



Contribuição para o PNE2050 da empresa SyraSolar

**Armazenamento de energia em escala de rede e outras
sugestões.**

**Autores: Hugo Francisco Lisboa Santos, M. Sc.
Pedro Vassalo Maia da Costa , D. Sc.**

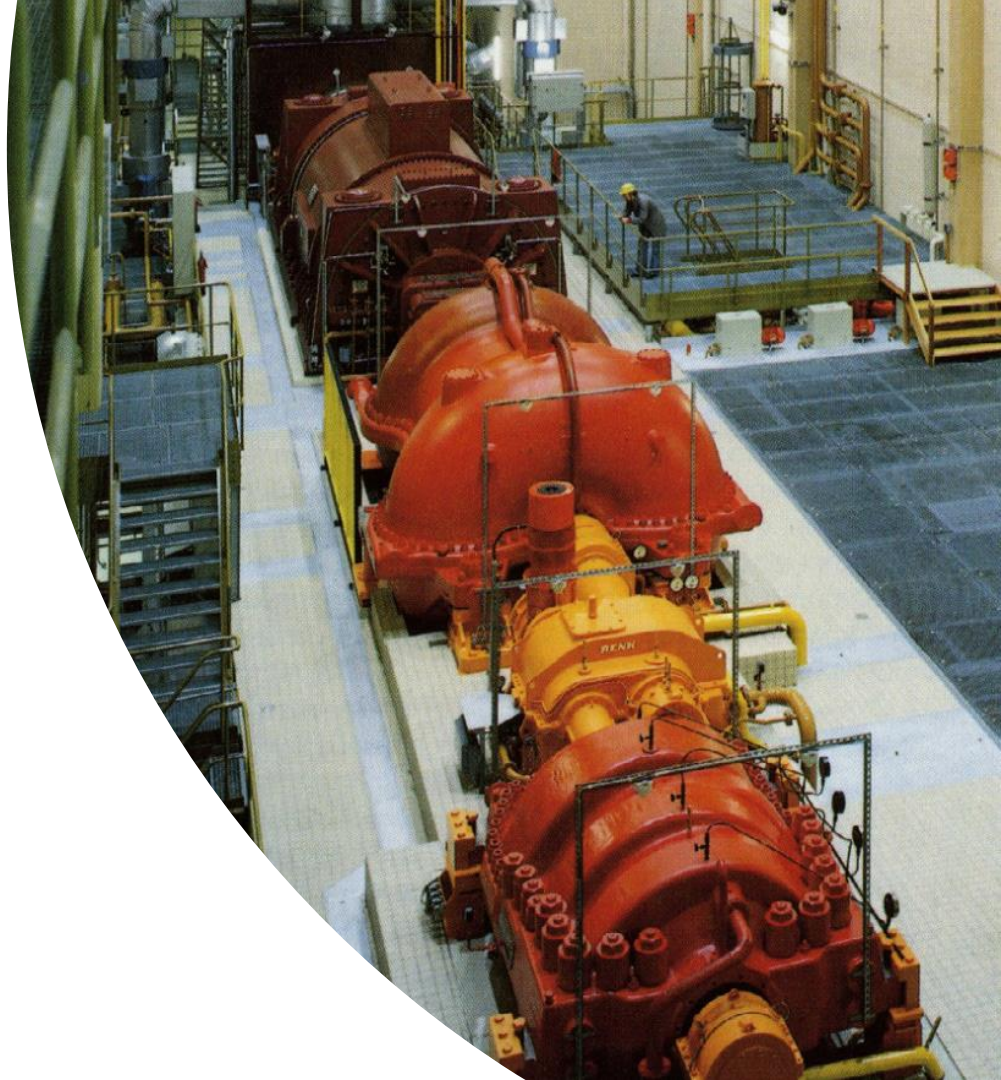
Rio de Janeiro, 13/10/2020

Preambulo

Realizamos uma análise do PNE 2050 e encaminhamos algumas sugestões ao longo desse documento. Um ponto que consideramos de grande importância é o maior destaque para sistemas de armazenamento, especialmente aqueles sistemas de armazenamento em escala de rede (“grid scale energy storage”). A inserção em larga escala de energias renováveis, especialmente solar fotovoltaica e eólica, gera descasamento entre geração e consumo. Esse descasamento terá que ser compensado obrigatoriamente com alguma geração complementar ou com alguma forma de armazenamento. A utilização de sistemas de Potência Complementar, conforme apresentado no item V.7 é uma alternativa para aumentar a geração nos horários de ponta. Contudo, conforme apresentado no “Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030” (Irena, 2017) e conforme apresentado na a NT-094/2020, da Aneel, o armazenamento mostra-se como uma opção bem mais adequada. O armazenamento resolve, não apenas a questão dos picos de consumo, mas também os momentos de baixa demanda e elevada geração, normalmente associados a tarifas baixas ou negativas. Adicionalmente, o armazenamento possui outras aplicações, como regulação de frequência, armazenamento sazonal, suporte de tensão, “black start”, gerenciamento de flutuações, alívio de transmissão e distribuição, redução da demanda de ponta etc. Desse modo, dada sua importância nas próximas décadas, acreditamos que o armazenamento de energia deve configurar um capítulo à parte ou uma seção separada do capítulo V, juntamente com as fontes de energia propriamente ditas. Em relação ao planejamento, propriamente dito, entendemos que a utilização mais ampla de sistemas de armazenamento configura uma solução mais adequada para a rede do que, por exemplo, a utilização de sistemas de potência complementar ou expansões desnecessárias da rede. Especialmente em relação a sistemas de armazenamento em escala de rede (“grid scale energy storage”). O mundo está passando por uma transição energética e o Brasil é uma grande referência da América Latina nesse contexto. Nós, da SyraSolar, que atuamos no mercado de geração distribuída fotovoltaica e possuímos atuação significativa em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento, entendemos que é fundamental para aderência em grande escala dos modais de geração alternativa intermitente na matriz de geração elétrica nacional, um desenvolvimento antecipado das estruturas legais/regulatórias do segmento de armazenamento de energia. Dessa forma, criar-se-ão mecanismos para que a transição energética ocorra de forma orgânica no Brasil, sem necessitar que sejam realizados ajustes estruturais bruscos no futuro.

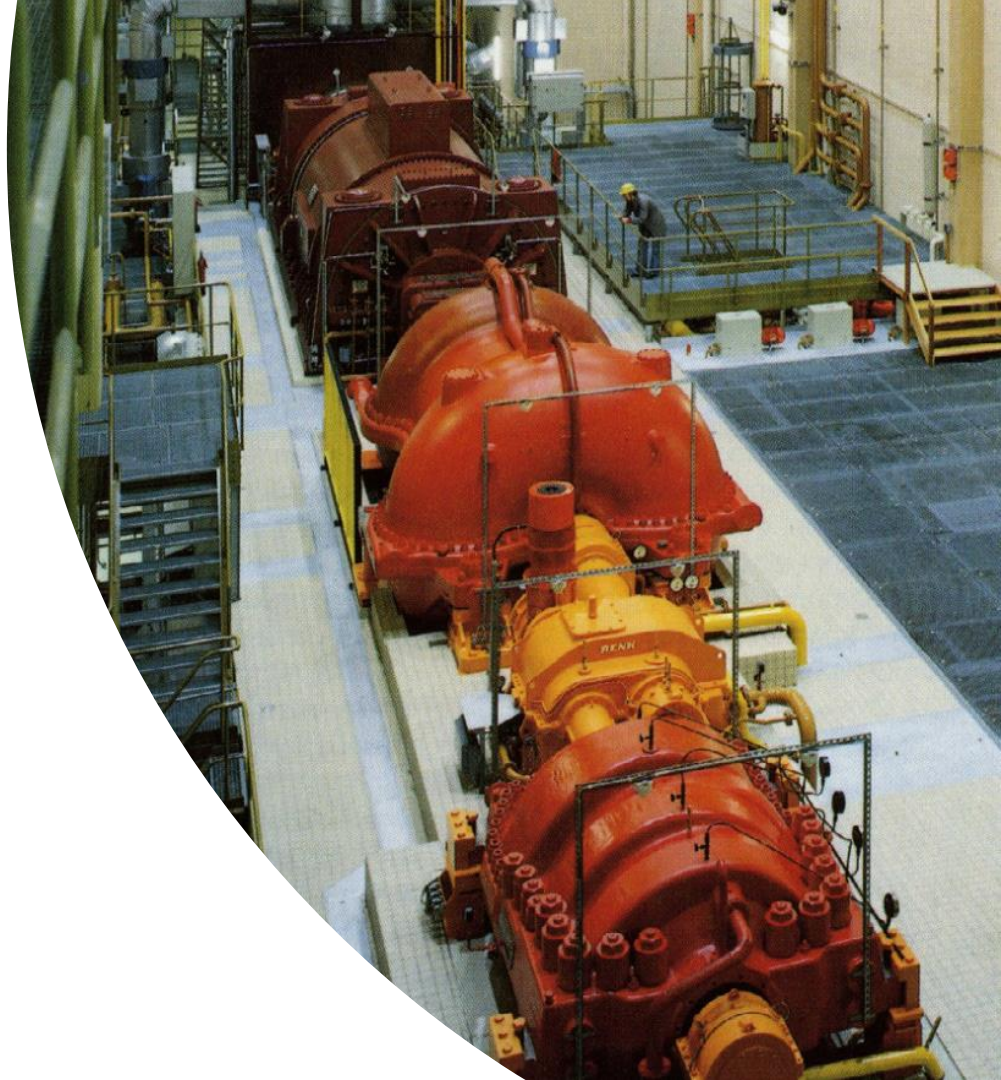
Sumário

- Importância dos sistemas de armazenamento para o pleno desenvolvimento da transição energética;
- Evolução da Matriz de geração elétrica brasileira;
- Sistemas de armazenamento existentes e aplicabilidade;
- Sistema CAES e potencial no Brasil;
- Sugestões de alteração no texto do PNE 2050
- Referências



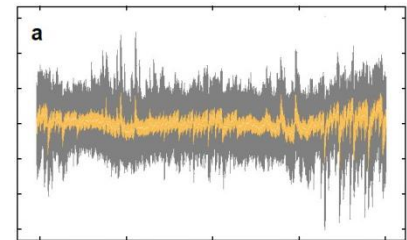
Sumário

- **Importância dos sistemas de armazenamento para o pleno desenvolvimento da transição energética;**
- Evolução da Matriz de geração elétrica brasileira;
- Sistemas de armazenamento existentes e aplicabilidade;
- Sistema CAES e potencial no Brasil;
- Sugestões de alteração no texto do PNE 2050
- Referências

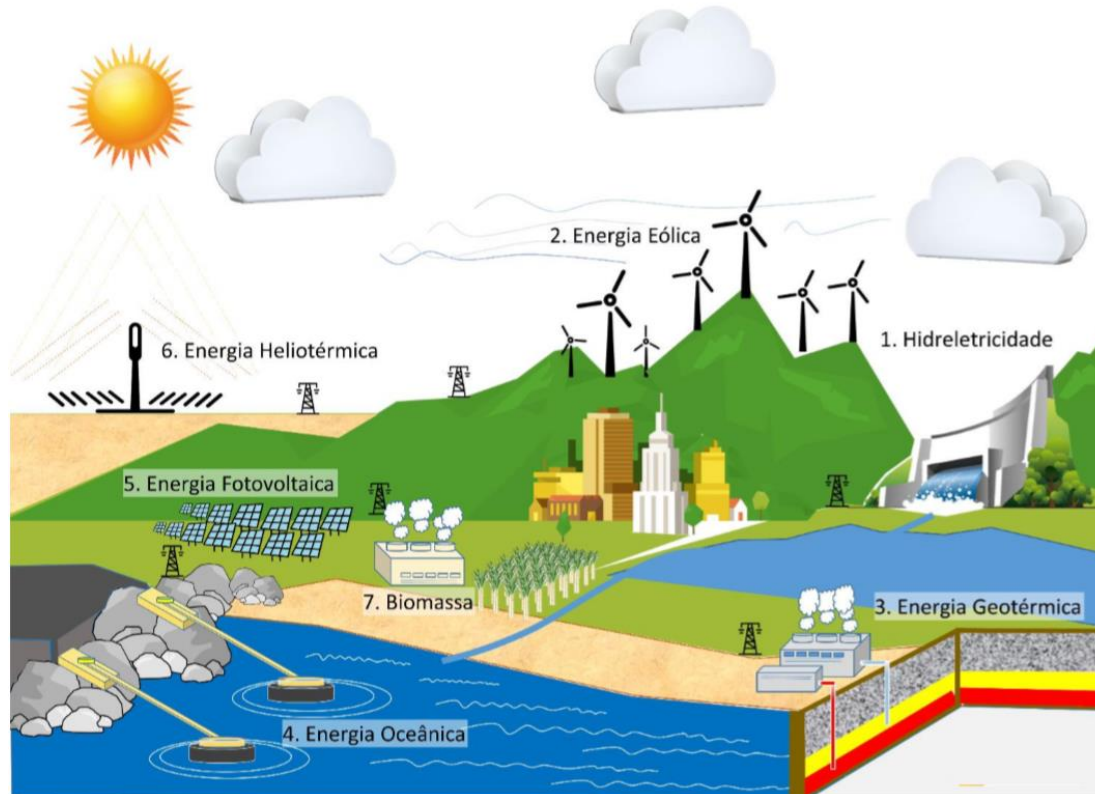


Motivação para utilização de sistemas de armazenamento (Irena, 2017)

