



Empresa de Pesquisa Energética

Sumário Executivo

Roadmap Tecnológico de Recursos Energéticos Distribuídos

Dezembro de 2024



Ministério de
Minas e Energia



Valor Público

Os Recursos Energéticos Distribuídos (RED) representam uma mudança de paradigma no setor elétrico brasileiro (SEB). Integrá-los ao planejamento decenal e de longo prazo é essencial para orientar políticas públicas, novos investimentos e a operação do SEB. Nesse sentido, destaca-se o papel da regulação e do desenho de mercado não apenas na velocidade da difusão destes recursos, mas também em como os agentes do SEB, do consumidor final ao operador do sistema, serão impactados por esta mudança de paradigma.

A EPE vem analisando o tema sistematicamente no âmbito do planejamento decenal (PDE) e de longo prazo (PNE) e, em complemento, as análises apresentadas neste caderno ajudam a reduzir a assimetria de informação entre os agentes, fornecendo subsídios para uma melhor tomada de decisão por parte de entidades públicas e privadas. Em parceria com o **Itaipu Parquetec**, o presente caderno apresenta uma síntese dos resultados analisados na difusão de RED sob a ótica tecnológica e regulatória, resultando em um *roadmap* com ações de curto, médio e longo prazo.

Tecnologias

Recursos Energéticos Distribuídos (RED)

Recursos Energéticos Distribuídos consistem em um conjunto fontes ou potenciais de conversão de energia, assim como recursos para armazenamento e redução de consumo, geralmente localizados junto a unidades consumidoras.

Recursos que compõem o conceito de RED



O Roadmap foca inicialmente em dois destes recursos:

- **Geração Distribuída**, definida como recursos de geração de energia localizados dentro dos limites sistêmicos da distribuição de eletricidade (ACKERMANN, 2001)
- **Armazenamento Distribuído**, analisado como tecnologias de estocagem da geração excedente através de processos eletroquímicos, mecânicos, térmicos, químicos ou elétricos.

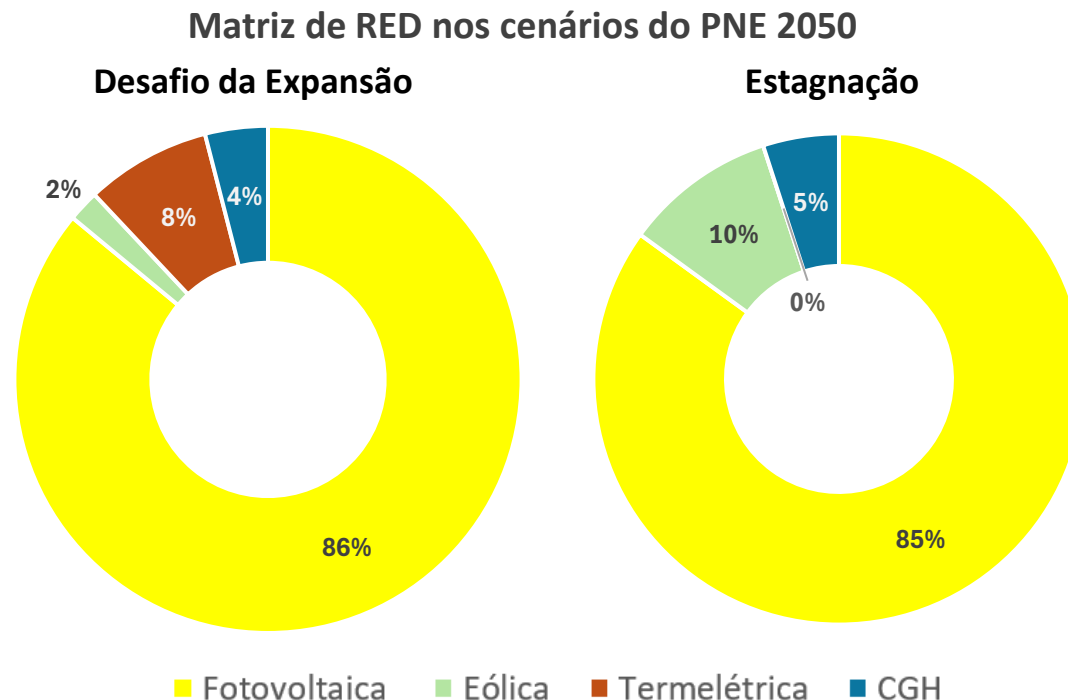
Fonte: Adaptado de EPE (2020a), com base em IRENA (2019)

