

O Papel das Baterias Eletroquímicas para a Transição Energética no Brasil:

Uma Perspectiva da Integração de Energias Renováveis

Autores: Cristina da Silva Rosa e Paulo Giovane Pereira da Silva

Orientador: Nivalde de Castro

Área de conhecimento: Economia da Energia e Meio Ambiente.

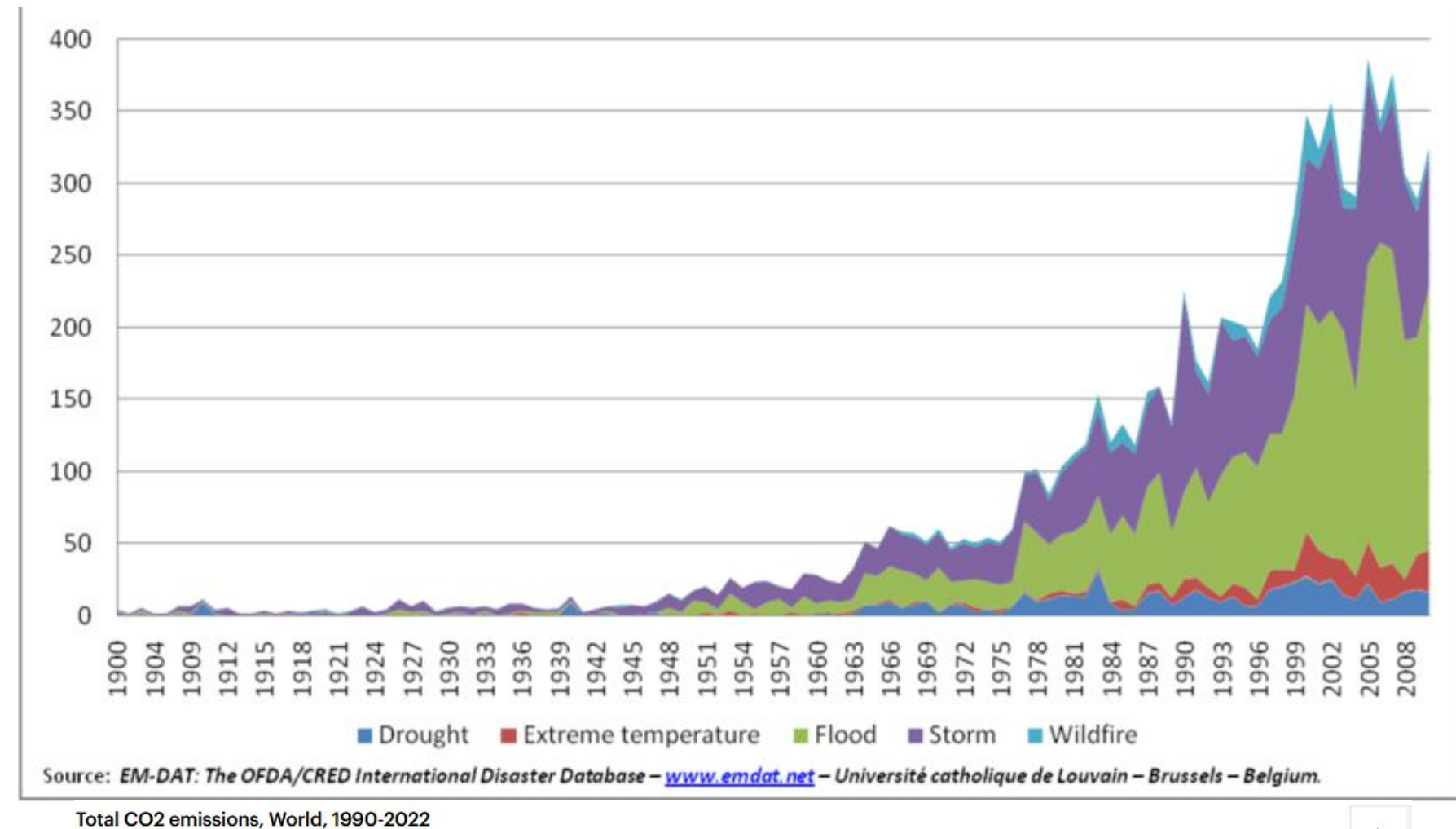


SUMÁRIO

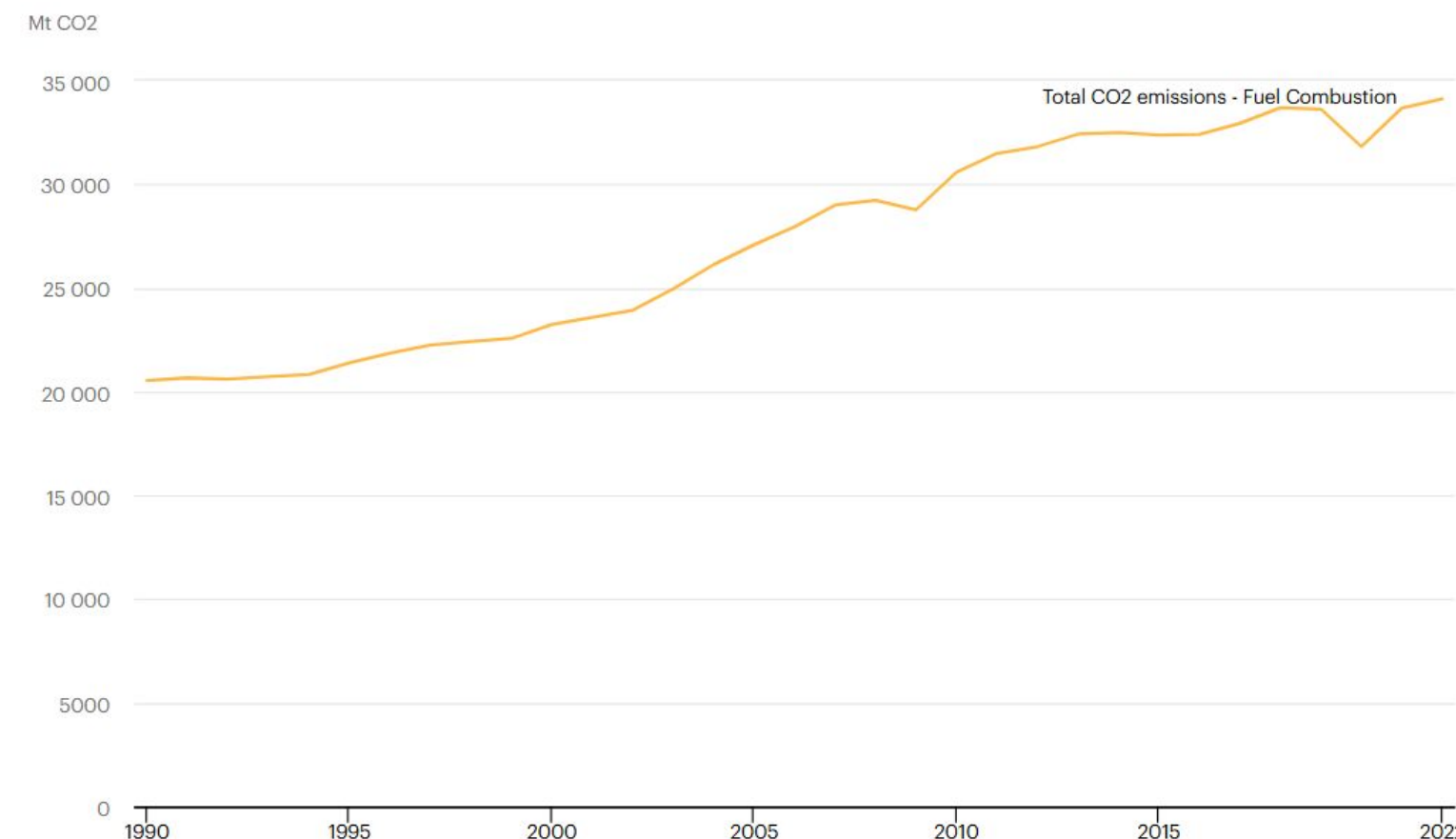
- Contexto Global
- Contexto Nacional
- Baterias Eletroquímicas
- Objetivos
- Metodologia
