



# Revista O Setor Elétrico

## A transição energética e a necessidade crescente de armazenamento de energia elétrica<sup>1</sup>

Nivalde de Castro<sup>2</sup>

Roberto Brandão<sup>3</sup>

Pela primeira vez na história da Idade Contemporânea, que se iniciou no último quartil do Século XVIII, tendo como marcos a Revolução Francesa e a Revolução Industrial, a dinâmica do desenvolvimento econômico e os conflitos geopolíticos não são responsáveis por um processo de transição energética. A mudança, hoje em curso, no padrão de uso da energia decorre de problemas cada vez mais intensos associados ao aquecimento global, derivado diretamente das formas de produção e consumo de energia, assentadas prioritariamente nos combustíveis fósseis: carvão, petróleo e gás natural.

A partir da Revolução Industrial, cujo elemento inovador central foi a máquina a vapor, se inicia um processo de transição energética, que substituiu, de forma rápida, as fontes de lenha e moinhos de água e vento. Essa transição abriu uma nova e intensa etapa de desenvolvimento econômico, com um crescimento nunca presenciado na história. O mundo ficou mais integrado e globalizado, em função dos avanços tecnológicos nos segmentos de transporte e da consolidação crescente de um padrão de desenvolvimento centrado na industrialização.

Passados mais de 200 anos, esse dinamismo econômico legou um volume crescente de emissão de gases de efeito estufa (GEE), que coloca em risco a sobrevivência do planeta e da humanidade. Se, há cerca de 66 milhões de anos, um asteroide gigante colidiu onde hoje é a Península de Yucatán, fazendo

---

<sup>1</sup> Artigo publicado na Revista Setor Elétrico. Abril de 2024, n. 202, p.10-14. Disponível em: [https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ose\\_202\\_finalsite?fr=xKAE9\\_zU1NQ&utm\\_campaign=hv\\_revista\\_ose\\_nova\\_edicao\\_202&utm\\_medium=email&utm\\_source=RD+Station](https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ose_202_finalsite?fr=xKAE9_zU1NQ&utm_campaign=hv_revista_ose_nova_edicao_202&utm_medium=email&utm_source=RD+Station). Acesso em 16 de abril de 2024

<sup>2</sup> Professor do Instituto de Economia da UFRJ e coordenador do GESEL-Grupo de Estudos do Setor Elétrico.

<sup>3</sup> Diretor científico do GESEL.

desaparecer os dinossauros, atualmente o risco de extinção é responsabilidade humana.

Para mitigar este risco, que cresce constantemente, a prioridade das políticas públicas internacionais e nacionais está na adoção de medidas de diferentes tipos, profundidade e temporalidade, focadas na descarbonização. Se, até 2050, não ocorrer uma redução das emissões de GEE, o nível de aquecimento global atingirá uma marca que será impossível retornar a patamares menores. Constatase, a cada ano, mês e semanas, recordes climáticos que se expressam em eventos ambientais extremos, trazendo prejuízos crescentes e perdas de vidas humanas.

Neste contexto ambiental e climático, o processo de transição energética ganha importância e se mostra cada vez mais necessário. Considerando a dimensão, a amplitude e a profundidade dos desafios e impactos sobre a economia e a sociedade, o presente capítulo da Série Transição Energética e ESG, fruto da parceria que o GESEL-UFRJ firmou com a Revista Setor Elétrico, irá analisar as principais causas e consequências para o aumento de investimentos em sistemas de armazenamento, dado o atual cenário apresentado.

Neste sentido, o presente capítulo está estruturado em três seções. A primeira seção tem foco no contexto da demanda de energia, com uma análise não tão profunda, pois será objeto de outros capítulos desta Série. A segunda seção examina os diferentes elementos da oferta de energia, da qual se deriva para a questão central, que é a necessidade de sistemas de armazenamento para garantir flexibilidade e segurança de suprimento de energia, com o diferencial estratégico de ser renovável. Por fim, a terceira seção será dedicada à questão do armazenamento, seguida das conclusões.