Geração Distribuída

Panorama

- A expansão da GD fotovoltaica superou as projeções no Brasil e no mundo, representando **a maioria dos projetos** de pequena escala;
- A GD eólica possui potencial econômico altamente sensível à presença de políticas de incentivo e **redução de custos**. A transformação do potencial econômico em capacidade instalada está associada à disponibilidade de áreas com recursos eólicos adequados e maiores tarifas de eletricidade (menor *payback*);
- Tal como na eólica, a biomassa apresenta rotas tecnológicas dominadas, cuja competitividade dependerá de fatores como os **custos de investimento e das matérias-primas**;
- Microrreatores nucleares têm surgido como solução para aplicações descentralizadas, sobretudo em **indústrias e áreas remotas**, mas os projetos encontram-se em fase de desenvolvimento e testes.

As perspectivas de médio e longo prazo apontam para uma maior **diversificação de fontes**



Fonte: EPE (2020a)

A difusão de novas rotas dependerá de uma análise da relação entre a aplicação pretendida e os custos específicos de cada fonte e processo tecnológico.

Armazenamento Distribuído

Panorama

- Tecnologias de armazenamento possuem uma **variedade de aplicações e escalas**, a depender da rota tecnológica utilizada;
- Em sistemas residenciais, a difusão do armazenamento tem sido motivada por **consumidores com sistemas de GD** que utilizam baterias para uso noturno do excedente de geração solar.

Em 2023, mais de **70% dos novos sistemas** de GD comercializados já eram associados a sistemas de armazenamento na Alemanha e na Itália (BNEF, 2023)

- No longo prazo, a adoção de sistemas de armazenamento depende de (PRASANNA *et al*, 2021):
 - Redução de custos das baterias;
 - Valoração dos serviços prestados ao sistema;
 - Presença de tarifas de eletricidade variáveis.

Futuro das tecnologias de baterias

Fonte: GREENER (2021)

Cenário	Comentário
Mercado dominado por uma ou duas tecnologias âncora. Demais tecnologias serão para aplicações de nicho.	Cenário plausível . Mobilidade elétrica atualmente está pautada em baterias de lítio, que também devem avançar no mercado estacionário. Baterias de chumbo para aplicações “clássicas”, como <i>backup</i> .
Coexistência de diversas tecnologias (lítio para mobilidade elétrica e baterias de fluxo, ar-zinco e chumbo para aplicações estacionárias)	Possível, mas menos provável . Novas tecnologias exigem investimentos muito elevados. A fragmentação da demanda pode resultar em redução de ganhos de escala.
Surgimento de uma ou poucas novas ‘killer technologies’	Possível, mas pouco provável no curto e médio prazo

No caso brasileiro, as perspectivas de difusão no curto e médio prazos estão centradas em **aplicações de nicho**, sobretudo em sistemas isolados e serviços específicos na transmissão e distribuição (T&D).

Maturidade tecnológica

Geração Distribuída



Fotovoltaica (TRL 9)

Há desenvolvimentos mais recentes, sobretudo em células de filme fino orgânico e perovskita, que ainda estão em fase de estabilização e teste de durabilidade (TRL 5-6).



Biomassa (TRL 8-9)

Rotas tecnológicas amplamente disseminadas. Há potencial para ampliação da participação na difusão de MMGD, a depender dos custos.



CGH (TRL 8-9)

Tecnologia madura e eficiente, mas com possibilidade de desenvolvimento tecnológico para aprimoramentos em turbinas.



Eólica (TRL 9)

Apesar do nível de maturidade tecnológica (em operação), aplicações ainda são restritas em função do custo e cadeia de fornecimento com diversidade limitada.

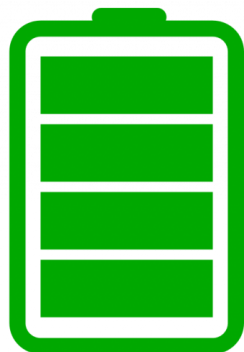


Nuclear (TRL 6-7)

Microrreatores (até 10MWe) ainda se concentram nos estágios iniciais da cadeia de desenvolvimento, mas a diversidade de aplicações, sobretudo descentralizadas, tem levado à ampliação de projetos.