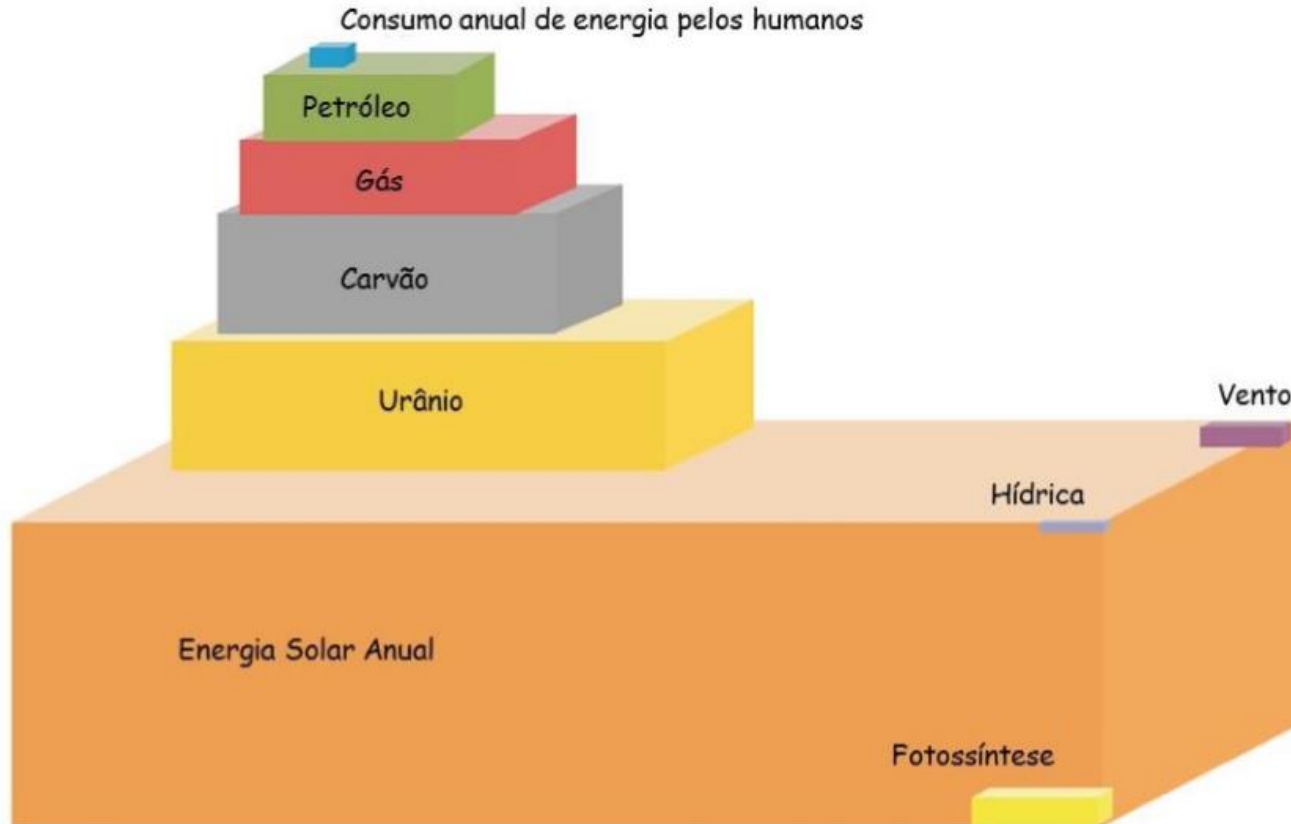
- O armazenamento de energia terá um papel crucial na viabilização da próxima fase da transição energética – descarbonização das fontes de energia;
- Imprescindível para o incremento de geração por fontes renováveis e intermitentes na matriz de geração elétrica;
- Diversos tipos de armazenamentos serão necessários para atribuir flexibilidade e uma gestão eficiente de sistemas de abastecimento: armazenamento comercial, distribuído, centralizado, de balanceamento, residencial, etc;
- Permite reações a mudanças inesperadas na demanda ou à perda de grandes quantidades de suprimento, como por exemplo: grandes estações desligadas, perda de interconexão, intermitência de geração de fontes renováveis, etc;
- Aumento significativo da participação de energia fotovoltaica e eólica esperadas para além de 2030 (70-80% em alguns casos);
- Armazenamento será crucial para suavizar as flutuações da oferta ao longo de dias, semanas ou meses;
- Os sistemas de armazenamento precisarão ser de baixo custo e alta eficiência (alta taxa de descarga);
- Sistemas de armazenamento hidrelétricos por bombeamento ou armazenamento de energia por ar comprimido são as duas principais alternativas de sistemas de armazenamento de grande porte.



Principais Fontes Renováveis no Mundo



Recursos Energéticos Totais no Planeta, (IEA, 2008)

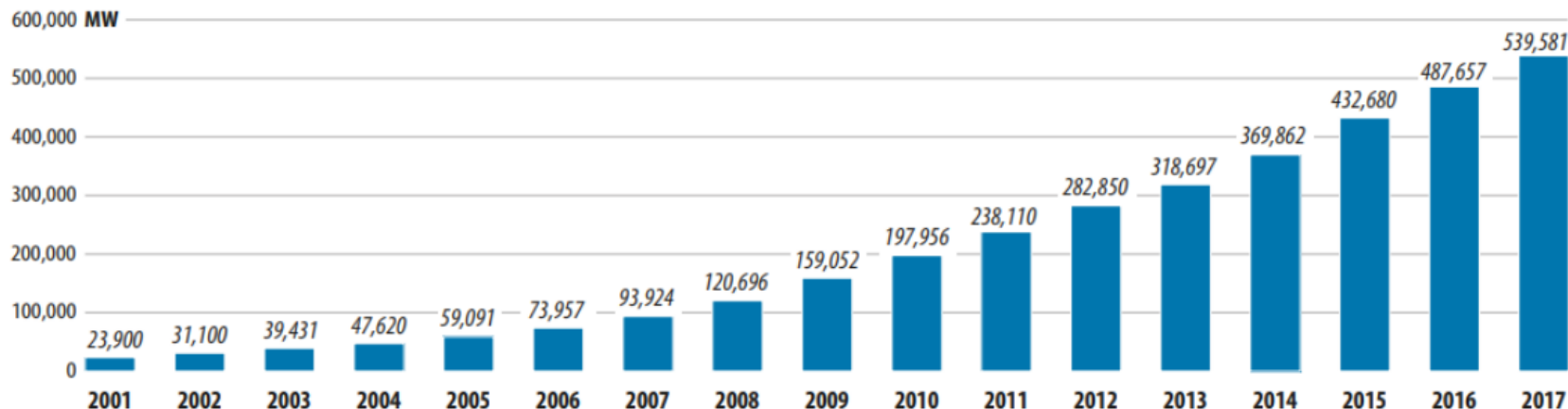


Taxa média de crescimento anual da Capacidade Instalada em Fontes Renováveis (REN 21 Renewables 2018 Global Status Report)



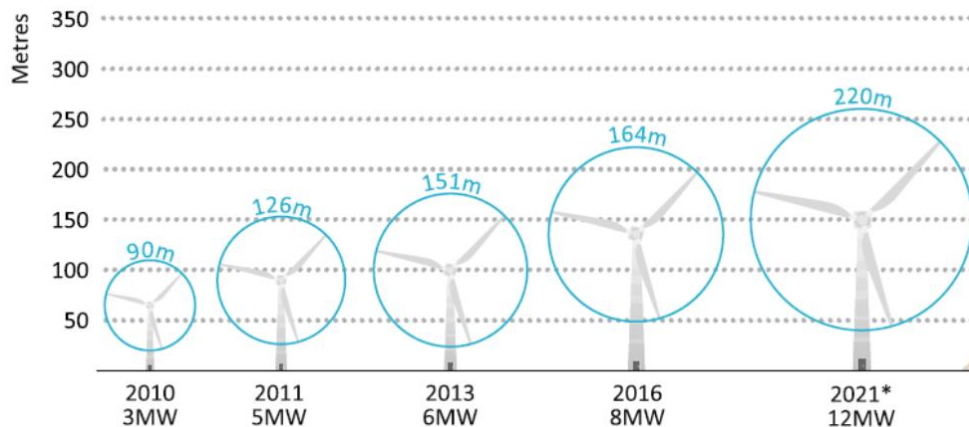
Evolução da potência eólica instalada no mundo e o crescimento da geração offshore (PNE 2050, 2017)

O aproveitamento da energia eólica para geração elétrica tem crescido exponencialmente no mundo nos últimos anos, atingindo 540 GW em 2017, como ilustrado pela figura abaixo. A maior parte dos parques eólicos está instalada em terra (“onshore”), **porém vários parques têm sido implantados no mar (“offshore”), devido à diminuição de locais apropriados em terra** para novos empreendimentos (notadamente na Europa) e por demonstrarem um bom potencial, apesar de apresentarem maiores custos. **Em 2017, a capacidade instalada “offshore” totalizou 18,8 GW (PNE, 2018).**

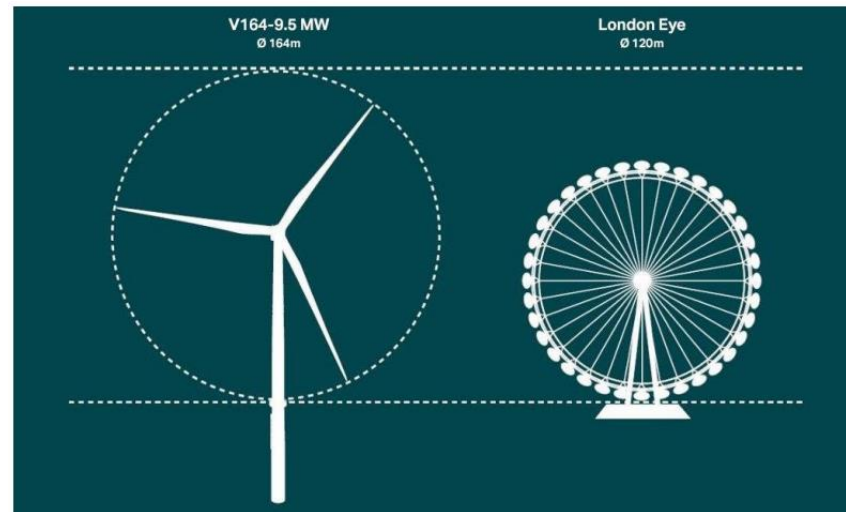


Geração eólica offshore (PNE 2050, 2017)

Em 2002 foi instalado o primeiro parque em grande escala, com 80 turbinas de 2MW, 80 metros de diâmetro e 70 metros de altura no mar do Norte (WINDEUROPE, 2018). Hoje, já estão em operação mais de 18 GW no mundo e as **inovações tecnológicas tem viabilizado a instalação de aerogeradores cada vez maiores**, como mostra a Figura 30.