- Desafios e Soluções
- Conclusão

CONTEXTO GLOBAL

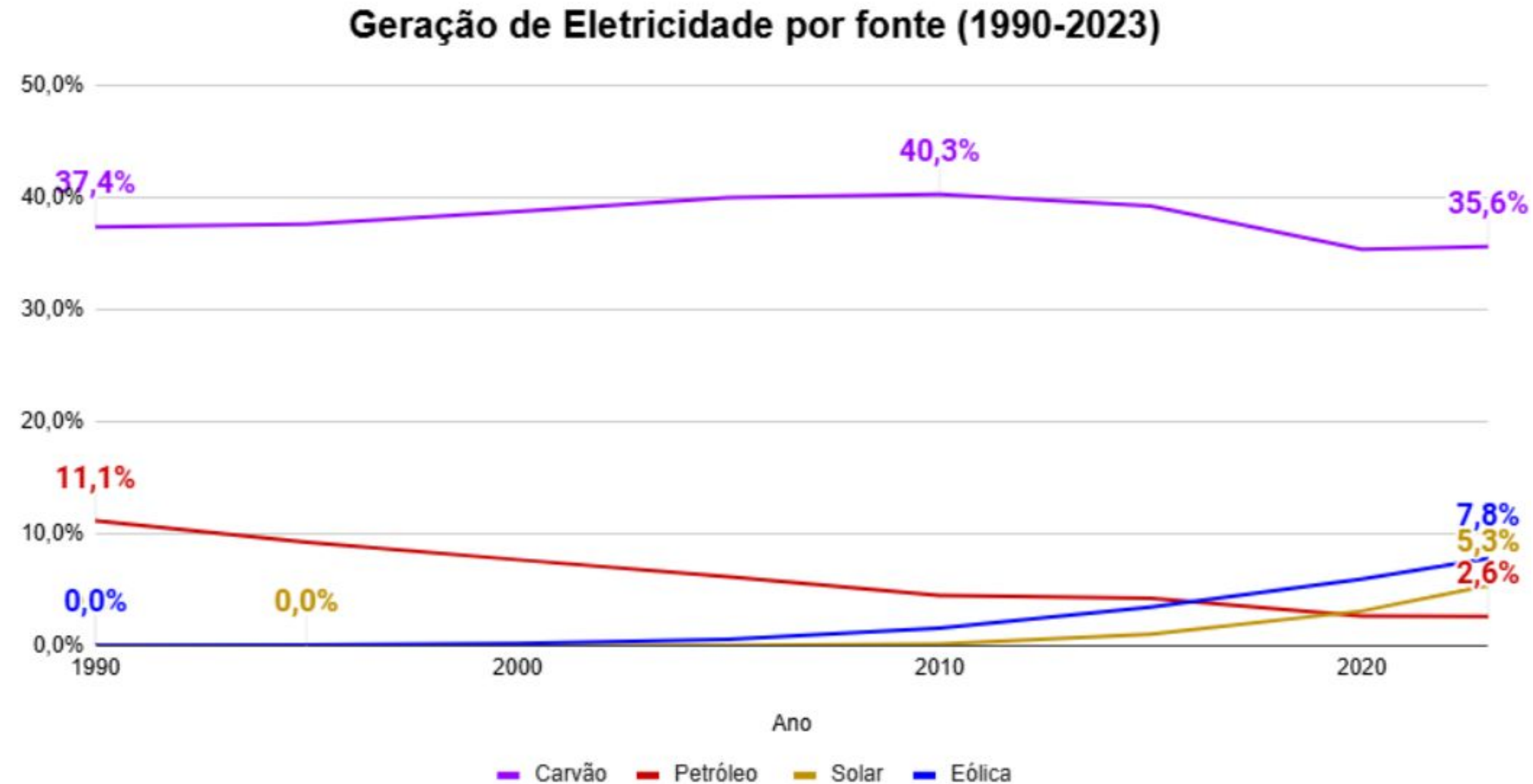
- O aumento das emissões de CO₂ e a intensificação de eventos climáticos extremos evidenciam a gravidade da crise climática global.
- A transição energética surge como uma das principais estratégias para mitigar esses impactos, ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis.
- Esse processo demanda uma reestruturação profunda dos sistemas de produção e consumo de energia.