Maturidade tecnológica

Armazenamento

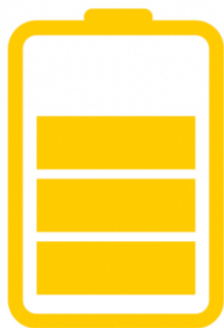


Eletroquímico (TRL 8-9)

Baterias de íon de lítio e chumbo ácido são amplamente utilizadas em aplicações distribuídas. Ainda assim, há novas tecnologias eletroquímicas em desenvolvimento (P&D e fase pré-comercial, TRLs entre 1 e 7)

Elétrico (TRL 9)

Supercapacitores são tecnologias de armazenamento elétrica com maturidade em escala comercial, com aplicações na prestação de serviços ancilares e em serviços atrás do medidor.



Mecânico (TRL 5-9)

Tecnologias de ar comprimido adiabático (A-CAES) apresentam TRL 5-6 (demonstração), enquanto as de ar comprimido diabático (D-CAES) e ar líquido (LAES) apresentam desenvolvimento tecnológico entre 7 e 8 (comissionamento)

Químico (TRL 6-9)

O hidrogênio é apresentado como armazenamento químico, com TRL variando de acordo com a aplicação. Em geral, os desafios tecnológicos se concentram na logística entre a produção e consumo final.

Térmico (TRL 6-9)

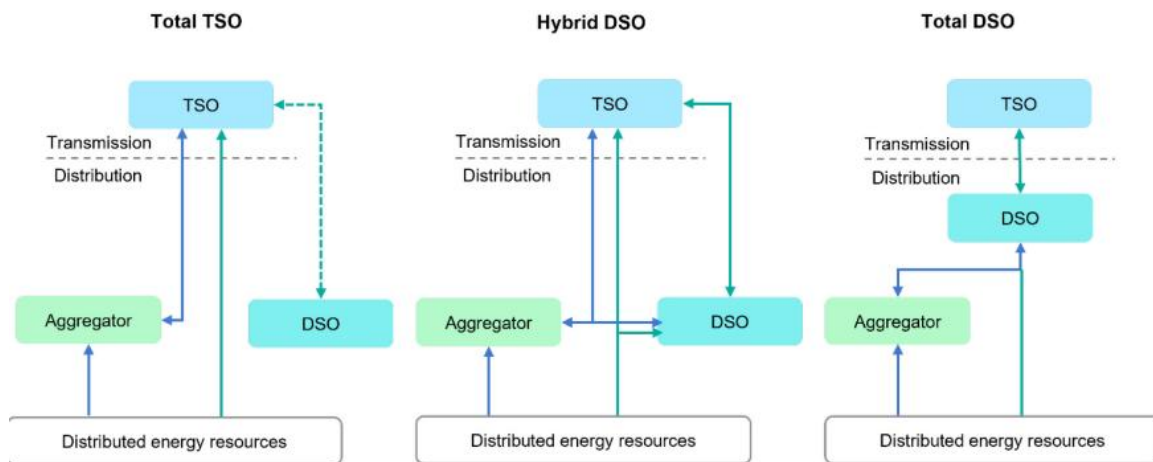
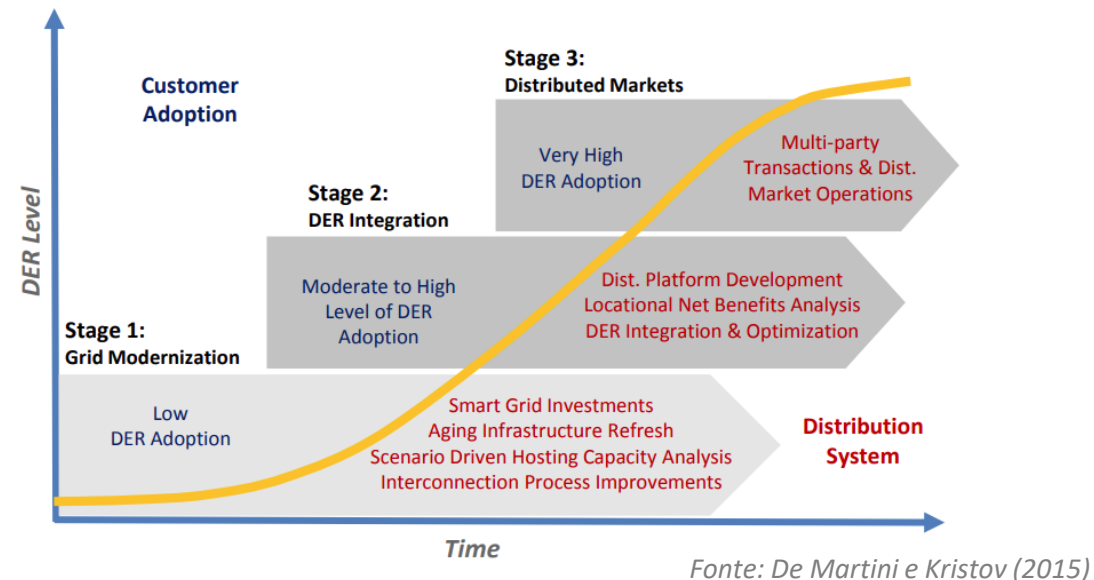
O armazenamento térmico sensível e latente têm TRLs que vão de 4 a 9, indicando a presença de tecnologias maduras, mas também uma gama de novos desenvolvimentos.