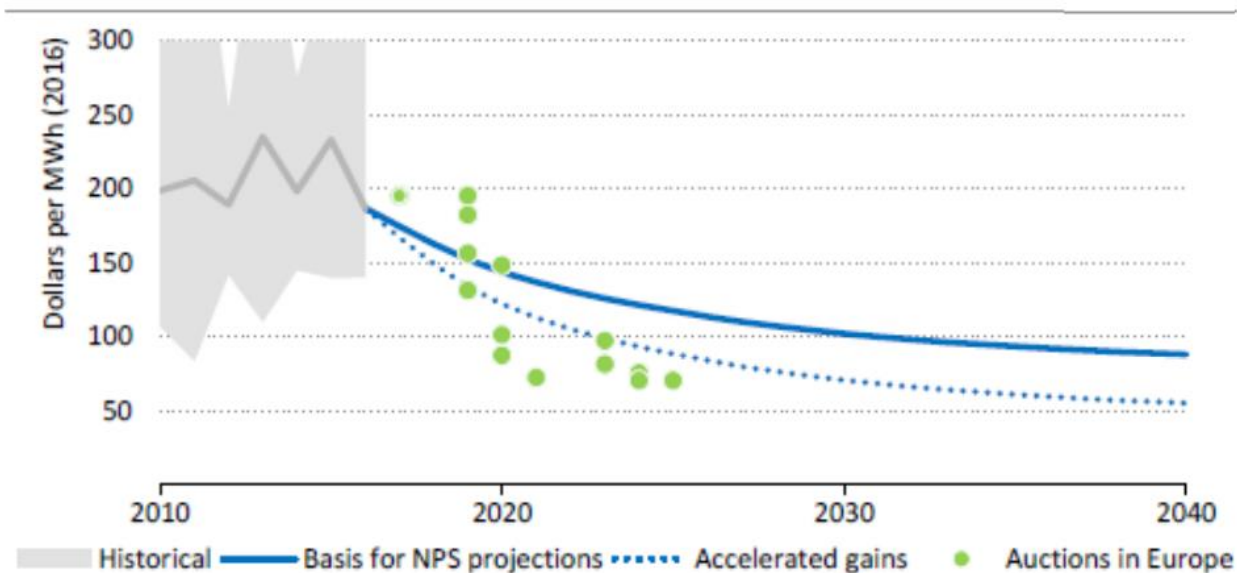
Evolução dos aerogeradores offshore.



Aerogerador V164 – 9,5 MW

Redução de custo da geração eólica offshore (PNE 2050, 2017)

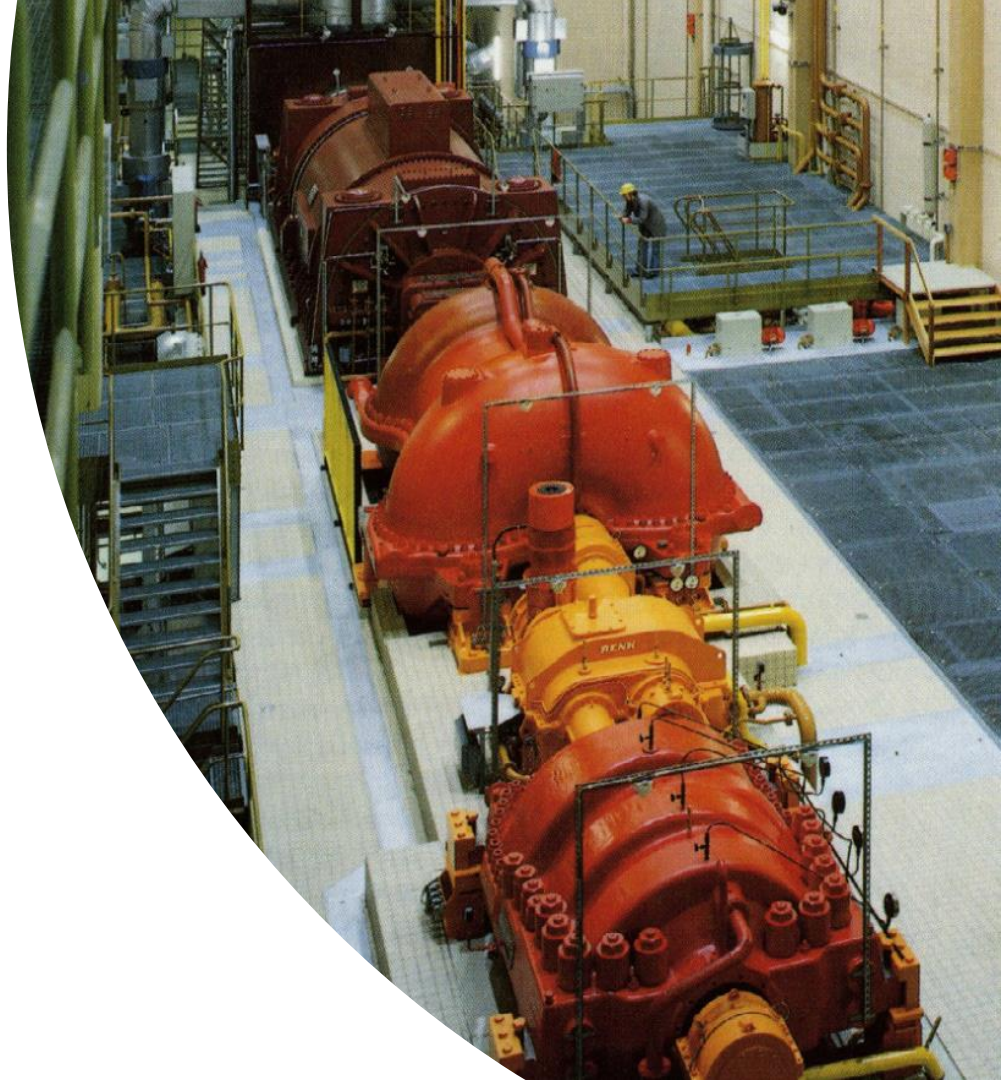
Os leilões recentes ocorridos na Europa vêm mostrando que as **reduções de custo estão mais aceleradas do que as previsões da IEA**, como pode ser observado na figura abaixo.



LCOE histórico e projetado para Eólicas offshore

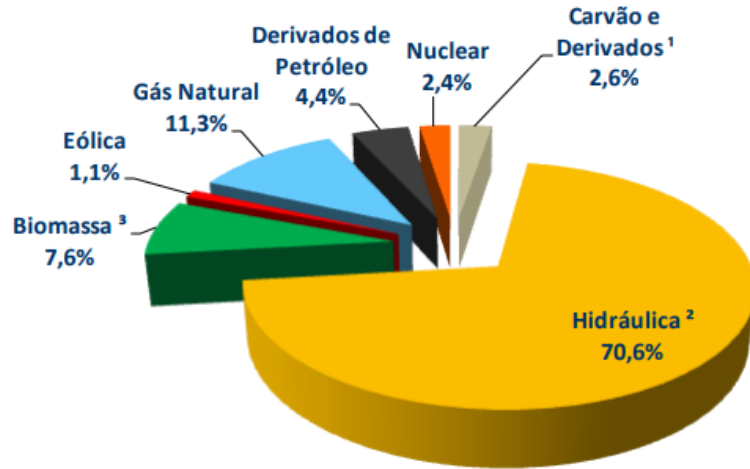
Sumário

- Importância dos sistemas de armazenamento para o pleno desenvolvimento da transição energética;
- **Evolução da Matriz de geração elétrica brasileira;**
- Sistemas de armazenamento existentes e aplicabilidade;
- Sistema CAES e potencial no Brasil;
- Sugestões de alteração no texto do PNE 2050
- Referências



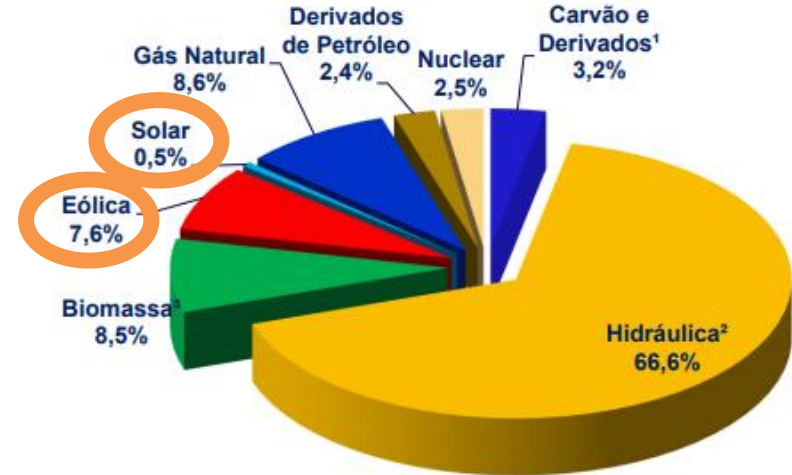
Evolução da matriz de geração elétrica brasileira (BEN, 2014 e 2019)

BRASIL (2013)



Fonte: Balanço Energético Nacional
ano base 2013, EPE 2014.

BRASIL (2018)



Fonte: Balanço Energético Nacional
ano base 2018, EPE 2019.

Potencial eólico nacional (PNE 2050, 2017)

Tabela 24 - Potencial eólico dos atlas brasileiros

Altura	75m (*80m,**70m)		100 m		150 m	
Estados Potencial (>7m/s)	Potência Instaláv el (MW)	Energia Anual (GWh)	Potência Instaláv el (MW)	Energia Anual (GWh)	Potência Instaláv el (MW)	Energia Anual (GWh)
Alagoas ²⁰⁰⁸	336	822	649	1.340	n.d.	n.d.
Bahia ²⁰¹³	38.600*	150.400*	70.100	273.500	195.200	766.500
Ceará ²⁰⁰⁰	24.900**	51.900**	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Espírito Santo ²⁰⁰⁹	448	1.073	1.143	2.397	n.d.	n.d.
Minas Gerais ²⁰¹⁰	24.742	57.812	39.043	92.076	n.d.	n.d.
Paraná ²⁰⁰⁷	1.363	3.756	3.375	9.386	n.d.	n.d.
Rio de Janeiro ²⁰⁰²	1.524	4.835	2.813	8.872	n.d.	n.d.
Rio Grande do Norte ²⁰⁰³	19.431	55.901	27.080	69.293	n.d.	n.d.
Rio Grande do Sul ²⁰¹⁴	n.d.	n.d.	102.800	382.000	245.300	911.000
São Paulo ²⁰¹²	15	48	564	1.753	n.d.	n.d.
Total dos Atlas	111.023	325.725	246.918	839.277	440.500	1.677.500

**Potência instalada no Brasil
em 2019: 170 mil MW.**

Fonte: Elaboração a partir de fontes diversas.

Potencial de geração eólico offshore nacional (PNE 2050, 2017)

Tabela 25 - Potencial instalável de geração eólica offshore por distância da costa no Brasil

Distância da Costa	Potencial (GW)
0 - 10 km	57
0 - 50 km	259
0 - 100 km	514
0 - 200 mi (ZEE) ⁴⁶	1.780

Fonte: Ortiz e Kampel (2011).

Estima-se um potencial de aproximadamente 6.150 TWh por ano, um enorme potencial para ser explorado na costa brasileira.

Vantagens da eólica offshore:

- Ventos mais fortes e constantes; menos obstáculos; demanda de energia próximo a costa (densidade urbana); área disponível.

Vantagem da eólica offshore no Brasil:

- Ocorrência de depósitos salinos praticamente ao longo de toda a costa nacional;
- Possibilidade desenvolvimento de CAES.

Tabela 26 - Potencial instalável de geração eólica offshore por profundidade no Brasil

Intervalo batimétrico	Potencial (GW)
0 - 20 m	176
0 - 50 m	399
0 - 100 m	606

Fonte: Ortiz e Kampel (2011).

Projetos nacionais para geração de energia eólica offshore (PNE 2050, 2017)

O Brasil não possui nenhum parque eólico offshore, mas já **existem 3 projetos com solicitação de licença ambiental no Ibama**, mostrando que o mercado está estudando o assunto. Seguem abaixo as características principais de cada projeto:

- Complexo Eólico Marítimo Asa Branca I (400 MW): localizado no litoral do município de Amontada/CE, a uma distância entre 3 km e 8 km da praia, com profundidades variando entre 7 e 12 metros.
- Complexo Eólico Caju (30 MW): localizado no território dos municípios maranhenses de Tutoia e Araisos, na Zona de transição terra-mar.
- EOL Planta Piloto de Geração Eólica Offshore (5 MW): projeto de P&D da Petrobras com investimento de R\$ 63 milhões. Será localizado a 20 km da costa de Guamaré, em uma região com lâmina d'água média entre 12 m e 16 m.

Destes 3 projetos, a planta piloto é o mais promissor, visto que **se trata de projeto de pesquisa**.

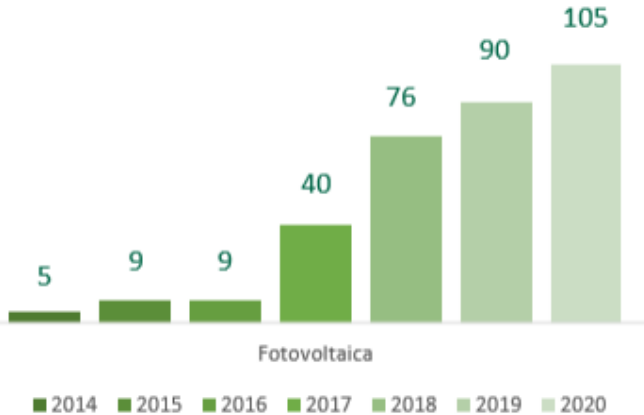
- Geração eólica offshore já existe no mundo em estágio avançado de desenvolvimento, mesmo assim a **sua implementação no Brasil se caracteriza como projeto de pesquisa**, uma vez que é inédito a nível nacional;
- **Sistema de armazenamento offshore é especialmente interessante num cenário de aproveitamento eólico offshore no Brasil** – regula a intermitência de geração dos complexos e facilita a integração e a gestão do SIN.