## **I. A demanda de energia no contexto da transição**

O padrão de demanda de recursos energéticos que prevalece no mundo é de origem não renovável, com a seguinte ordem de grandeza de consumo: petróleo, carvão e gás natural. Cada uma dessas fontes tem um nível distinto de emissão de GEE, sendo o carvão o maior emissor, seguido pelo petróleo e o gás natural. Tendo em vista esta diferenciação, o gás é identificado como o combustível da transição, por ser menos poluidor e, em especial, com a possibilidade, ainda que sem viabilidade tecnológica-econômica, de capturar as emissões de CO<sub>2</sub> no seu processo de queima.

Desta forma, para que as metas de descarbonização sejam atingidas, com cenários cada vez mais rígidos e cujo objetivo é neutralizar as emissões de GEE até 2050, abrem-se dois caminhos irreversíveis, que se complementam.

O primeiro deles vai na direção da substituição do trio de recursos energéticos poluidores pelo hidrogênio de baixo carbono, notadamente o verde. Trata-se de

uma possibilidade tecnológica e econômica concreta, que será analisada em profundidade em um próximo capítulo desta série.

Já o segundo caminho é a substituição gradativa, já em curso, da geração de energia elétrica a partir de fontes não renováveis por fontes renováveis, retirando da matriz elétrica as usinas térmicas a carvão, óleo combustível e, mais à frente, gás natural, sem a possibilidade de retorno. A partir da oferta de energia elétrica renovável, está sendo viabilizado o processo de eletrificação (verde). Ou seja, nos processos produtivos onde for possível, se insere a energia elétrica renovável, de modo que a descarbonização avança e reduz as emissões de GEE.

Um exemplo bem objetivo é a conversão da indústria automobilística para os veículos elétricos. Assim, os veículos que usam como combustíveis recursos derivados do petróleo estão sendo substituídos por veículos que consomem energia elétrica, com a dinâmica da eletrificação se fazendo presente. Destaca-se que o tema da mobilidade elétrica foi analisado no Capítulo 2 desta Série <sup>4</sup>.

Em síntese, para que as metas de descarbonização sejam atingidas, a demanda de energia das cadeias produtivas de bens, serviços e padrões de consumo deverá ser convertida para recursos energéticos renováveis, quais sejam, energia elétrica proveniente de fontes renováveis e derivados de hidrogênio verde (H2V). Trata-se de um, se não o maior, desafio que a humanidade terá que superar em um período muito curto. Para tanto, destaca-se a premissa de Schumpeter, economista austríaco (1883-1950), de que a dinâmica de desenvolvimento econômico precisa de inovações tecnológicas que forcem um processo de “destruição criativa”, como é o caso da destruição dos veículos à combustão por veículos elétricos. Como mencionado, esta linha de análise, pelo lado da demanda, será objeto central de um dos próximos capítulos desta Série.

## **II. A oferta de energia no contexto da transição**

A descentralização da geração de energia e dos meios de produção são os principais vetores da transição energética. Para viabilizar este duplo objetivo no que se refere à eletrificação, são necessários investimentos em inovações tecnológicas, com ganhos de escala nas cadeias produtivas da indústria e das fontes de energia eólica e solar fotovoltaica. Esta dinâmica vem ocorrendo, o que permitiu o aumento da geração destas duas fontes em taxas crescentes, em especial na União Europeia e na China, regiões com elevada participação nas