Regulação

O sistema de distribuição tem evoluído com a inserção de RED...

- O processo de difusão de RED marca a transição de um modelo predominantemente centralizado para sistemas híbridos, com maior grau de descentralização e, por consequência, maior complexidade (EPE, 2018);
- Assim, serão necessárias novas práticas de planejamento da expansão e operação da geração e das redes de energia elétrica;
- De Martini e Kristov (2015) apresentam um modelo de evolução do sistema de distribuição associado à difusão de RED como uma combinação do resultado de políticas de incentivo e da escolha dos consumidores (figura à direita).

Evolução do sistema de distribuição em função do nível de difusão de RED



Fonte: IEA (2022)

Os impactos, no entanto, não se restringem à distribuição

- Diferentes modelos de cooperação entre os operadores da transmissão (TSO) e da distribuição (DSO) são vislumbrados (figura à esquerda), considerando a relação destes com os RED e a figura do agregador.

... E o próprio papel da distribuidora tem se modificado

A crescente inserção de RED no sistema de distribuição requer uma operação mais ativa das distribuidoras, exercendo **novos papéis e responsabilidades**.

A difusão de RED está associada a um conjunto de desafios, como:

- A mudança nos *drivers* de custos das distribuidoras, além do comportamento do consumidor e dos novos usos do sistema de distribuição; e
- O aumento da incerteza associada às necessidades da rede;
- Atualização dos modelos regulatórios para atender às novas necessidades de despesas de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX)



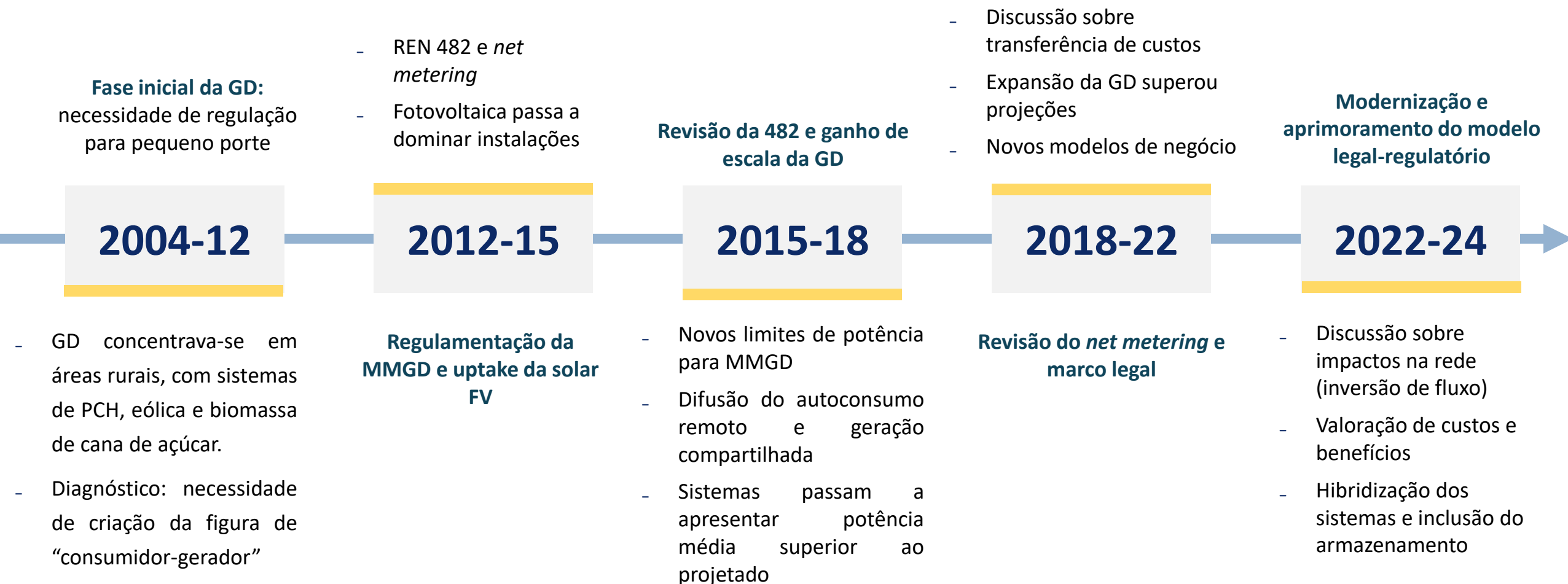
A superação destes desafios e a inserção eficiente de RED no sistema de distribuição exige um conjunto de adequações regulatórias.