Potencial de geração fotovoltaica centralizada no Brasil (PNE 2050, 2017)

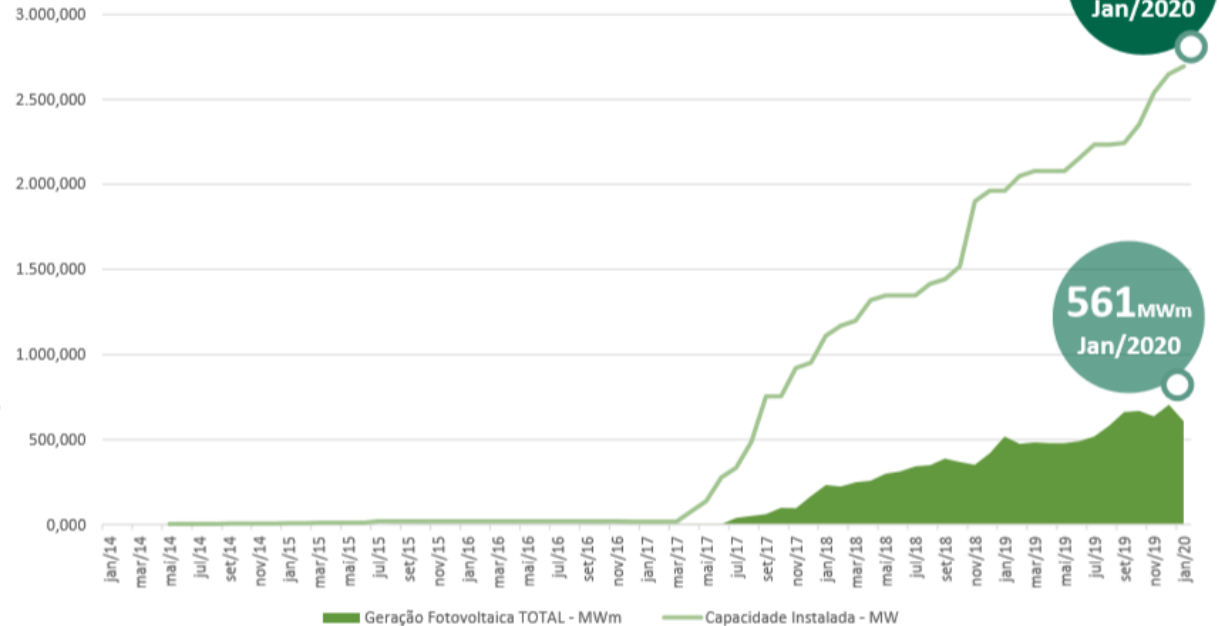
- Potencial estimado de 307 GWp em centrais fotovoltaicas, com geração aproximada de 506 TWh/ano;
- Praticamente todo território brasileiro é propício ao aproveitamento solar;
- Mesmo as áreas com a menor irradiação do mapa possuem insolação mais elevada do que os melhores sítios da Alemanha, país líder em capacidade instalada fotovoltaica (38,5 GWp em 2014) e com geração de aproximadamente 35 TWh ao longo de 2014 (FRAUNHOFER ISE, 2015);
- Assim, entende-se que no horizonte 2050 seja plausível a dispersão de empreendimentos de energia fotovoltaica em todo território nacional.

Usinas Fotovoltaicas em Operação (Greener, 1T - 2020)

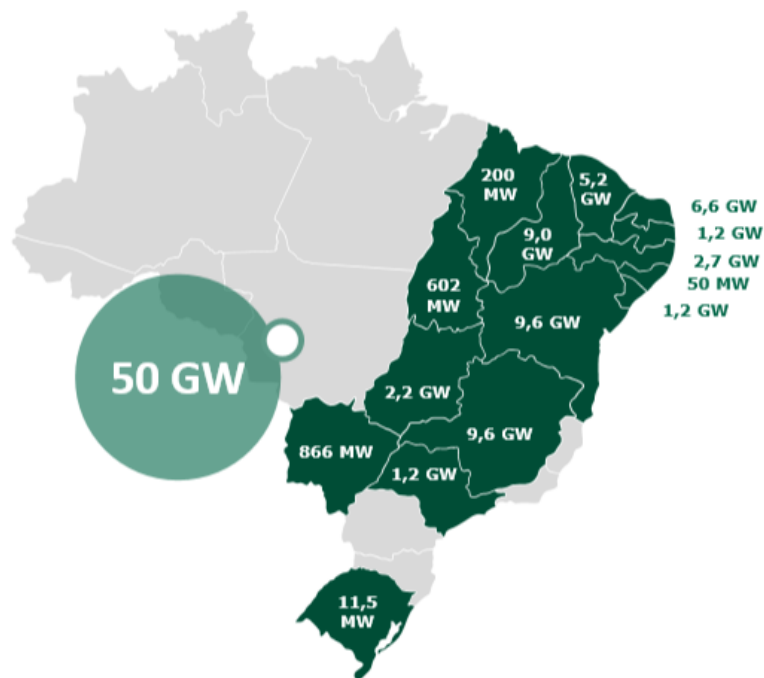
Histórico de Número de Usinas



Comparativo de Geração (MWm) por Capacidade Instalada (MW)

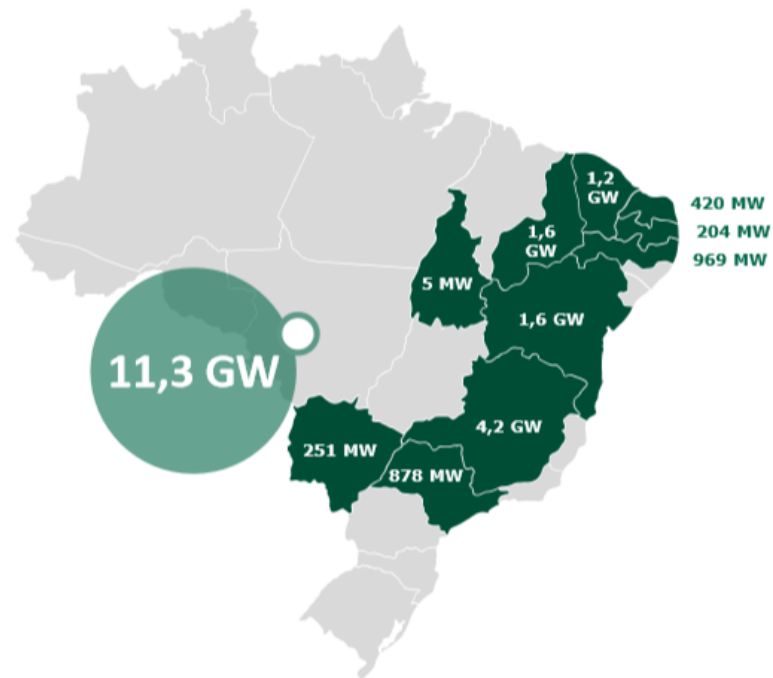


Projetos com requerimento de outorga (DRO) ou Outorgados (Greener, 1T - 2020)



Capacidade de Projetos com DRO

Considera UFVs com DRO
(Despacho de Requerimento de Outorga) no Brasil.



Capacidade de Projetos Outorgados

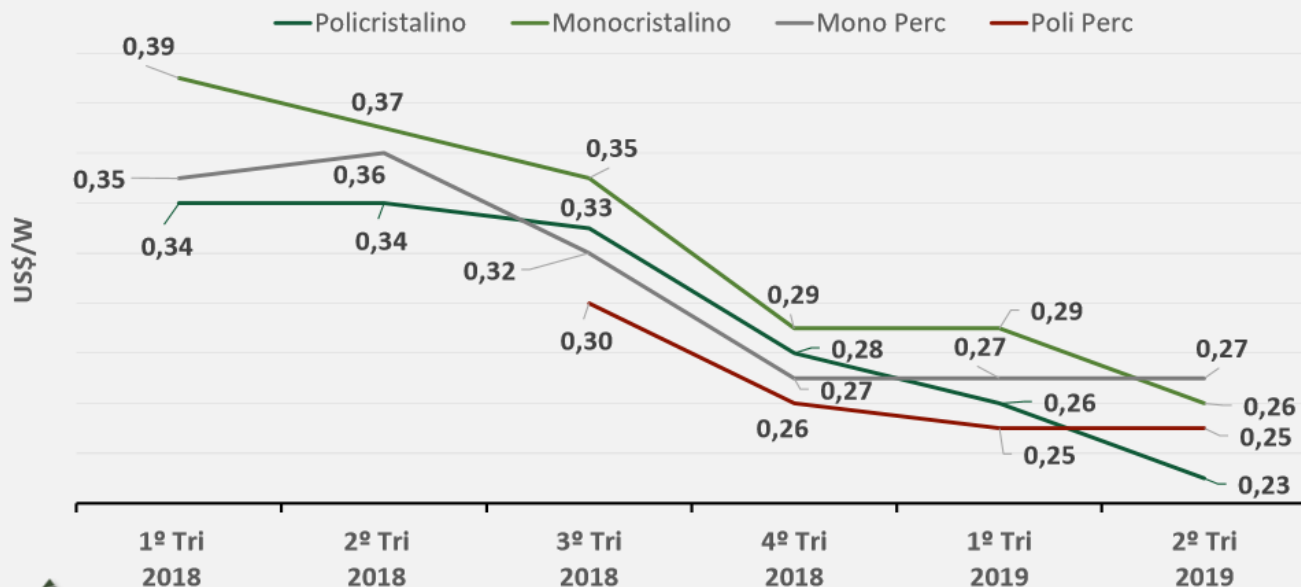
Considera UFVs já outorgadas no Brasil, que estão em operação
ou que irão entrar em operação em até 3 anos.

Potencial de geração fotovoltaica distribuída no Brasil (PNE 2050, 2017)

- Em tese, atualmente **todos os estados teriam condição de suprir seu consumo elétrico residencial de forma integral com o advento da energia fotovoltaica.**
- A superioridade do potencial ante o consumo com base em 2013, varia de aproximadamente 1,4 a quase 4 vezes, em determinados estados.
- **Considerando todo o país, o potencial é 2,3 vezes maior que o consumo.**

Preço médio dos Módulos Fotovoltaicos (Greener, 2T - 2019)

Houve uma expressiva queda de preço em todas tecnologias ao longo do último ano. Os preços dos módulos PERC se mantiveram constantes no último trimestre.