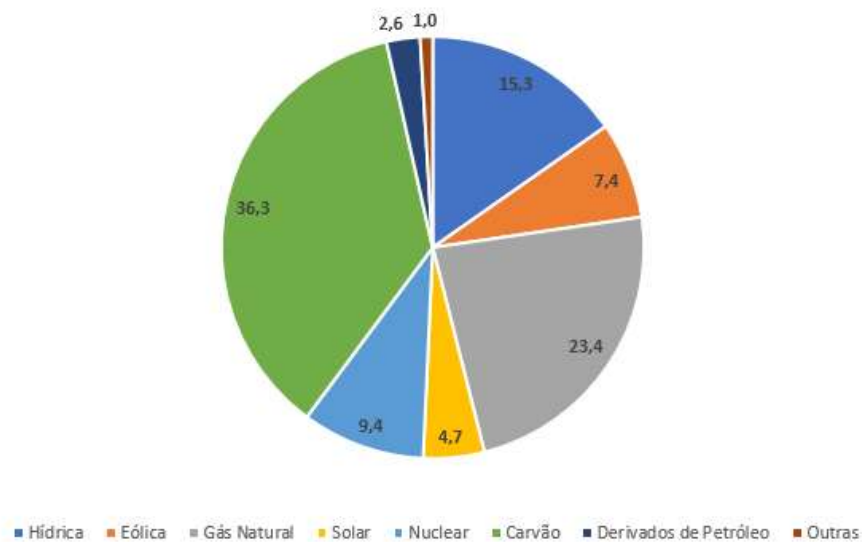
---

<sup>4</sup> O Capítulo 2 da Série Transição Energética e ESG da Revista Setor Elétrico está disponível em [https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ose\\_201\\_finaisimples?fr=xKAE9\\_zU1NQ&utm\\_campaign=hv\\_revista\\_ose\\_-\\_nova\\_edicao\\_201&utm\\_medium=email&utm\\_source=RD+Station](https://issuu.com/revistaosetoreletrico/docs/ose_201_finaisimples?fr=xKAE9_zU1NQ&utm_campaign=hv_revista_ose_-_nova_edicao_201&utm_medium=email&utm_source=RD+Station) (pp. 8-10).

emissões de GEE e preocupação com a segurança de suprimento de energia, problema que os EUA não enfrentam.

Para melhor entender este processo, destaca-se a composição da matriz elétrica mundial, onde ainda há uma elevada participação de capacidade instalada de fontes não renováveis, como atestam os dados do Gráfico 1.

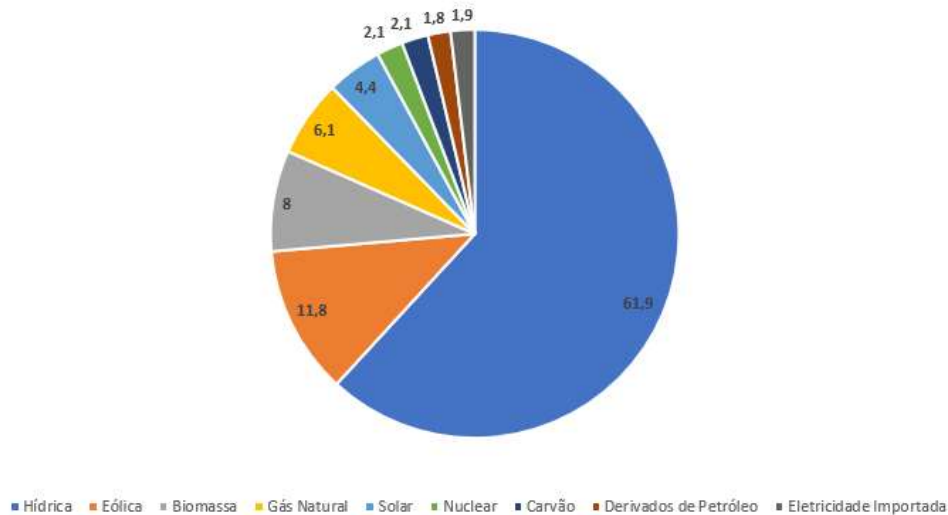
Gráfico 1: Composição da matriz elétrica mundial por tipo de fonte: 2022  
(em %)



Fonte: Energy Institute.

Estes dados demonstram o desafio mundial em termos de investimentos para tornar a produção de eletricidade renovável e, assim, viabilizar a eletrificação. O Brasil, destaca-se, parte de uma posição muito favorável e, assim, competitiva, tendo em vista que a composição da sua matriz elétrica é uma das mais renováveis do mundo, como demonstram os dados do Gráfico 2.

Gráfico 2: Composição da matriz elétrica do Brasil por tipo de fonte: 2022  
(em %)



Fonte: EPE.

A composição da matriz brasileira permitiu que, no ano de 2023, a geração de energia elétrica tivesse uma participação de 92% de fontes renováveis, segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), valor que atesta a capacidade competitiva do Brasil neste novo mundo da transição energética. Outro elemento favorável ao país é o potencial de aproveitamento das fontes eólica (*on* e *off-shore*) e solar, estimado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 1.300.000 MW.

Frente a esta situação, derivada da sua dimensão continental, com abundância de sol, vento, água e terra e uma população superior a 200 milhões de habitantes, o Brasil se posiciona com grande potencial em termos de energia renovável no contexto da transição energética, notadamente em razão de que a produção de H2V através do processo de eletrólise demanda eletricidade verde, que é a rota tecnológica mais madura e com capacidade de viabilidade econômica.