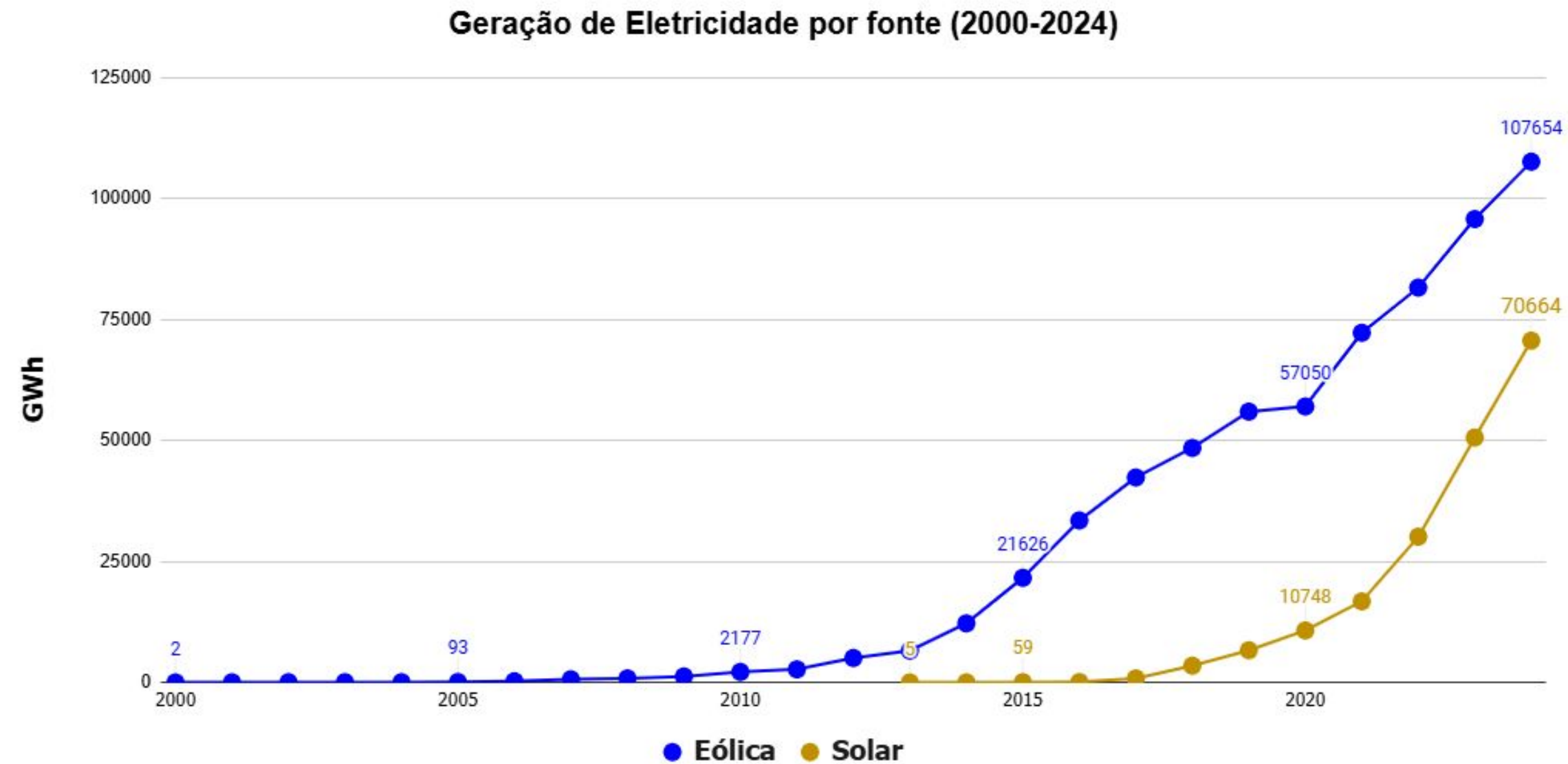
Total CO2 emissions, World, 1990-2022



- Mudança da matriz energética: de combustíveis fósseis e grandes hidrelétricas para fontes renováveis.
- Crescimento da energia solar e eólica impulsionado por metas climáticas e redução de custos.



