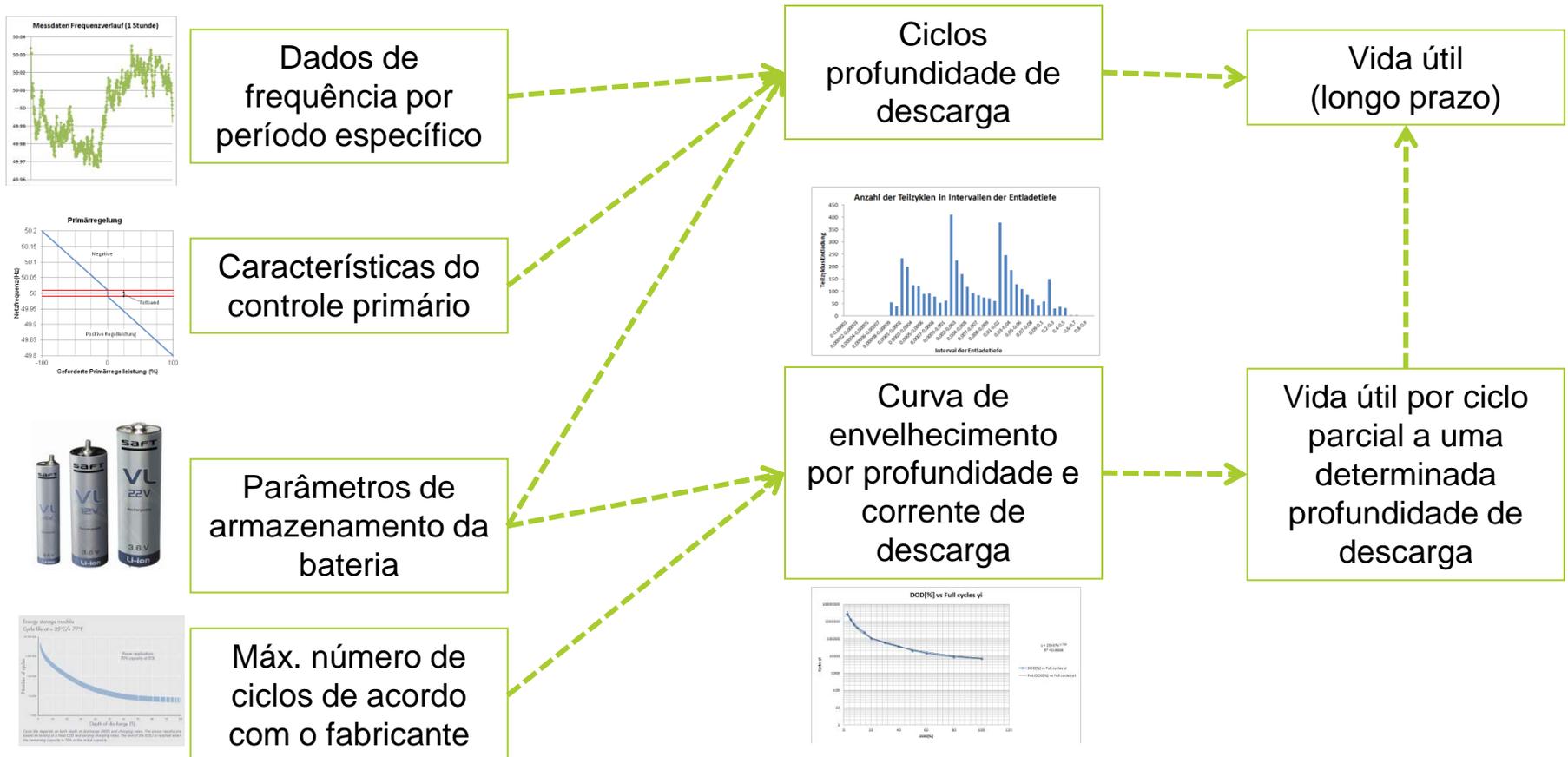
Cálculo do envelhecimento de bateria

- Consideração do envelhecimento por carregamento cíclico
- Grandes profundidades de descarga, altas correntes → envelhecimento acelerado,
- Baixa profundidade de descarga, baixa corrente → envelhecimento lento
- À medida que a idade cresce, a capacidade e a potência máxima da bateria diminuem
- O envelhecimento em microciclos quase não foi investigado
- As especificações do fabricante geralmente incluem apenas ciclos completos
- Os microcircuitos primários são usados quase que exclusivamente para microcircuitos



Cálculo do envelhecimento de bateria

Cálculo da vida útil das células Li-ion sob microciclos durante o controle primário.



*Modelo no processo de validação