A partir deste enquadramento analítico, será analisada, na próxima seção, a questão do armazenamento de energia no Brasil.

### III. Perspectivas do armazenamento no Brasil

Frente à maior competitividade da energia eólica e, principalmente, solar fotovoltaica por imposição direta e indireta da transição energética, as estimativas da participação destas duas fontes na matriz elétrica são de taxas de crescimento elevadas em escala mundial. No mesmo sentido, o Brasil não foge a este cenário, mas possui uma grande diferença: a nossa transição visa manter a geração elétrica descarbonizada, uma vez que, devido à expressiva capacidade

de geração hidrelétrica, o nível de emissões de GEE já é muito baixo para os padrões internacionais.

Centrando a análise no cenário brasileiro, o crescimento da capacidade instalada das fontes eólica e solar está ocorrendo, em grande medida, devido ao elevado grau de subsídios concedidos, que são pagos pelos consumidores do mercado cativo, no caso da geração solar distribuída, e pela Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), no caso da geração centralizada. A taxa de crescimento de tais projetos e dos subsídios associados a eles é de tal ordem que, se alguma ação de restrição não for realizada pelas autoridades, que até agora têm se mostrado omissas em relação ao problema, mesmo ciente dos alertas dos principais *stakeholders* do Setor Elétrico Brasileiro, se caminha para uma crise financeira de proporções inusitadas.

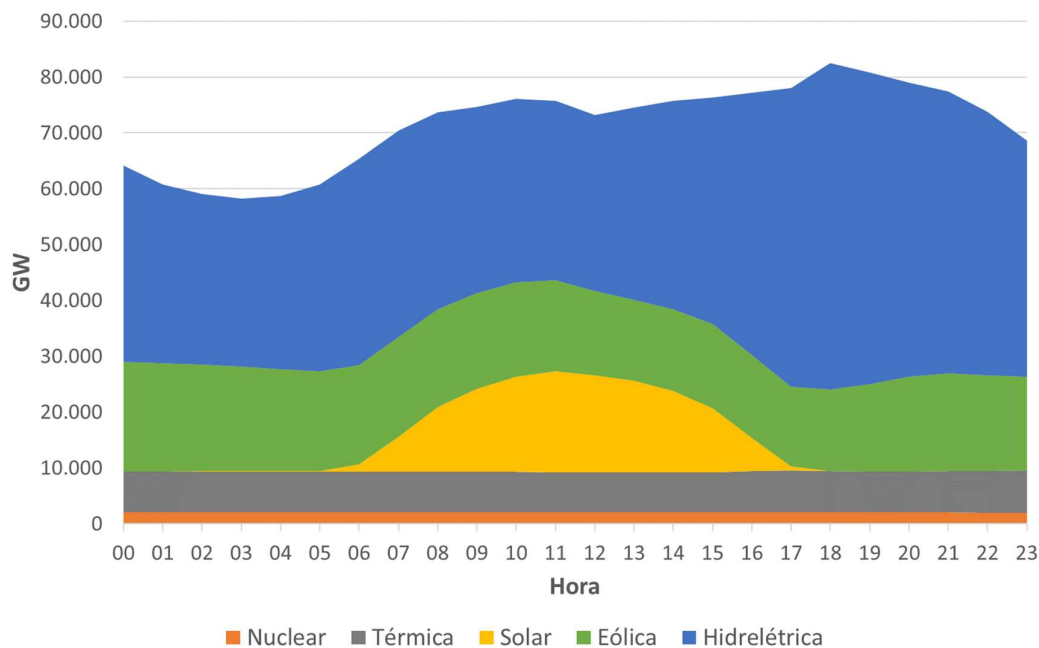
No entanto, deixando de lado a questão dos subsídios para ampliar a capacidade instalada de geração das energias eólica e, principalmente, solar, dois estudos importantes, qualificados e bem fundamentados, elaborados pelo ONS<sup>5</sup>, estimam que, para os próximos anos, haverá um excesso crescente de capacidade de geração, devido ao aumento da geração acima do necessário para atender ao crescimento do consumo. Além disso, o aumento da participação das fontes eólica e solar, caracterizadas por serem uma geração não controlável, irá trazer novos desafios para a operação do sistema, como será analisado a partir do exemplo apresentado a seguir.