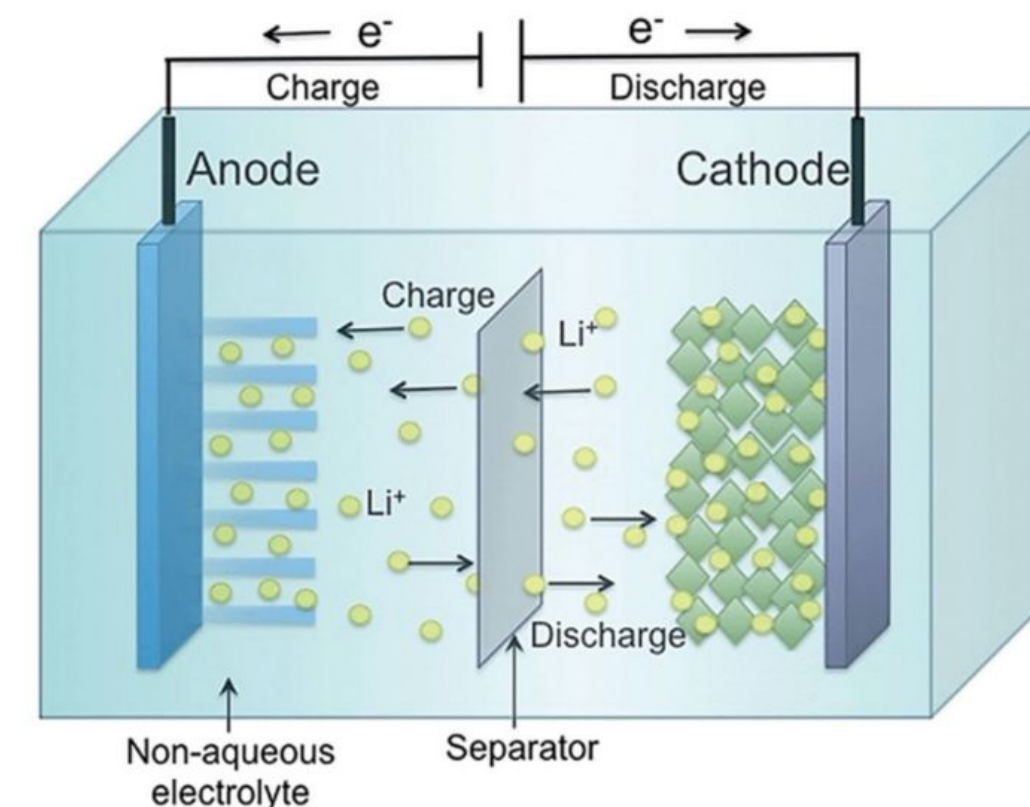
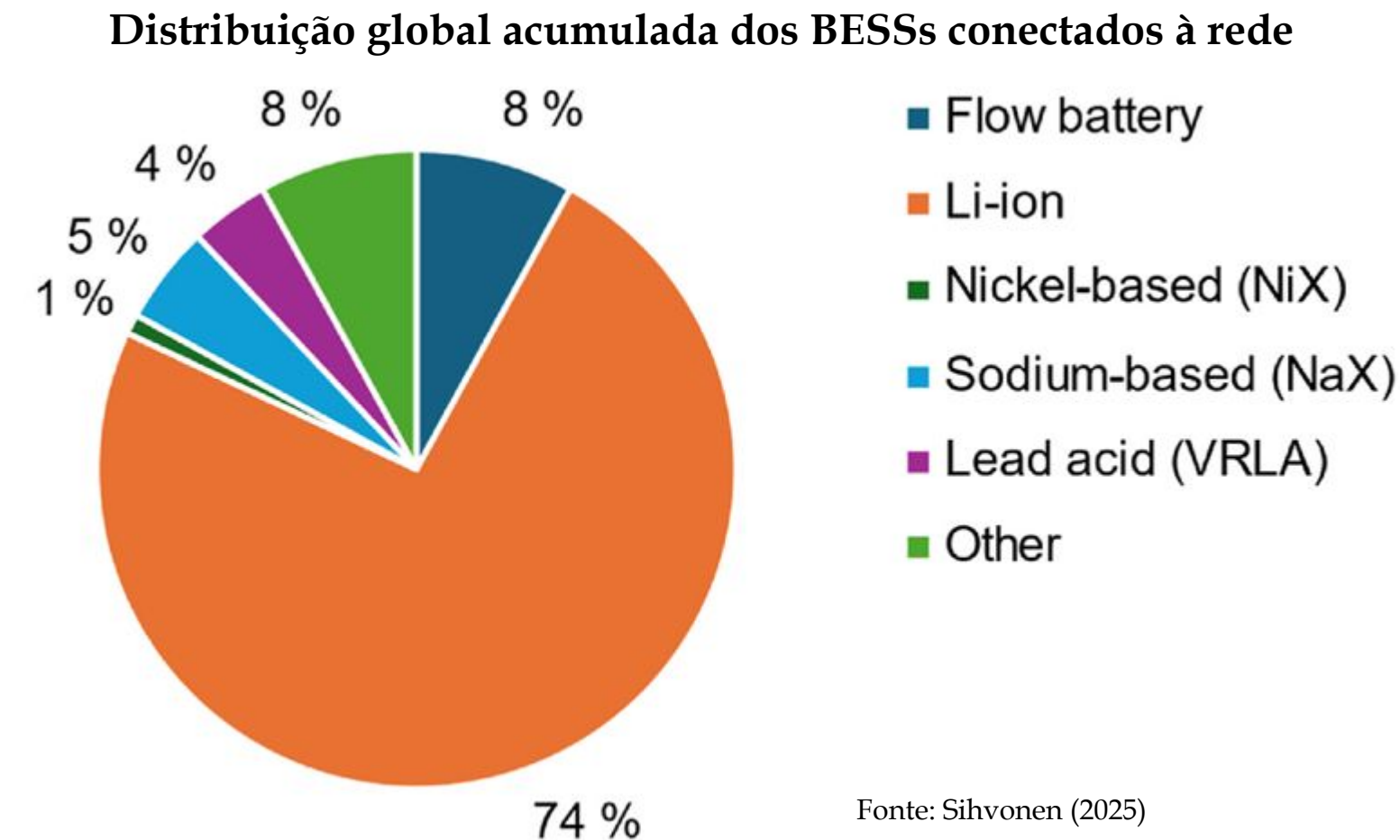
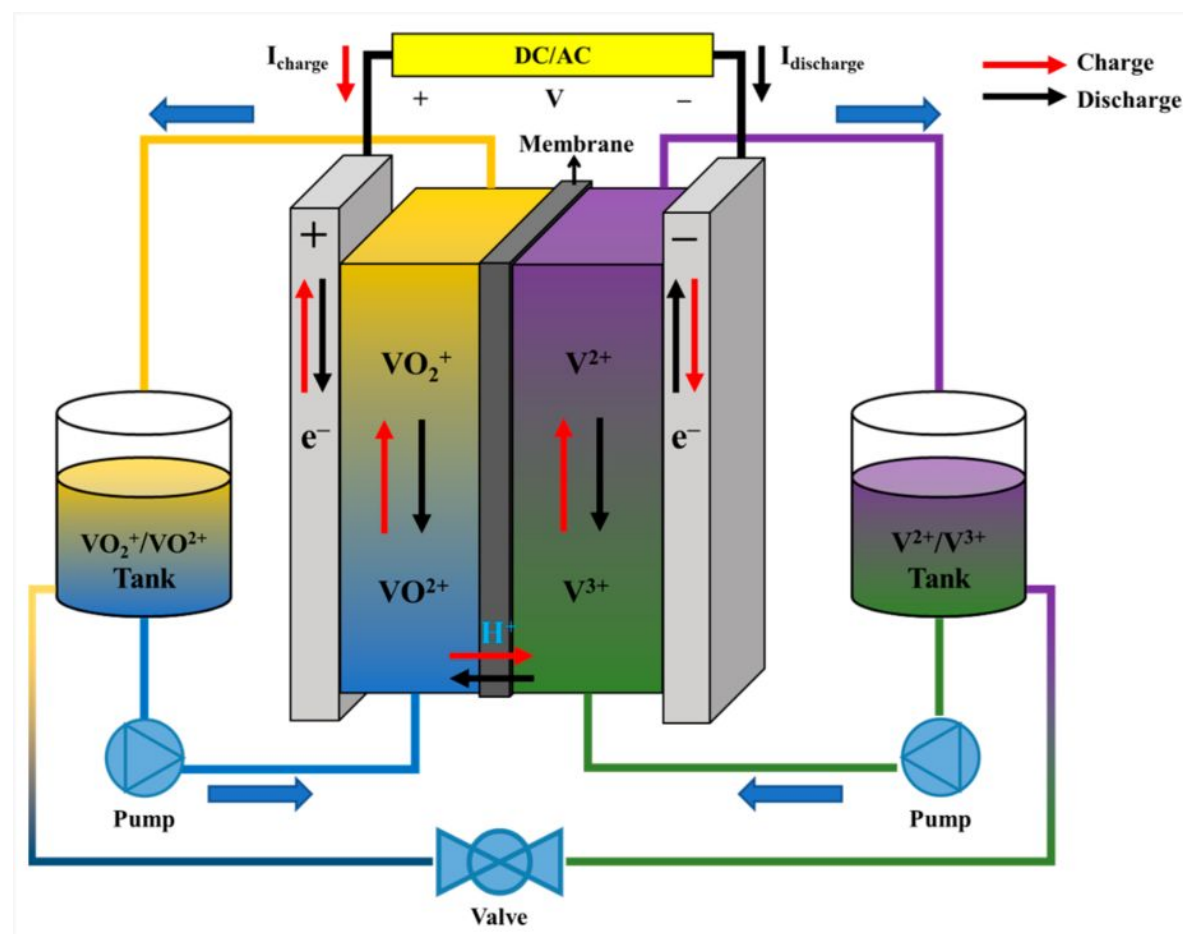
- Grande potencial de geração renovável, com destaque para a energia solar e eólica.
- Expansão acelerada das fontes renováveis intermitentes na matriz elétrica.