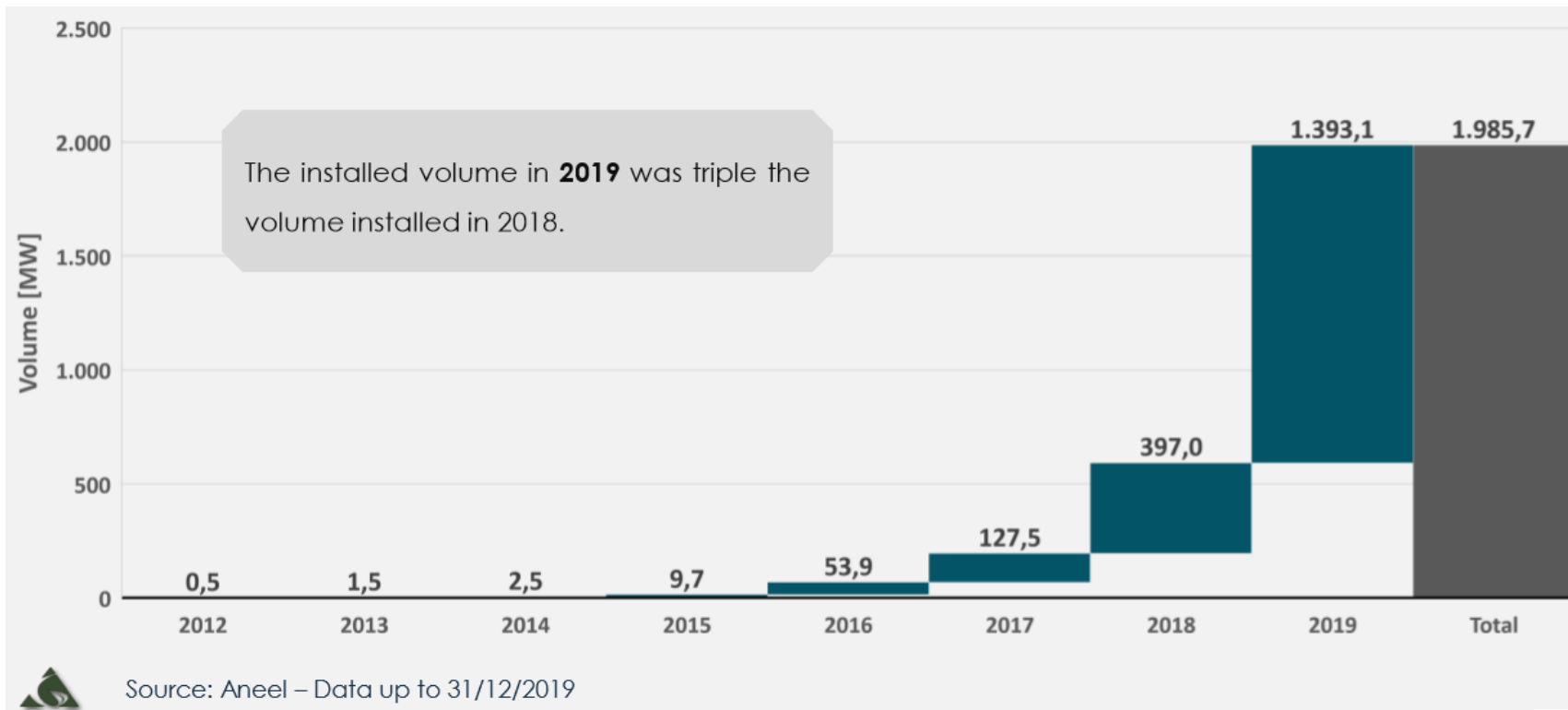
Valores referentes ao preço do módulo no país de origem, não inclui frete nem seguro.

Os valores são informados na data de chegada no Brasil e não na data de compra.

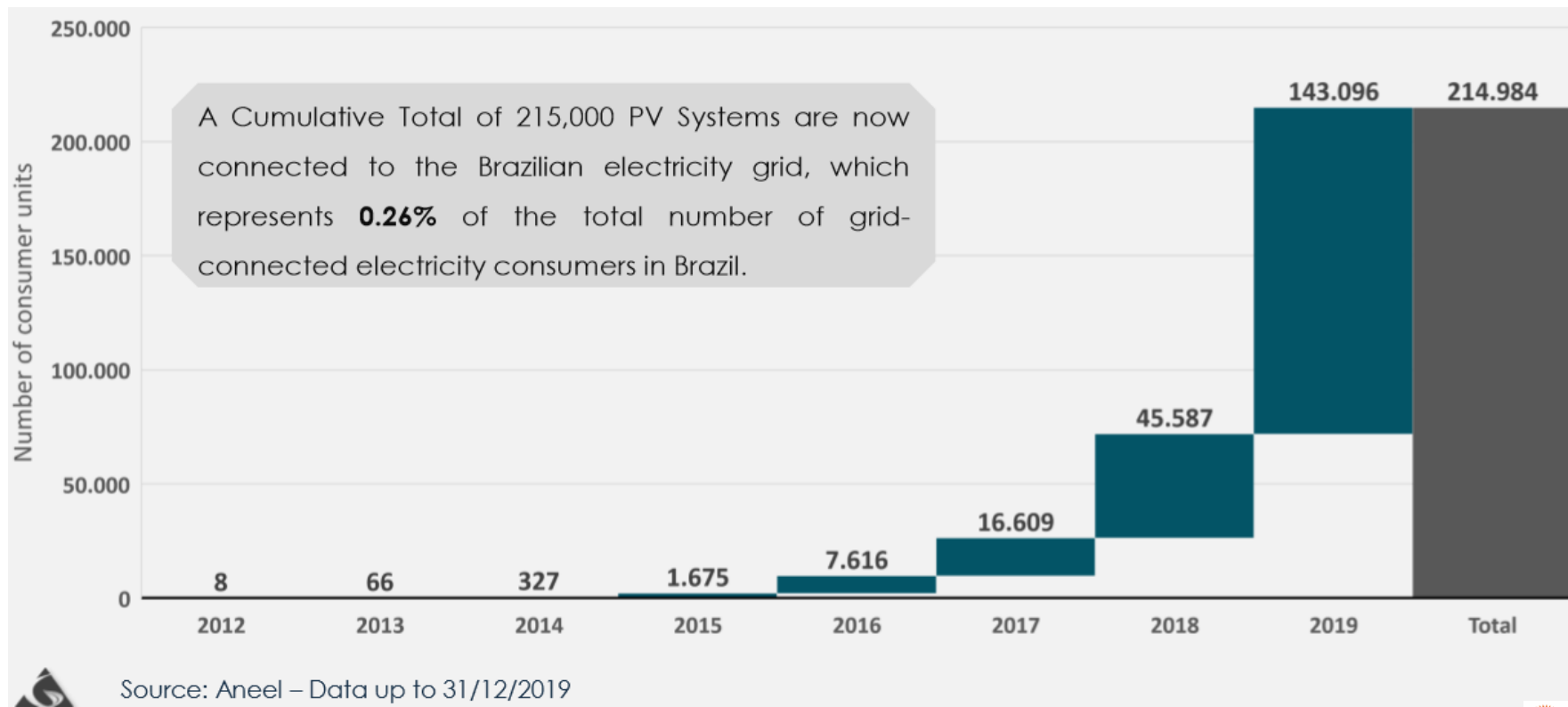


Fonte: Receita Federal, Greener.

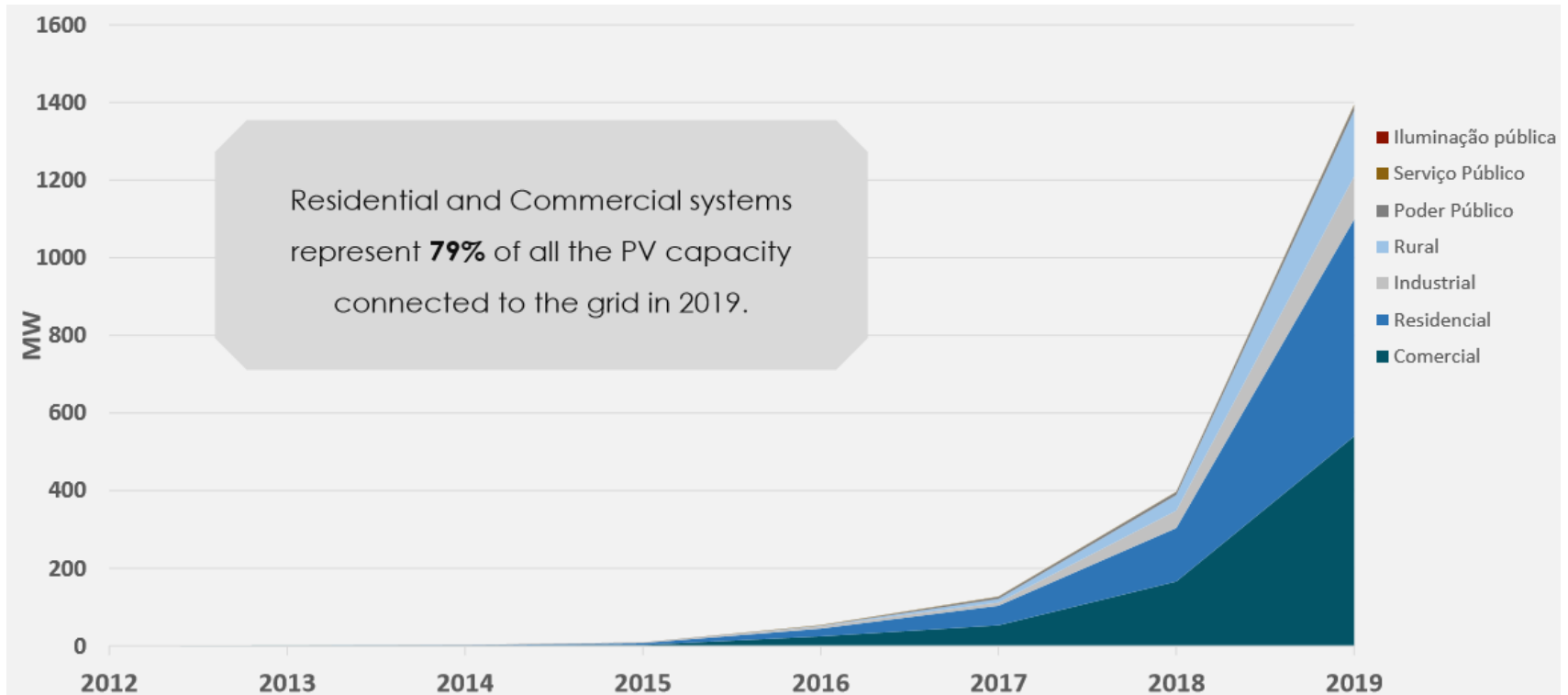
Potência de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (Greener, 4T - 2019)



Número de instalações fotovoltaicas conectadas à rede (Greener, 4T - 2019)



Potência por classe de consumo (Greener, 4T - 2019)



Source: ANEEL – Data up to 31/12/2019

Potencial de geração fotovoltaica offshore no Brasil (PNE 2050, 2017)

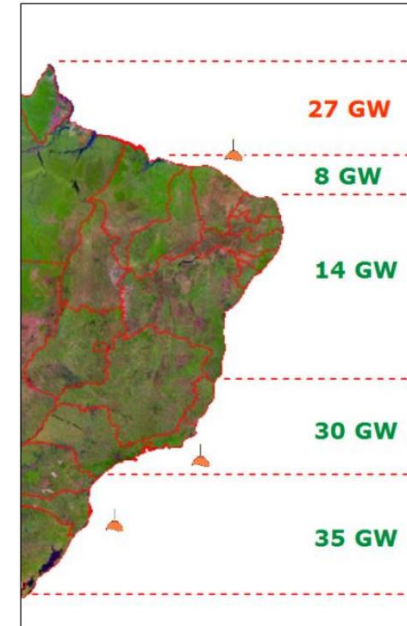
- Vantagem do aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos quando alocados sobre a água;
- Ocupação de área;
- Cerca de um quarto da população brasileira vivendo em cidades litorâneas, a geração fotovoltaica offshore pode ser uma solução interessante para o atendimento elétrico dessas zonas **com reduzido investimento em linhas de transmissão**;
- Belo Monte exigiu a construção de uma linha de aproximadamente 2 mil km.

Tabela 31 - Potencial brasileiro de geração fotovoltaica centralizada offshore

Faixa de irradiação (Wh/m ² .dia)	Área (km ²)	FCcc médio	Potência Fotovoltaica (GWp)	Energia Gerada (TWh/ano)
até 4,4	1.343	13,1%	94	108
4,4 - 4,8	89.106	14,4%	6.237	7.854
4,8 - 5,1	324.632	15,5%	22.724	30.793
5,1 - 5,4	248.594	16,4%	17.402	25.009
5,4 - 5,5	156.157	17,1%	10.931	16.383
5,5 - 5,6	155.030	17,3%	10.852	16.488
5,6 - 5,8	455.832	17,8%	31.908	49.789
5,8 - 6,0	296.949	18,4%	20.786	33.573
6,0 - 6,2	171.939	19,1%	12.036	20.098
6,2 - 6,4	204.344	19,7%	14.304	24.669
6,4 - 6,6	840.875	20,3%	58.861	104.736
6,6 - 6,87	733.820	21,0%	51.367	94.706

Potencial de energia oceânica no Brasil (PNE 2050, 2017)

- Distribuição mundial dos oceanos e, principalmente, a alta densidade energética;
- O aproveitamento das marés é o mais difundido, com projetos em funcionamento desde a década de 1960. Essa tecnologia consiste no represamento de água para que se possa utilizar a energia potencial disponível com o desnível de coluna d'água gerado na maré enchente e na maré vazante (FLEMING, 2012);
- Além dessa tecnologia, destaca-se o aproveitamento através das ondas, correntes marinhas, gradientes térmicos e gradientes de salinidade;
- O potencial brasileiro de ondas e marés é estimado em 114 GW, como ilustrado na figura.