Elementos promotores da inserção eficiente de RED



Fonte: EPE (2020b)

No Brasil, a GD tem um amplo histórico de evolução regulatória...



... e o armazenamento tem sido pauta de discussões recentes

A regulação do armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro tem se desenvolvido de forma gradual. Espera-se que, no médio-longo prazo, com redução de custos e o aprimoramento regulatório, aplicações distribuídas comecem a ganhar escala.

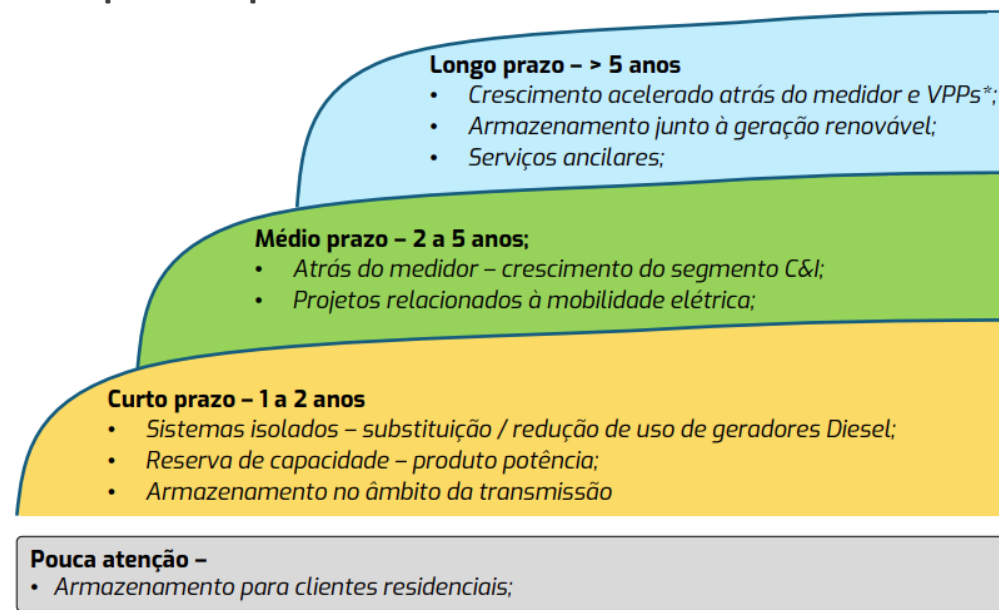
- A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu, em 2022, um **roadmap para regulamentação do armazenamento de energia**:

Ciclo 1 (2023 – 2024)	Regulamentação de conceitos gerais do armazenamento, outorga e acesso à rede, com exceção de usinas hidroelétricas reversíveis (UHR) de ciclo aberto
Ciclo 2 (2024 – 2025)	Estudo de inventário para UHR de ciclo aberto e avaliação sobre Sandboxes Regulatórios, com foco na flexibilização a respeito do “empilhamento de receitas” (<i>value stacking</i>)
Ciclo 3 (2026-2027)	Foco em novos modelos de negócio, como agregadores; e avaliação de impactos nos modelos computacionais e programação da operação e formação de preços de curto prazo.