Fonte: IEA(2024)

- Sistema de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) consiste em células eletroquímicas que podem converter eletricidade em energia química para armazenamento e vice-versa
- Compostos por baterias de diversas químicas, sendo as principais: íon-lítio, fluxo redox, íon sódio e chumbo-ácido.

Fonte: Jung; Lee (2023)



Fonte: Ghiji *et.al* (2020)

- **GERAL**

- Investigar o papel estratégico das baterias eletroquímicas na transição energética brasileira na perspectiva da integração de fontes renováveis, sob a ótica das teorias de transições sociotécnicas do setor de energia.

- **ESPECÍFICOS**

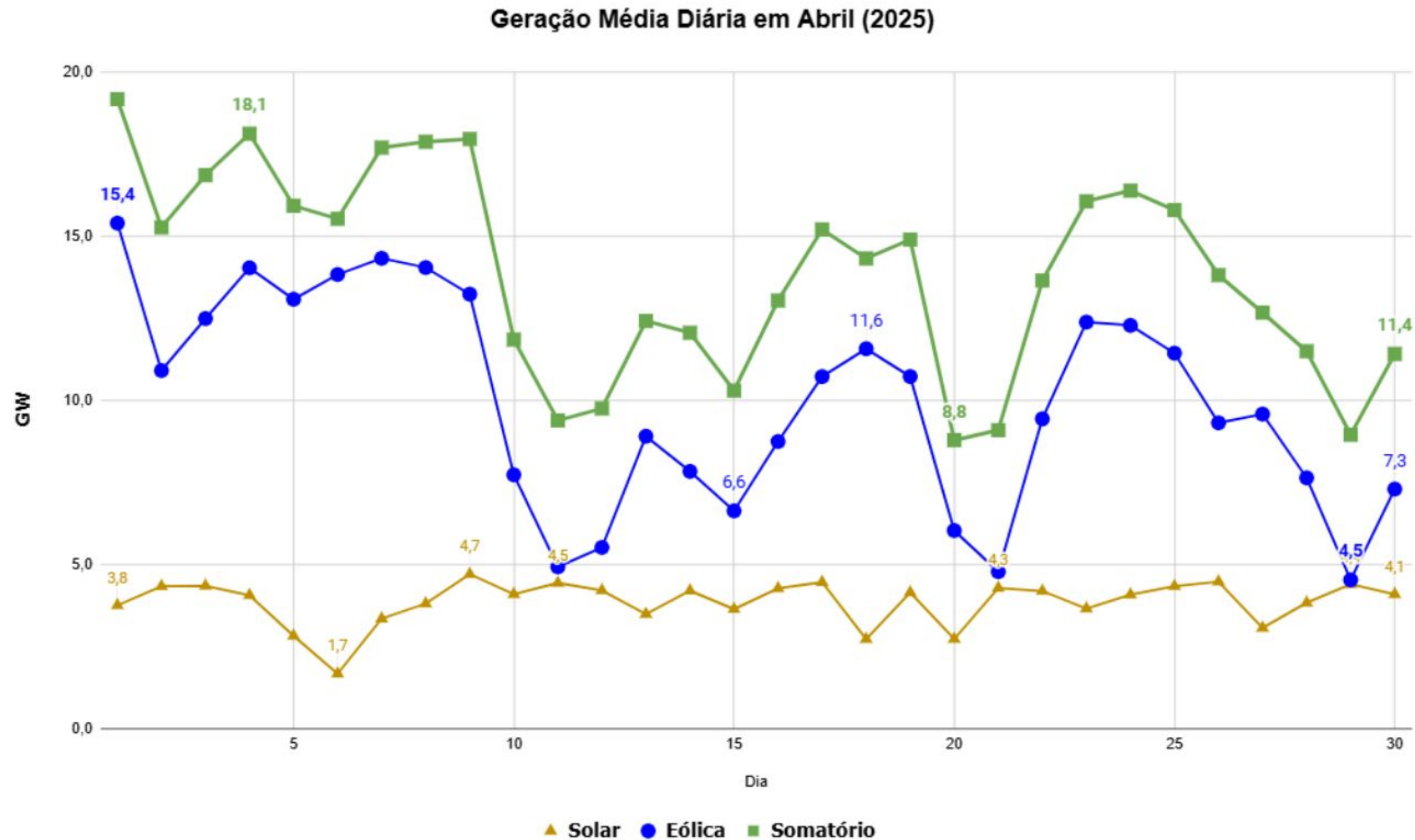
- Analisar a contribuição das baterias na integração de renováveis intermitentes.
- Avaliar impactos econômicos, energéticos e ambientais.
- Identificar barreiras regulatórias e de mercado para adoção em larga escala.