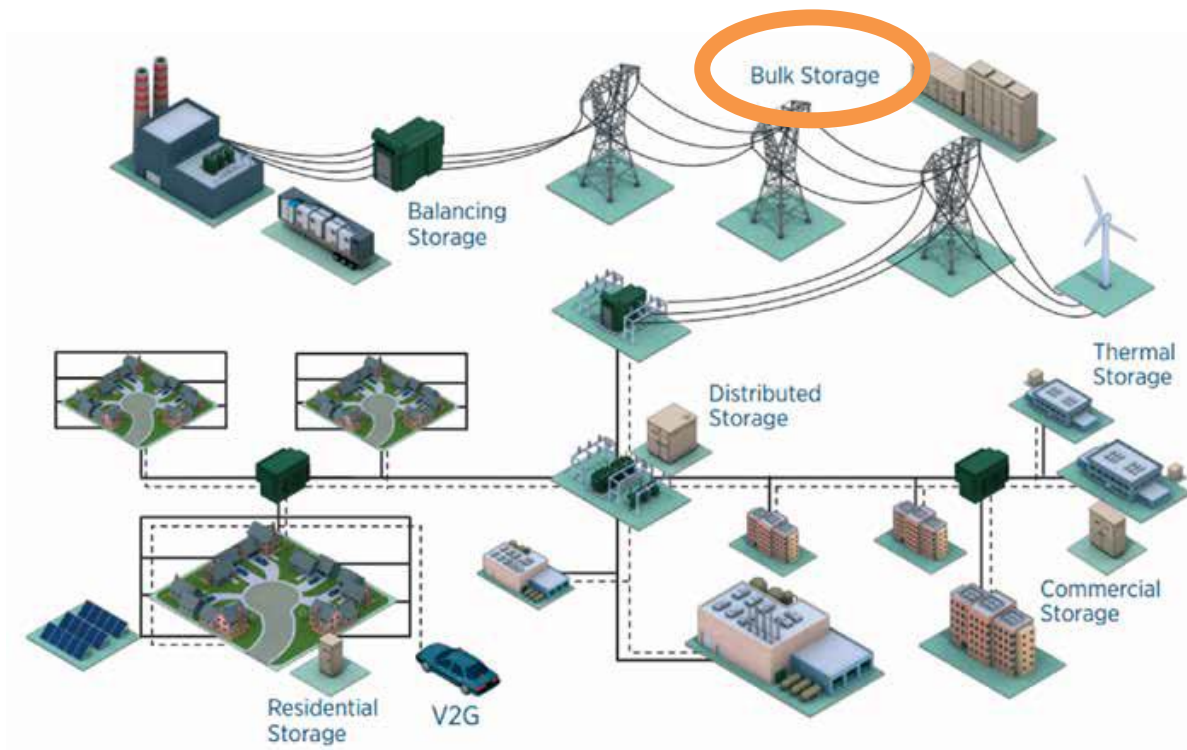
Potencial teórico brasileiro estimado de ondas e marés (COPPE/UFRJ & Seahorse Wave Energy, 2013).

Sumário

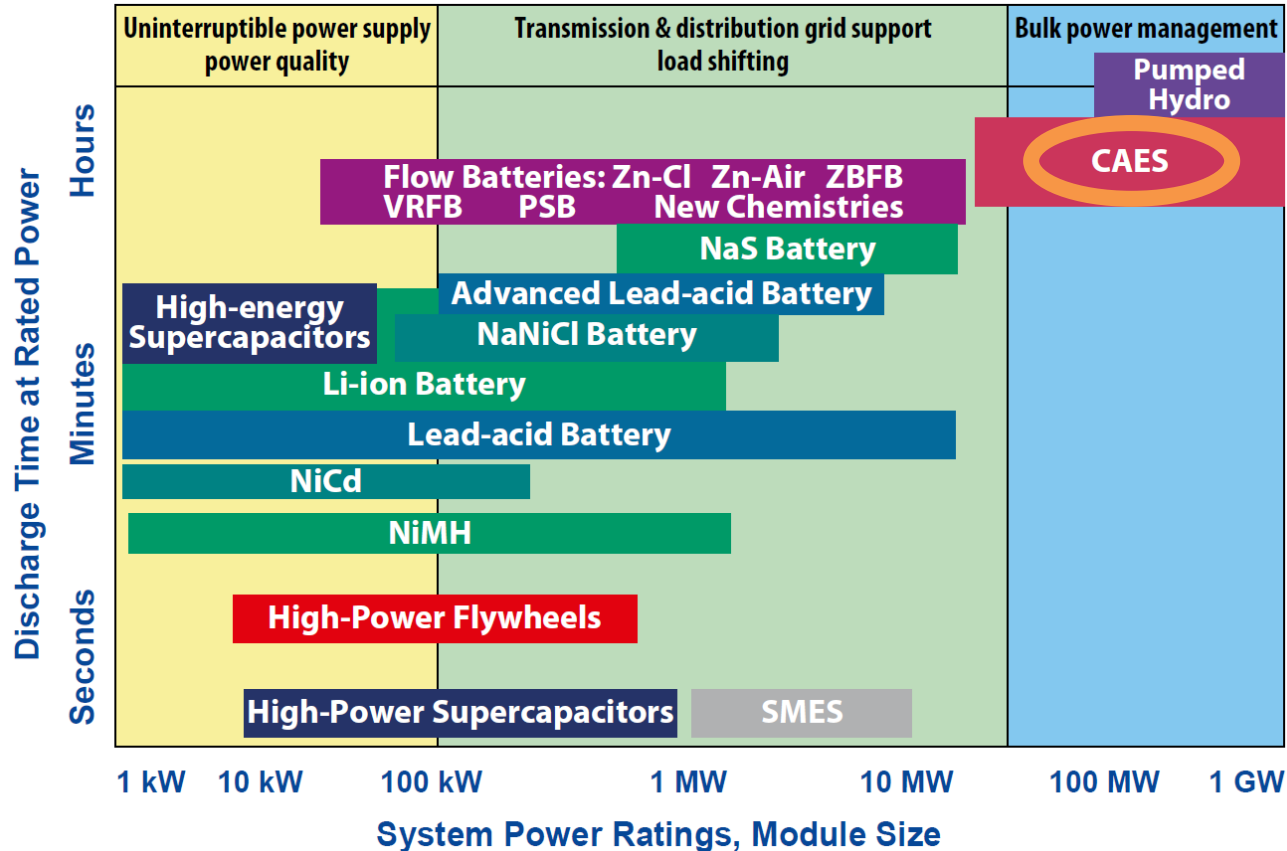
- Importância dos sistemas de armazenamento para o pleno desenvolvimento da transição energética;
- Evolução da Matriz de geração elétrica brasileira;
- **Sistemas de armazenamento existentes e aplicabilidade;**
- Sistema CAES e potencial no Brasil;
- Sugestões de alteração no texto do PNE 2050;
- Referências.



Armazenamento nos diferentes pontos da rede elétrica, (Irena, 2017)



Aplicabilidade das diferentes tecnologias de armazenamento (Irena, 2017)



Aplicabilidade das diferentes tecnologias de armazenamento (ANEEL, 2020)

Armazenamento Sazonal

- Armazenamento por dias, semanas ou meses
- Compensar mudanças sazonais na geração e no consumo

Arbitragem de preços

- Armazena ("compra") energia barata gerada em períodos de baixa demanda e grande geração não controlável
- Injeta ("vende") em momento de elevada demanda e reduzida geração não despachável

Regulação de Frequência

- Armazenar ou injetar energia armazenada como resposta a mudanças na configuração local do sistema elétrico
- Respostas rápidas e de curta duração

Aplicabilidade das diferentes tecnologias de armazenamento (ANEEL, 2020)

Load Following

- Gerencia as flutuações do sistema em um período de tempo que pode variar de 15 minutos a 24 horas e pode ser controlado pelo controle automático de geração ou manualmente. Rampa rápida.

Suporte de Tensão

- Injeção ou absorção de potência reativa para manter os níveis de tensão nos sistemas de transmissão e distribuição em condições normais.

Black start

- Permite que o sistema seja restaurado em caso de colapso, sem utilizar energia da rede.

Aplicabilidade das diferentes tecnologias de armazenamento (ANEEL, 2020)

Alívio de Transmissão e Distribuição

- Deslocar geração ou demanda, temporariamente ou geograficamente, de modo a aliviar pontos de congestão.
- Adiar a necessidade de investimentos em redes de T&D.

Redução da demanda de ponta

- Desloca a demanda de forma a casar com a oferta, podendo reduzir a demanda de ponta do sistema.
- Pode substituir unidades geradoras de ponta

Soluções *off-grid*

- Trazer maior qualidade e segurança ao abastecimento de redes isoladas que utilizam geração térmicas e recursos renováveis.

Sumário

- Importância dos sistemas de armazenamento para o pleno desenvolvimento da transição energética;
- Evolução da Matriz de geração elétrica brasileira;
- Sistemas de armazenamento existentes e aplicabilidade;
- **Sistema CAES e potencial no Brasil;**
- Sugestões de alteração no texto do PNE 2050;
- Referências.



Oportunidade do desenvolvimento do CAES no Brasil

- Existência de depósitos salinos em ambiente onshore e offshore para construção de cavernas de sal;
- Mecanismo de balanceamento da intermitência da energia gerada offshore;
- Armazenamento de excedente de geração offshore;
- Proximidade com as áreas de maior concentração populacional do país, logo, maior consumo de energia;
- Geologia favorável em praticamente toda extensão costeira brasileira;
- Possibilidade de redução de custo de linhas de transmissão;
- Devido a possibilidade de se tornar uma espécie de “filtro” de correção da instabilidade de frequência originado por sistemas de geração intermitente, pode representar um atrativo para o desenvolvimento de sistemas de geração offshore;
- Oportunidade de construção ao longo de praticamente toda a costa;
- O Brasil pode se tornar um laboratório para desenvolvimento do sistema CAES offshore.

O que é um sistema CAES?

- Compressed Air Energy Storage (CAES) é o termo dado à técnica de armazenar energia elétrica, como energia potencial eletromecânica em um sistema de geração a gás comprimido;
- O ar bombeado para grandes tanques de armazenamento, ou formações geológicas subterrâneas, é posteriormente utilizado como fluido de trabalho num gerador de turbina de ciclo Brayton, que utiliza um gás (no caso o ar) como fluido de trabalho;
- Surgiu inicialmente como uma alternativa para se estocar energia em períodos de baixo consumo (horário de baixa) para ser utilizada em períodos de maior demanda (horário de pico).