Parte-se da composição real da carga do Sistema Interligado Nacional (SIN) de uma quarta-feira do inverno de 2023, aleatoriamente selecionada e expressa no Gráfico 3.

---

<sup>5</sup> Plano da Operação Energética 2022-2026 (PEN) e Plano de Ampliações em Reforços 2023 (PAR/PEL 2023).

Gráfico 3: Geração de energia elétrica no Brasil por tipo de fonte: 5 de julho de 2023  
(em %)



Fonte: ONS.

Analisando pontualmente o Gráfico 3, merecem ser destacadas as seguintes questões:

- i. As gerações nuclear e térmica operam sempre na base;
- ii. As gerações eólica e solar são despachadas sempre em prioridade, conforme a disponibilidade do recurso; e
- iii. A variável de ajuste, em condições normais, são as usinas hidrelétricas, que proporcionam a flexibilidade operacional que o ONS tanto precisa.

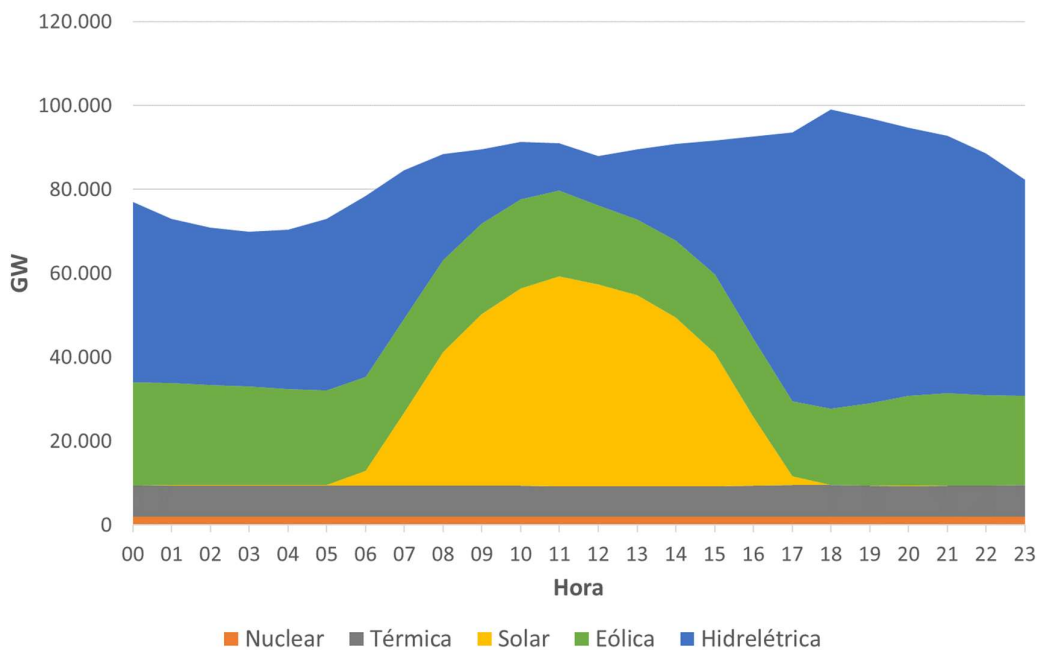
De modo a facilitar a visualização dos desafios do ONS em operar um sistema com o crescimento da geração não controlável, realiza-se uma simulação do comportamento da geração para os anos de 2028 e 2032, a partir das seguintes hipóteses:

- i. A base é a composição da geração do SIN por fontes no dia 5 de julho de 2023 (quarta-feira de inverno), apresentada anteriormente;
- ii. Estimam-se dois cenários. No primeiro, a carga aumenta 20% em relação a 2023, o que deve ocorrer por volta de 2028. No segundo, a carga aumenta 32% em relação a 2013, o que deve ser atingido por volta de 2031;

- iii. O aumento de carga será integralmente lastreado, em termos de energia, por geração renovável, 30% eólica e 70% solar (geração distribuída e centralizada);
- iv. A geração das usinas hidrelétricas, térmicas e nuclear permanece a mesma do dia base;
- v. A geração térmica e nuclear permanece na base, ou seja, não há modulação destas usinas; e
- vi. A geração hidrelétrica acomoda todas as variações na carga líquida (carga menos gerações inflexíveis ou variáveis).