- Abordagem qualitativa e exploratória, com base em fontes secundárias
- Estruturada em três eixos principais:
 - Revisão bibliográfica:
 - Literatura científica e técnica sobre armazenamento de energia
 - Foco na Perspectiva de Multinível (MLP) e nas baterias: chumbo-ácido, íon-lítio e íons de sódio
 - Fontes: artigos, livros, ANEEL e institutos de pesquisa
 - Análise comparativa internacional:
 - Estudos de caso: EUA, China e Alemanha
 - Identificação de estratégias adaptáveis ao contexto brasileiro
 - Análise econômica dos impactos do BESS:
 - Avaliação de custos e benefícios técnicos
 - Impactos na eficiência do sistema, competitividade das renováveis e segurança energética
 - Barreiras econômicas, tecnológicas e regulatórias

PERSPECTIVA DE MULTINÍVEL (MLP)

- Três Níveis de Interação: As transições são vistas como interações dinâmicas entre:
 - Paisagem: O macroambiente socioeconômico e político.
 - Regime Sociotécnico: As normas e estruturas dominantes (no caso, o regime energético centralizado e baseado em grandes usinas).
 - Nichos de Inovação: Espaços protegidos para o desenvolvimento de novas tecnologias (como as baterias eletroquímicas e as renováveis descentralizadas).
- Contexto Brasileiro: O regime energético atual está sob pressão da paisagem global e é desafiado pelos nichos de inovação, dada a imensa capacidade renovável do Brasil.

- O desafio: a intermitência dessas fontes compromete a estabilidade e segurança do sistema elétrico.



- “Curva do Pato”

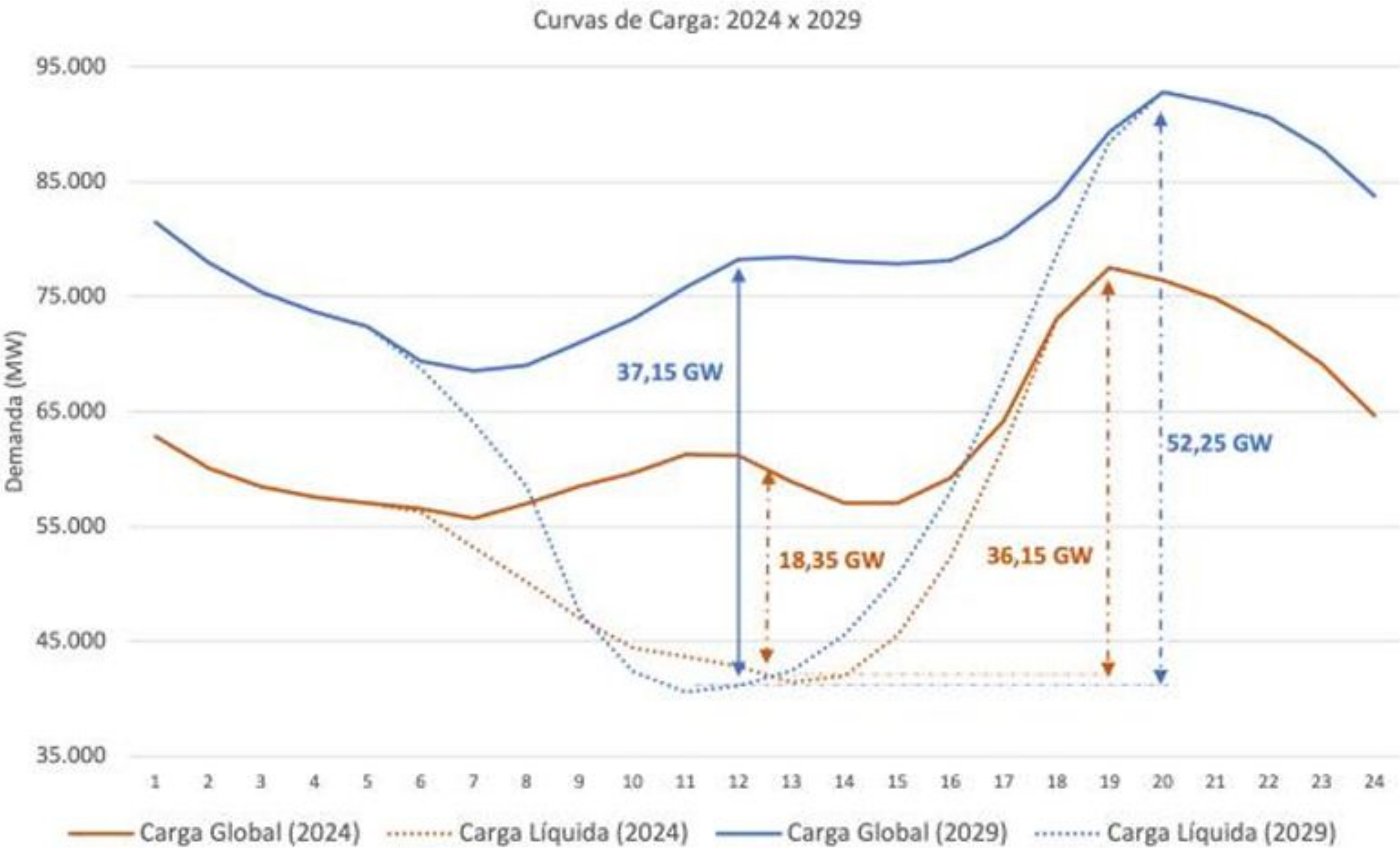
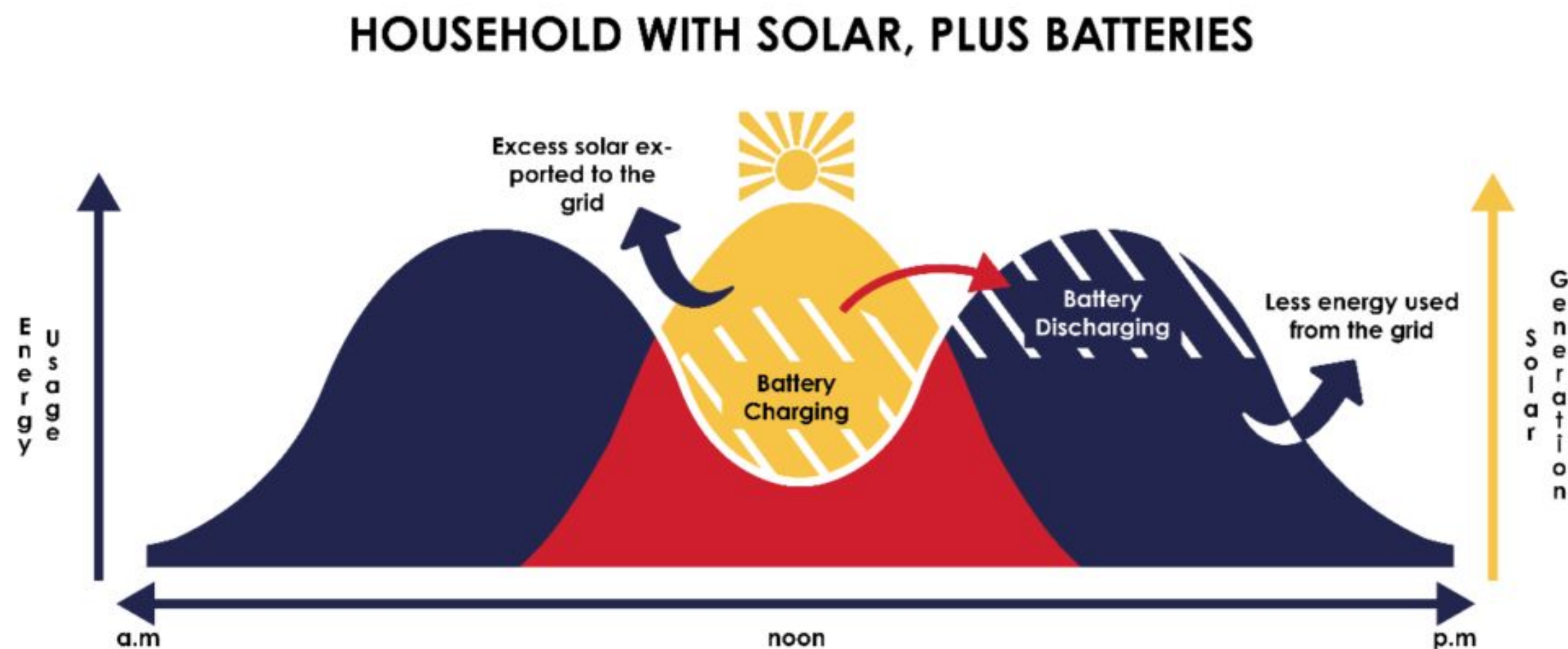