Fonte: ANEEL (2022a)

A partir de entrevistas com agentes, o estudo do **E2Brasil** identificou os segmentos de mercado prioritários para o armazenamento no Brasil, com foco nos consumidores comerciais e industriais (C&I) emergindo no médio prazo. Em contrapartida, o segmento residencial não é identificado como prioridade no horizonte analisado.

Perspectivas para a difusão do armazenamento no Brasil



Fonte: E2BRASIL (2022)

Na experiência internacional, isso não é diferente

Em diversos países, nota-se a presença de **adequações regulatórias** para a **integração eficiente dos RED**. Em alguns casos, há uma perspectiva de **evolução gradual do desenho de mercado** para ampliar a participação dos consumidores e protagonismo destes recursos.



Austrália

- Incentivos à adoção de RED como alternativa sem fio pela distribuidora;
- *Roadmap* de RED visando integração total nos mercados.



Nova Iorque

- Evolução da política de remuneração aos RED e modelo de distribuidora



Califórnia

- Caso emblemático na difusão de GD e políticas de incentivo



Chile

- Lições com a difusão de medição inteligente
- Aprimoramentos em GD para inclusão do AD



Alemanha

- Caso emblemático de tarifa feed-in;
- Emergência de comunidades energéticas



Reino Unido

- Incentivos à inovação, incluindo sandboxes e mercados locais de flexibilidade;
- Teste de novos modelos de regulação econômica



Itália

- Exemplo no roll-out de medidores inteligentes
- Arcabouço regulatório de usinas virtuais



Colômbia

- Experiência recente com comunidades energéticas
- Proposta de ajustes na regulação da distribuição

O *roadmap* regulatório

A construção do *roadmap*



Revisão da Literatura

Identificação dos principais desafios e questões regulatórias, considerando: políticas de incentivo, desenho de mercado, modernização de tarifas, operação do sistema e regulação econômica



Histórico Nacional

Análise dos processos regulatórios sobre GD e AD na ANEEL.



Experiência Internacional

Insights a partir de experiências recentes de países como Austrália, Alemanha, EUA, Chile, Itália e Colômbia.



Roadmap Regulatório

Sistematização de propostas regulatórias de curto, médio e longo prazo.



Curto prazo
(2025-35)



Médio prazo
(2035-45)



Longo prazo
(2045-55)



Modernização das tarifas e sinais econômicos

Avaliar resultados dos **sandboxes tarifários**

Estabelecer metod. de **valor. de custos e benefícios** da MMGD

Implementar tarifas pelo menos **binômias**, com variação **temporal**

Estabelecer **plano de comunicação** com os consumidores

Avaliar evolução para **granularidade locacional** nos sinais econômicos a nível da distribuição

Acompanhar regra de transição da **Lei nº 14300 (MMGD)** e impactos em termos de subsídios



Digitalização do sistema de distribuição

Avaliar resultados da **TS 13/24** (medição inteligente)

Estabelecer **plano de comunicação** com os consumidores

Avaliar diretrizes para adoção de modelo de **open energy**

Desenvolver **plano de implementação** de medidores inteligentes

Considerar aspectos de **cibersegurança e privacidade**



Desenho de mercado

Regulamentação inicial do **armazenamento de energia** (CP 39)

Explorar programas de **eficiência energética** e **resposta da demanda** baseados em economia comportamental

Estabelecer **serviços** que poderão ser prestados pelo **armazenamento** (ex: através de agregadores)

Avaliar criação de **novos serviços ancilares** (e.g. através de pilotos)

Aprimorar **regulação de RD**

Avaliar a criação de **mecanismo concorrencial** para contratação de serviços ancilares

Estabelecer **arcabouço de interação** entre DSO, ONS e fornecedores de serviços ancilares

Itens da agenda regulatória ANEEL

Recomendações EPE/Modernização MME

Recomendações TS 11/2021 ANEEL

Tendências internacionais





Curto prazo
(2025-35)



Médio prazo
(2035-45)



Longo prazo
(2045-55)



**Operação do
sistema de
distribuição**

Compartilhar **dados topológicos das redes de distribuição** com o planejamento da G&T e o operador