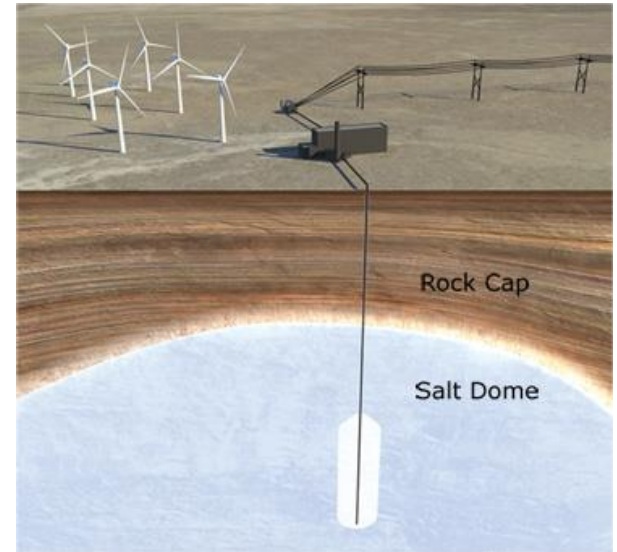
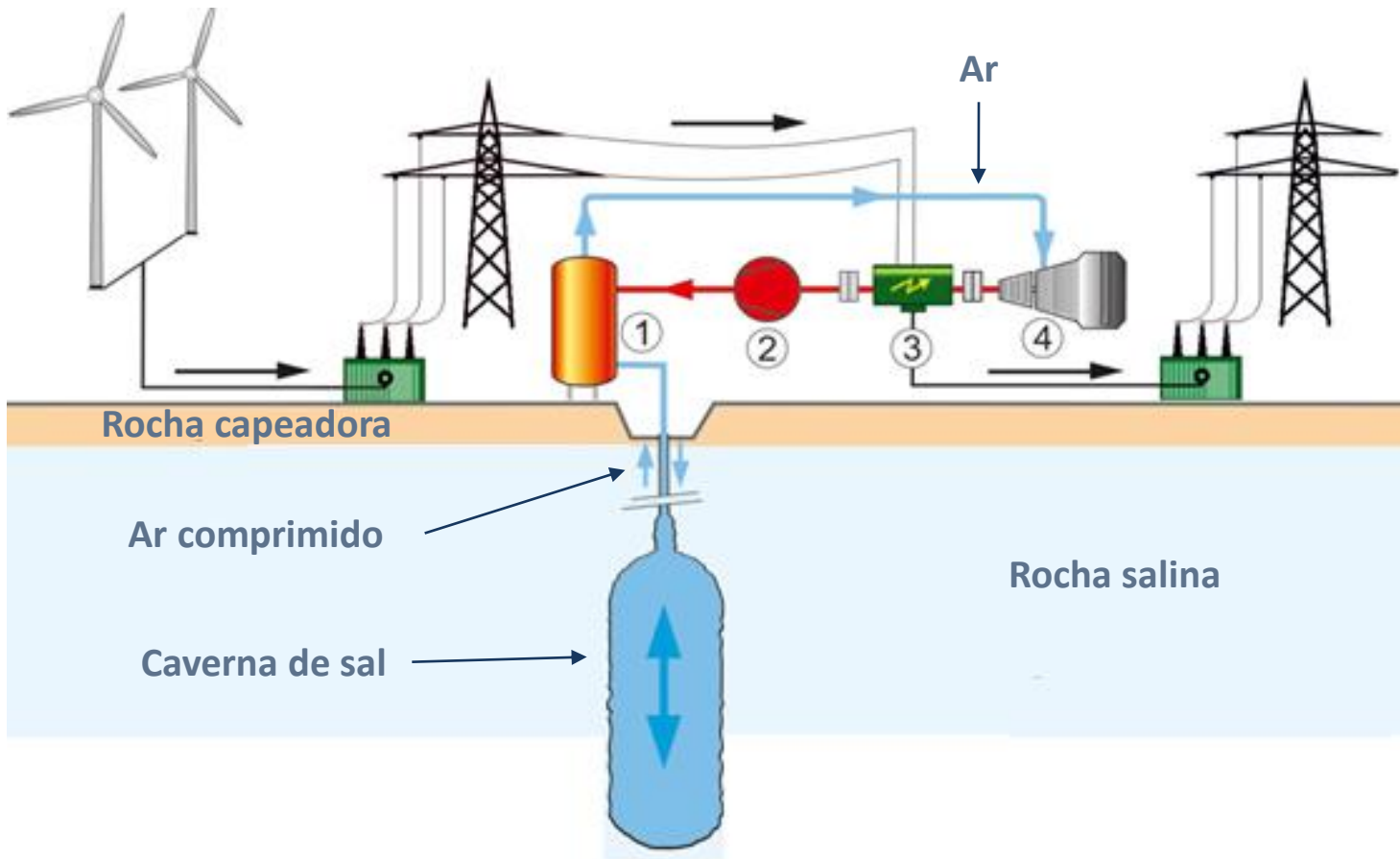


Ilustração de uma planta de CAES.

Funcionamento do sistema de armazenamento de energia por ar comprimido



Como funciona?

- **Ciclo 1 – Armazenamento de ar comprimido:**

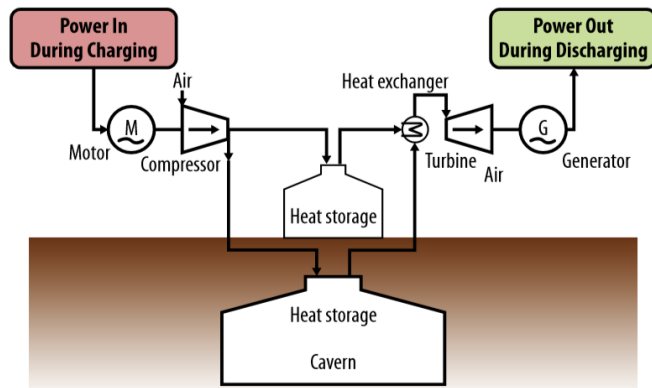
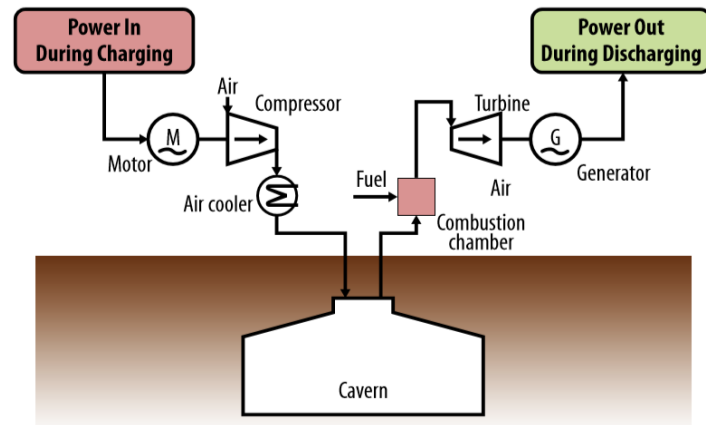
- O ar passa por um processo de filtração e desidratação;
- Energia elétrica produzida ou excedente alimenta um motor elétrico acoplado a um compressor (moto-compressor);
- A compressão do Ar libera calor, de forma que necessita passar por um processo de resfriamento para aumentar a capacidade armazenamento (compressibilidade);
- O Ar resfriado é comprimido e contido na caverna de sal.

- **Ciclo 2 – Conversão de potencial termo-elástico em eletricidade:**

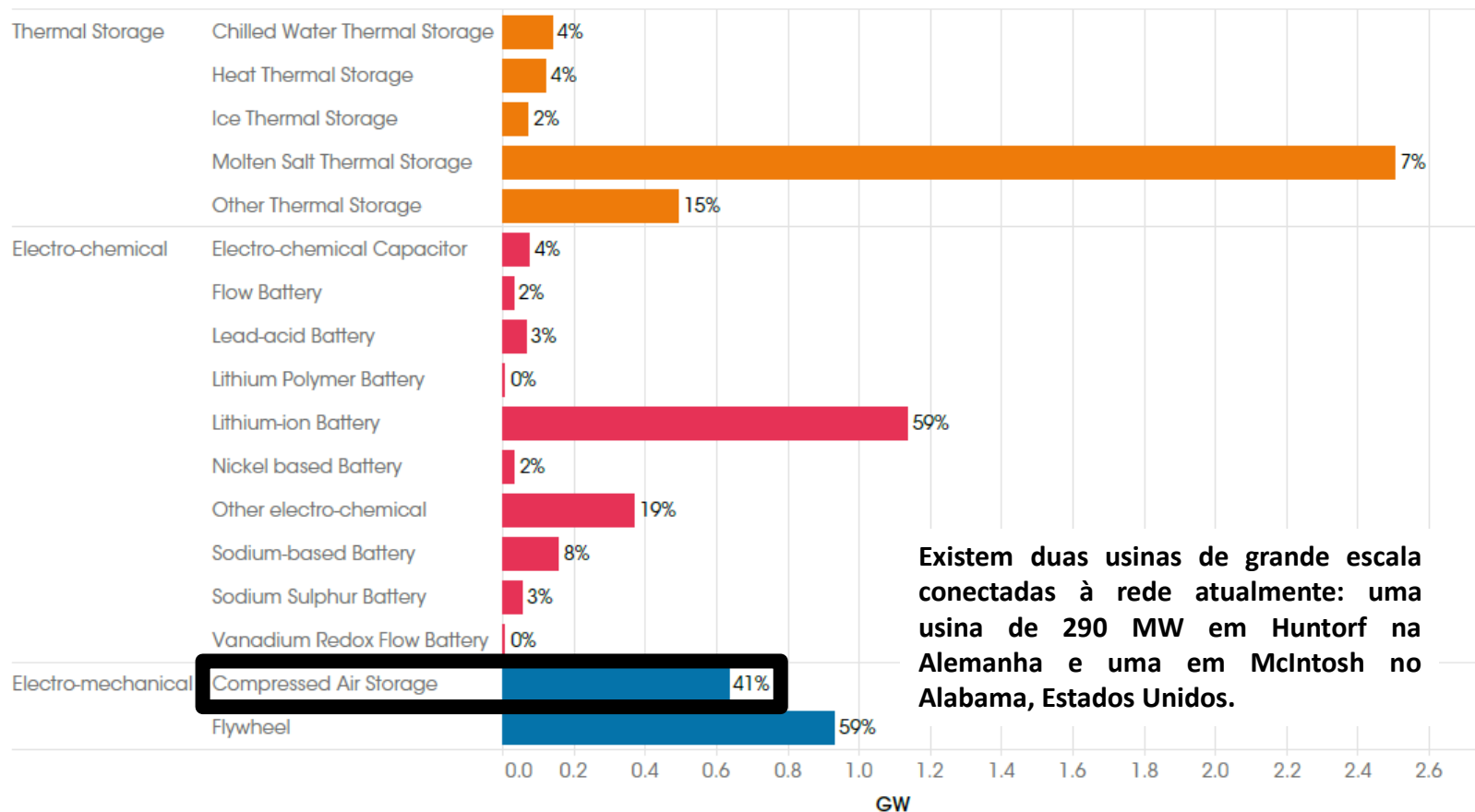
- O ar é liberado da caverna e irá perder temperatura ao se expandir, sendo necessário passar por processos de aquecimento antes da expansão, aumentando a eficiência do sistema;
- O ar é aquecido e posteriormente expandido em uma turbina. Esse processo pode ocorrer em um ou mais estágios;
- A turbina movimenta um gerador e energia elétrica é produzida e injetada na rede.

Tipos de tecnologia CAES

- **Diabática:** o ar comprimido é resfriado antes de ser injetado na caverna de sal e todo calor gerado pelo processo é perdido. Posteriormente, para aumentar a eficiência do processo, torna-se necessário o reaquecimento do ar antes dele ser utilizado na turbina de ciclo Brayton;
- **Adiabática (A-CAES):** o calor gerado durante a compressão é temporariamente armazenado num sistema de armazenamento de energia térmica. O calor armazenado é utilizado para o reaquecimento do ar antes dele ser expandido novamente e utilizado na turbina do gerador, eliminando a necessidade de um processo de combustão adicional;
- Uma instalação A-CAES é um sistema de **emissão “zero” de carbono** e puramente de conversão de eletricidade em potencial termo-elástico e em eletricidade novamente, com um perfil de desempenho e custos de investimento semelhantes ao CAES.



Participação das diferentes tecnologias de armazenamento na capacidade mundial instalada (Irena, 2017)



Mapeamento de investimento em P&D para o sistema CAES (Marcus, 2019)