Figura 6.4 - Comparação entre as Curvas Horárias das Cargas Global e Líquida do SIN Verificadas em 2024 e Previstas para 2029

- Garantem estabilidade e confiabilidade ao sistema elétrico
- Tornam o uso das energias solar e eólica mais eficiente e previsível.
- Reduzem custos operacionais e aumentam a eficiência energética.



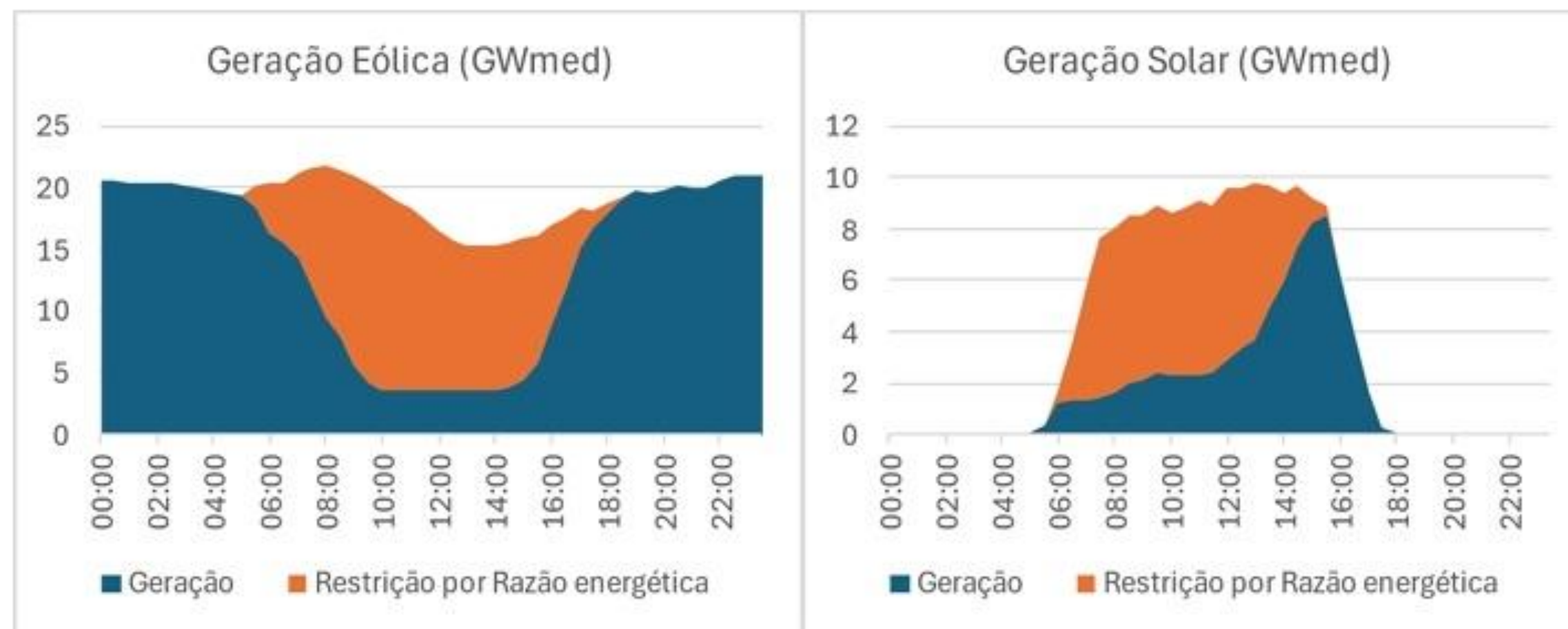
Fonte: NEA(2018)