Avaliar **Planejamento Integrado de Recursos**, considerando T & D

Uso obrigatório de **inversores inteligentes** em GD

Avaliar a implementação de **mecanismo local de contratação de serviços** para a rede de distribuição

Estabelecer **comunicação e controle remoto** do sistema de GD pela distribuidora



**Regulação
econômica**

Revisar modelo regulatório **baseado em ativos**

Permitir o **uso de NWA** e avaliação pelo PDD

Avaliar a criação de **incentivos baseados no resultado**

Avaliar a adoção de **visão prospectiva** na definição da receita



**Novas atividades
e modelos de
negócio**

Regulamentar **microrredes e usinas virtuais**

Avaliar a possibilidade de **contratos bilaterais** entre consumidores e GD (transação P2P)

Regulamentar aplicação de **sandbox regulatório** para novas atividades

Itens da agenda
regulatória ANEEL

Recomendações EPE/
Modernização MME

Recomendações
TS 11/2021 ANEEL

Tendências
internacionais



Considerações finais

Considerações Finais

O **Roadmap Tecnológico de RED** teve como objetivo estabelecer uma visão ampla sobre as tendências tecnológicas, legais e regulatórias associadas a difusão dos RED, com foco na geração e armazenamento distribuídos.

- Sob a ótica da tecnologia, a redução dos custos, modularidade dos sistemas e a disponibilidade do recurso solar viabilizou a rápida **difusão da GD fotovoltaica**.
- Outras fontes, como centrais geradoras hidrelétricas (CGH) e térmicas de cogeração, também têm contribuído para a expansão, mas, em geral, são projetos que exigem **condições bastante específicas e de disponibilidade limitada**. Já a geração eólica teve uma evolução para turbinas cada vez maiores e mais **eficientes economicamente**, tirando o foco para os geradores e usinas de GD.
- As tecnologias de GD possuem escala de maturidade elevada. Em contraponto, a maturidade tecnológica do armazenamento varia de acordo com a **tecnologia e aplicação**. Para aplicações distribuídas, a perspectiva é de que desenvolvimento de novos projetos e a redução de custos compense perdas com potenciais ganhos de escala.
- A consolidação do armazenamento pelo lado da demanda (e dos RED, em geral) depende de **ajustes regulatórios**, como a definição de padrões técnicos e operacionais, o estabelecimento de estruturas de remuneração claras, a permissão para que os operadores de rede obtenham serviços de flexibilidade destes recursos e a permissão de participação de agregadores e RED nos mercados de eletricidade, movimento que vem se estabelecendo na experiência internacional.
- Dentre os tópicos para pesquisas futuras, destacam-se a ampliação do escopo de análise acerca do tema da **descentralização**, incluindo outros energéticos (como biocombustíveis líquidos, biogás e biometano a partir de resíduos sólidos urbanos e hidrogênio) e a **integração com outros RED**, incluindo a avaliações de nichos de mercado e novos modelos de interação (como microrredes e usinas virtuais).

Roadmap Tecnológico de RED | Metodologia e referências

METODOLOGIA

Nível de Maturidade Tecnológica (TRL)

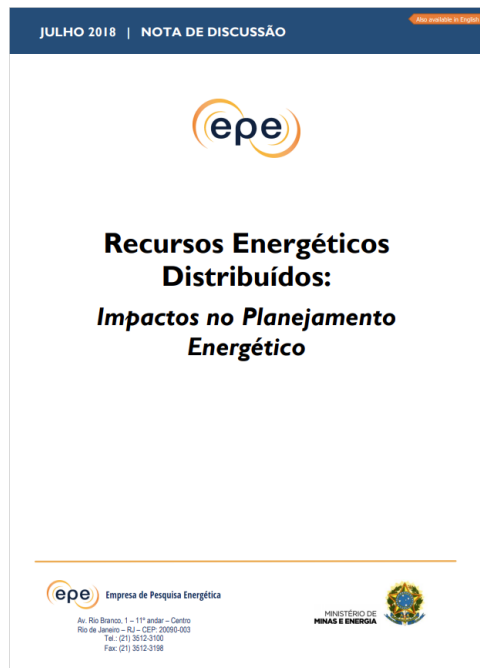
TRL	Classificação	Descrição	Relação com a cadeia de inovação
1	Pesquisa básica	Fase de ideias	Pesquisa básica dirigida
2		Pesquisa exploratória baseada num conceito tecnológico e/ou ideia de aplicação (demonstração preliminar)	
3		Pesquisa sistemática baseada no mínimo de resultados favoráveis	Pesquisa aplicada
4	Desenvolvimento tecnológico	Validação dos componentes da tecnologia em ambiente de laboratório	Desenvolvimento experimental
5		Validação dos componentes da tecnologia em ambiente relevante	
6	Demonstração da tecnologia	Avaliação do protótipo ou modelo representativo num ambiente relevante	Cabeça de série
7	Comissionamento da tecnologia	Avaliação da tecnologia próximo do real em ambiente operacional	
8		Num sistema real, a tecnologia demonstrou validar as condições especificadas	Lote pioneiro
9	Em operação	Tecnologia pronta para ser comercializada	Inserção no mercado