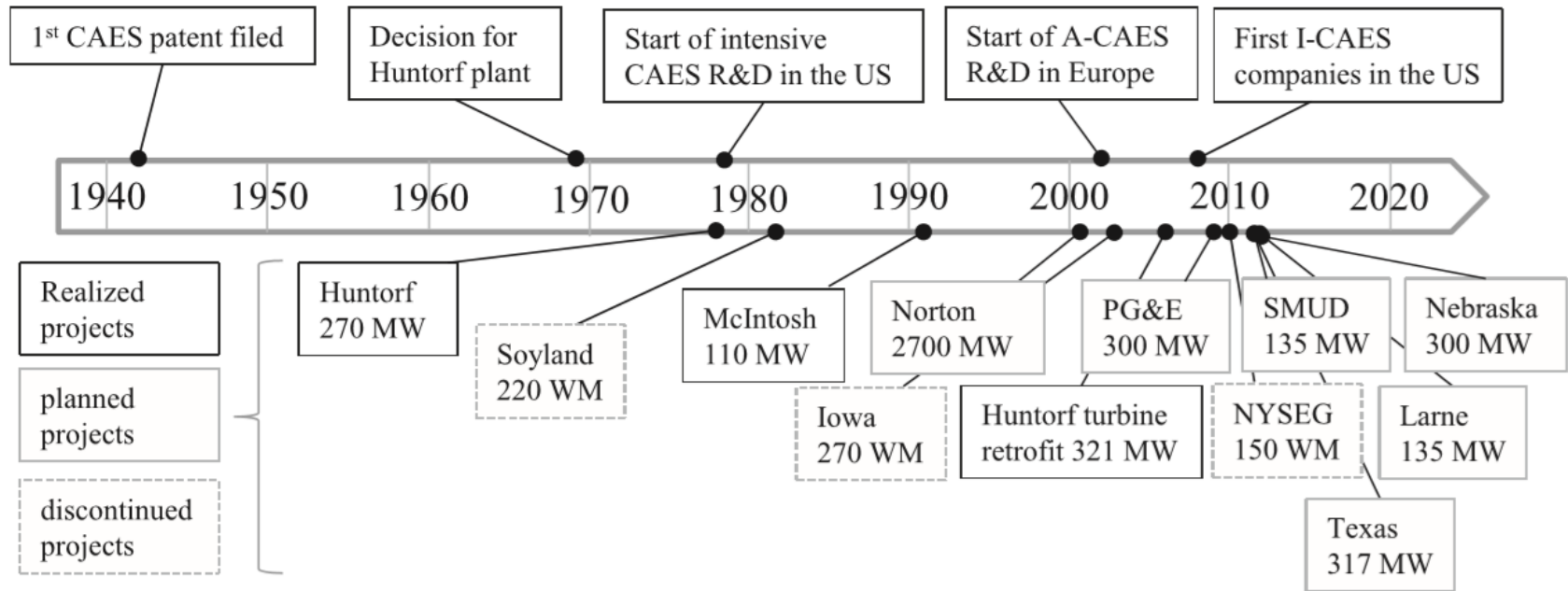
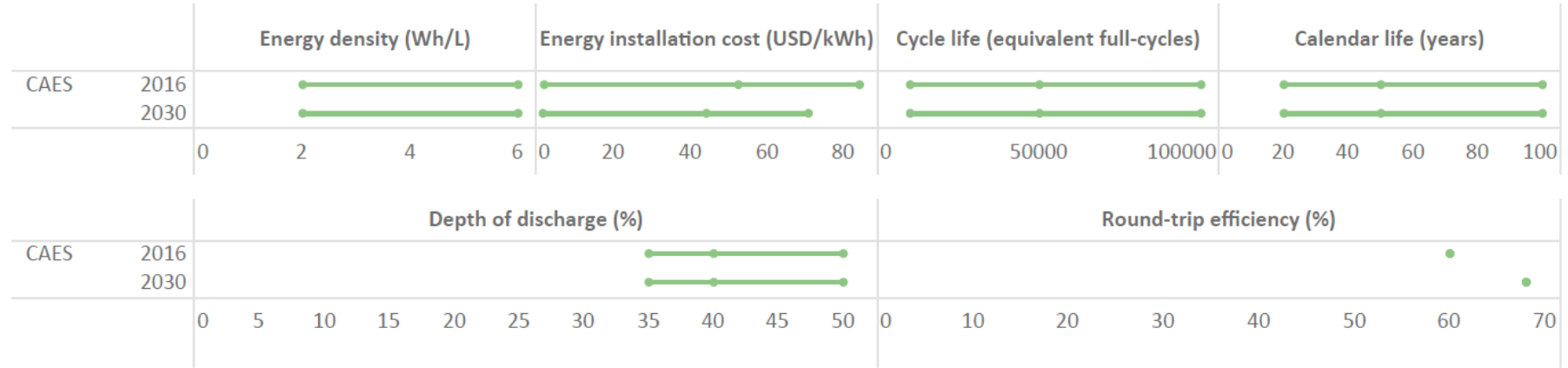


Fig. 1. Timeline of CAES R&D and industrial efforts; projects are not exhaustive and limited to the largest installations.

Características do sistema de armazenamento de energia por ar comprimido (Irena, 2017)



SUBCOMPONENT	SHARE OF TOTAL COSTS, 2016 (IN PERCENT)
Cavern	40
Turbine	30
Compressor	14
Owner's costs	7
Balance of plant	6
Engineering, procurement, construction management	3

Comparação de Parâmetros entre CAES, PHS, Baterias (Produção própria. Dados de Irena, 2017)

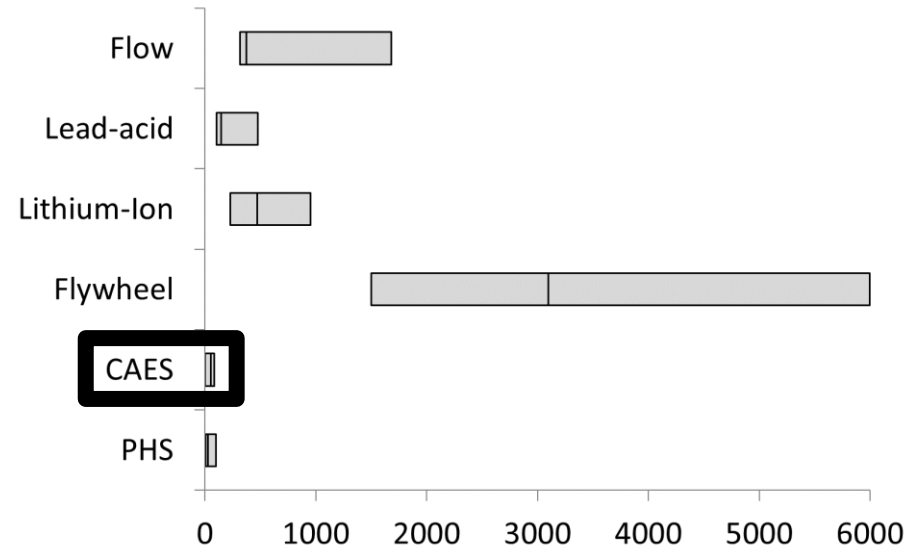
Vantagens do sistema CAES:

- Baixo custo de armazenamento;
- Baixo impacto ambiental;
- Não necessita de materiais raros;
- Potencial de armazenamento por vários meses x auto descarga das baterias;
- Pode ser de emissão zero de CO₂.

Desvantagens do sistema CAES:

- Eficiência de 60 à 70% x 90% das baterias x 80% do sistema de bombeamento de água;
- Pouco aplicável a sistemas de pequeno porte;
- Dependência de geologia adequada;
- Tecnologia menos madura, mas com grande potencial de desenvolvimento;

Comparação de custo de armazenamento por tecnologia em 2016 (USD/KWh).



Oportunidade do CAES no Brasil

- Geologia favorável, conhecimento acumulado geomecânica de rocha salina, aderência de políticas de incentivo para entrada das renováveis na matriz de geração elétrica;
- Novos projetos de hidrelétricas e reservatórios hídricos - ecológico e socialmente pouco viáveis atualmente;
- Sistema de armazenamento por bombeamento de água apresenta eficiência um pouco superior (70-80%) em relação ao CAES (60-70%), entretanto, com a intensificação das pesquisas tende a igualar com o passar do tempo;
- Para reservatórios já construídos o custo de armazenamento do sistema de bombeamento pode ser inferior ao CAES, entretanto, para projetos novos o CAPEX do CAES é significativamente inferior (usina de Belomonte > R\$ 30 bilhões);
- Depósitos salinos adequados para construção das cavernas onshore e offshore em águas rasas;
- Recente intensificação de P&D a nível mundial sobre o tema;
- Possibilidade de conversão de cavernas pré-existentes;
- Conhecimento acumulado sobre geomecânica de rocha salina no Brasil;

Sumário

- Importância dos sistemas de armazenamento para o pleno desenvolvimento da transição energética;
- Evolução da Matriz de geração elétrica brasileira;
- Sistemas de armazenamento existentes e aplicabilidade;
- Sistema CAES e potencial no Brasil;
- **Sugestões de alteração no texto do PNE 2050;**
- Referências.



Sugestões de alteração no texto do PNE 2050

- Colocar Tecnologias de armazenamento como um capítulo separado (*Capítulo VIII*), dada a sua importância ou, pelo menos, como uma seção dentro do *Capítulo V - Desafios e Recomendações por Fontes e Tecnologias Principais*. Atualmente, está como uma subseção escondida dentro de *Recursos Energéticos Distribuídos*. E, de fato, as tecnologias de armazenamento vão muito além de sistemas de geração distribuídos.

PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050

Tecnologias de Armazenamento

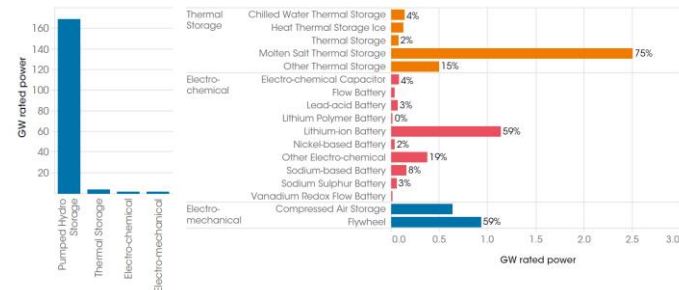
As tecnologias de armazenamento de energia auxiliam no preenchimento das lacunas temporais e geográficas entre a oferta e a demanda de energia elétrica. Podem ser classificadas em função de sua natureza como mecânicas (usinas hidrelétricas reversíveis (UHR), ar comprimido e volantes de inércia), químicas (hidrogênio e gás natural sintético), eletroquímicas (baterias), elétricas (supercapacitores e supercondutores magnéticos) ou térmicas (ar liquefeito, bombas de calor e sais fundidos). De acordo com suas aplicações, são capazes de prestar serviços à rede de forma centralizada ou distribuída, com variações na capacidade e na velocidade de carga e descarga.

Sugestões de alteração no texto do PNE 2050

- O texto marcado (pág 156) é contradito por outras fontes mais recentes. A UHR tem grande participação, mas não corresponde a mais de 99% da capacidade instalada global. Isso é contradito por Irena (2017), que indica 96%. Atualmente, esse valor deve ser ainda menor. Isso é importante para não parecer que a UHR é virtualmente a única solução disponível.

Dessas tecnologias, a UHR é a mais madura, compreendendo mais de 99% da capacidade instalada global de tecnologias de armazenamento de energia, avaliadas em mais de 141 GW (LANDRY e GAGNON, 2015). O armazenamento de energia de ar comprimido (CAES) é considerado próximo ao final da fase de demonstração e implantação e, portanto, perto da plena comercialização (DECOURT e DEBARRE, 2013 apud LANDRY e GAGNON, 2015).

Pumped hydro storage currently dominates total installed storage power capacity, with 96% of the total of 176 gigawatts (GW) installed globally in mid-2017. The other electricity storage technologies already in significant use around the world include thermal storage, with 3.3 GW (1.9%); batteries, with 1.9 GW (1.1%) and other mechanical storage with 1.6 GW (0.9%).



Sugestões de alteração no texto do PNE 2050

- **Sugerimos incluir outras recomendações, como:**
- Ajustes regulatórios para permitir a inclusão de outros sistemas de armazenamento centralizado, como CAES, para armazenamento sazonal;
- Ajustes regulatórios para permitir aumento da capacidade de sistemas de transmissão utilizando sistemas de armazenamento;
- Ajustes regulatórios para permitir arbitragem de preços utilizando sistemas de armazenamento;
- Inclusão dos sistemas de armazenamento centralizados e distribuídos nos modelos de planejamento, programação e despacho.

Recomendações:

1. *Mudanças na contabilização da garantia física de usinas hidrelétricas reversíveis*
Como a contribuição de uma UHR em termos de energia é em média negativa, não é possível atribuir uma garantia física seguindo a metodologia atual aplicada às hidrelétricas convencionais.
2. *Regulamentação do uso de sistemas de armazenamento junto à geração*
A combinação de baterias com geração eólica e fotovoltaica, inclusive híbridas, pode reduzir os efeitos da variabilidade da produção e permitir melhor uso da rede.
3. *Adequação dos modelos de planejamento, programação e despacho*
A representação adequada dos sistemas de armazenamento nos modelos de planejamento, programação e despacho é essencial para a solução otimizada do Sistema Elétrico. Um importante tópico nesse tema é a menor discretização horária dos modelos de planejamento, fazendo com que a valoração dessa tecnologia seja melhor realizada.

Sugestões de alteração no texto do PNE 2050

- Sugerimos uma reavaliação das rotas prioritárias dos investimentos. Especialmente considerando sistemas centralizados. Acreditamos que tecnologias como CAES merecem maior destaque, especialmente considerando a geologia favorável do país.

Tabela 9. Rotas prioritárias dos investimentos em P&D de tecnologias de armazenamento de energia

Prioridade	Rota Tecnológica
1	BMS – Battery Management Systems
2	Baterias
3	Bombeamento Reverso
4	Supercapacitores
5	Armazenamento energético em forma de gás
6	Volante de inércia
7	Armazenamento térmico com e sem transformação de fase
8	Termoquímicos (reatores)
9	CAES - armazenamento de energia de ar comprimido
10	LAES - armazenamento de energia de ar liquefeito
11	Supermagnetos

Fonte: CGEE (2018).

Referências

- ANEEL, 2020. Nota Técnica nº 094/2020-SRG/ANEEL.
- Budt , M., Wolf D., Span, R., Yan, J., A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, Applied Energy, Volume 170, 2016, Pages 250-268, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108>.
- Daniele De Oliveira Bandeira, Gilberto Kwitko Ribeiro, et al. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**.
- International Renewable Energy Agency (2017, October). Electricity Storage And Renewables: Costs And Markets To 2030.
- Lazard, 2017. Lazard' S Levelized Cost Of Storage Analysis - Version 3.0.