CURTAILMENT

- Expansão de eólica/solar e GD
- Prejuízos superiores a R\$ 870 milhões para geradores
 - R\$ 711 milhões (eólicas)
 - R\$ 165 milhões (solares)

- Comparativo internacional:
 - Alemanha: ~4% de cortes
 - China: 4% (eólica) e 3% (solar)
 - EUA: 9% (eólica) e 5% (solar)
 - Brasil: 24% (eólica) e 36% (solar)

Restrições por Razão Energética para o dia 29/09/2024



Fonte: ONS(2025)

SUBESTAÇÃO/TRANSMISSÃO

- Armazenam energia perto dos centros de consumo, evitando a necessidade de construir ou reforçar longas linhas de transmissão
- Atuam como “mini-subestações inteligentes”
- Postergam investimentos em expansão da rede
- Atuam em horários de pico, aliviando o carregamento das linhas e transformadores (“*peak shaving*”)



- Primeiro sistema de armazenamento em bateria em larga escala conectado ao sistema de transmissão brasileiro
- São Paulo
- 30 MW/ 60 MWh(2 horas de autonomia)
- ISA CTEEP
- R\$ 146 milhões

TÉRMICAS

- Armazenam excedente solar/eólico e evitam ligar térmicas nos picos
- Substituem térmicas na reserva de capacidade.
- Reduzem custos e emissões de CO₂.
 - ISA CTEEP - 1.194 toneladas de GEE
- Tornam o sistema mais limpo, eficiente e confiável.

RANKING DE EMISSÕES POR USINA TERMELÉTRICA

● Gás natural ● Carvão mineral

	Usina	Emissões (milhões de toneladas de CO ₂ e)	
1	Porto do Pecém I São Gonçalo do Amarante CE	3,5 6,3%	
2	Candiota III Candiota RS	3,3 5,9%	
3	Termorio* Duque de Caxias RJ	3,0 5,4%	
4	Termomacaé Macaé RJ	2,9 5,2%	
5	Norte Fluminense Macaé RJ	2,5 4,5%	
6	Jorge Lacerda III Capivari de Baixo SC	1,8 3,3%	
7	Pampa Sul Candiota RS	1,8 3,2%	
8	Porto do Pecém II São Gonçalo do Amarante CE	1,8 3,2%	
9	Mauá 3 Manaus AM	1,7 3,1%	
10	Porto do Itaqui São Luís MA	1,6 2,8%	
11	Porto de Sergipe I Barra dos Coqueiros SE	1,5 2,8%	
12	Jorge Lacerda I e II Capivari de Baixo SC	1,5 2,7%	
13	Jorge Lacerda IV Capivari de Baixo SC	1,5 2,7%	

Barreiras Economicas

- Custo inicial ainda elevado, mesmo com queda de 50% no CAPEX nos últimos anos
- Tributação excessiva: impostos chegam a 85% sobre equipamentos de armazenamento
- Dependência de importações

Barreiras Regulatórias

- Falta de marco legal
- Atrasos nas Consultas Públicas e Leilões
 - Consulta Pública nº 39/2023
 - LRCAP

- BESS como pilar estratégico da transição energética brasileira:
 - Vai além de solução técnica; integra um novo sistema sociotécnico de energia
- Integração eficiente das renováveis:
 - Mitiga a intermitência da solar e eólica
 - Contribui para a descarbonização e diversificação da matriz energética
- Impactos econômicos positivos:
 - Redução do acionamento de usinas termelétricas (custosas e poluentes)
 - Diminuição de custos operacionais e aumento da competitividade das renováveis
 - Otimização da infraestrutura elétrica (menor necessidade de expansão)
- Ganhos ambientais:
 - Redução de emissões de gases de efeito estufa
 - Contribuição para as metas do Acordo de Paris
- Barreiras identificadas:
 - Alto custo inicial e dependência tecnológica (ex: lítio importado)
 - Lacunas no marco regulatório brasileiro
 - Necessidade de políticas públicas e incentivos claros para viabilizar investimentos

- BERGEK, A. Technological innovation systems: a review of recent findings and suggestions for further research. In: BOONS, F.; McMEEKIN, A. (Eds.). Handbook of Sustainable Innovation. Edward Elgar Publishing, 2019. p. 200–218.
- GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. Research Policy, v. 31, n. 8-9, p. 1257–1274, 2002.
- GEELS, F. W. The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. Environmental Innovation and Societal Transitions, v. 1, n. 1, p. 24–40, 2011.
- KERN, F.; ROGGE, K. S.; HOWLETT, M. Policy mixes for sustainability transitions: New approaches and insights through bridging innovation and policy studies. Research Policy, v. 48, n. 4, p. 1040–1050, 2019.
- LINDBERG, M. B.; MARKARD, J.; ANDERSEN, A. D. Policies, actors and sustainability transition pathways: A study of the EU's energy policy mix. Research Policy, v. 48, n. 4, p. 1051–1062, 2019.
- LUNDVALL, B. Transformative innovation policy - lessons from the innovation system literature. Innovation and Development, v. 13, n. 1, p. 1-19, 2023.
- MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: An emerging field of research and its prospects. Research Policy, v. 41, n. 6, p. 955–967, 2012.
- SCHOT, J.; STEINMUELLER, W. E. Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. Research Policy, v. 47, n. 9, p. 1554–1567, 2018.

OBRIGADO