Fonte: ANEEL (2022b)

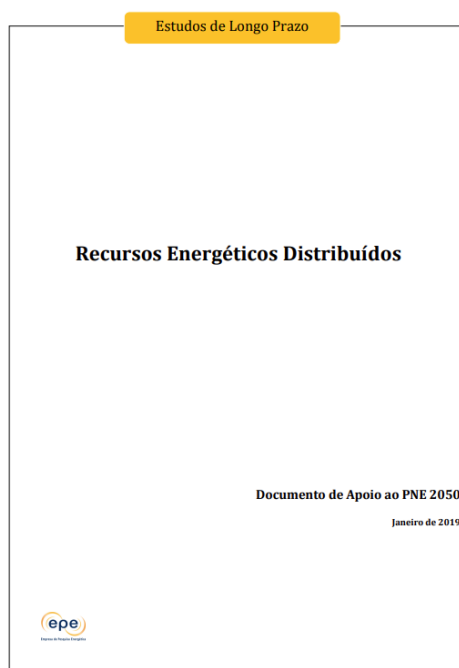
REFERÊNCIAS

- ANEEL. Nota Técnica nº 137/2022-SRG/ANEEL. Brasília, DF: ANEEL, 2022a.
- ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.045, DE 4 DE OUTUBRO DE 2022. 2022b. Acesso em 03 de janeiro de 2024.
- BNEF – BloombergNEF. Scaling the Residential Energy Storage Market. November, 2023.
- DE MARTINI, P.; KRISTOV, L. Distribution systems in a high distributed energy resources future: Planning, Market Design, Operation and Oversight. Future Electric Utility Regulation, Berkeley Lab. Report nº 2. October, 2015. Disponível em: <https://emp.lbl.gov/publications/distribution-systems-high-distributed>
- E2BRASIL – Projeto DKT Armazenamento. Apresentação de Resultados. Florianópolis, 2022.
- EPE. Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético. Nota de discussão. Brasília: MME/EPE, 2018.
- EPE. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME/EPE, 2020a.
- EPE. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Brasília: MME/EPE, 2020b.
- IEA. Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources: Power system opportunities and best practices. IEA, 2022
- PRASANNA, Ashreeta; MCCABE, Kevin; SGRIN, Ben Sigrin; BLAIR, Nate. Storage Futures Study: Distributed Solar and Storage Outlook: Methodology and Scenarios. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2021.

Publicações anteriores da EPE sobre o tema



Recursos Energéticos Distribuídos: Impactos no Planejamento Energético
(Publicado em 2018)



Recursos Energéticos Distribuídos
(Publicado em 2019)



Plano Nacional de Energia 2050
(Publicado em 2020)



Micro e Minigeração Distribuída & Baterias Atrás do Medidor
(Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034, publicado em junho de 2024)



Clique nas imagens para acessar as publicações no [site da EPE](https://www.epe.br).



Diretor

Thiago Ivanoski Teixeira

Coordenação Técnica

Carla da Costa Lopes Achão

Gustavo Naciff de Andrade

Luciano Basto Oliveira

Equipe Técnica

Arthur Mendonça Quinhones Siqueira

Caroline Chantre Ramos

Gabriel Konzen



Coordenação Executiva

Daniel Cantane

Coordenação Técnica

Dan Yushin Miyaji

Bolsistas

Jeydson Lopes

Roberto Asano



EPE

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

Praça Pio X, n. 54

Centro – Rio de Janeiro – RJ

CEP: 20091-040



MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