O Gráfico 4, abaixo, permite a visualização da geração total de energia e sua composição para um dia de semana de inverno por volta de 2028.

Gráfico 4: Geração de energia elétrica no Brasil por tipo de fonte: 5 de julho de 2028 (em %)



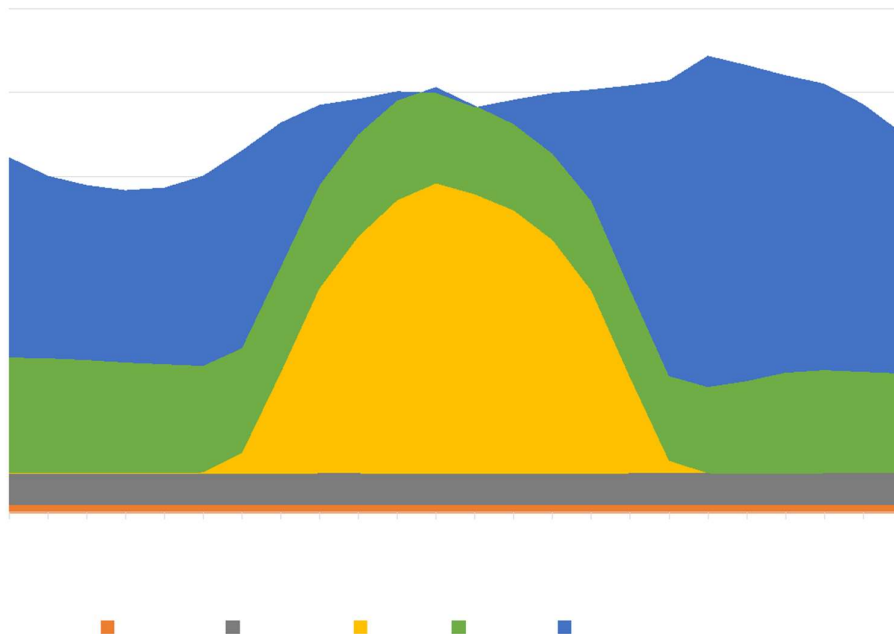
Fonte: GESEL-UFRJ.

Observa-se, na comparação com os valores do Gráfico 3, um grande crescimento da geração solar durante o dia e um crescimento menor, porém perceptível, da geração eólica durante todo o dia. A variável de ajuste no exemplo, conforme mencionado, é a geração hidrelétrica, que precisa se ajustar para compensar o descasamento entre o perfil horário da geração não controlável com a carga. Isto implica um forte crescimento da geração hidrelétrica durante a noite e a madrugada, mas uma redução acentuada durante o dia.



O Gráfico 5, a seguir, apresenta a geração total de energia e sua composição para um dia de semana de inverno por volta de 2031, com um crescimento de 32% em relação ao verificado no Gráfico 3. Nota-se um grande crescimento da geração solar durante o dia, o que faz com que a geração hidrelétrica, que serve de variável de ajuste entre as demais fontes, precise ser ajustada para compensar o descasamento entre o perfil horário da geração não controlável com a carga. Este ajuste acarreta em um crescimento ainda maior da geração hidrelétrica durante a noite e a madrugada, mas em geração próxima a zero em torno da hora do almoço.

Gráfico 5: Geração de energia elétrica no Brasil por tipo de fonte: 2 de julho de 2031 (em %)



Fonte: GESEL-UFRJ.

Embora os Gráficos 4 e 5 sejam matematicamente corretos, eles supõem implicitamente que a geração hidrelétrica é perfeitamente flexível e capaz de acomodar livremente qualquer tipo de variação de potência. Na prática, isto não é verdade em decorrência de algumas questões. Em primeiro lugar, várias hidrelétricas têm vazões mínimas, isto é, não podem reduzir livremente as defluências sem violar obrigações relativas ao uso dos recursos hídricos estabelecidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), que visam garantir a captação de água rio abaixo por parte de empresas de abastecimento, irrigantes e outros usuários. Assim, ainda que a geração seja zero nas usinas hidrelétricas, será preciso preservar a defluência mínima, deixando passar água que poderia

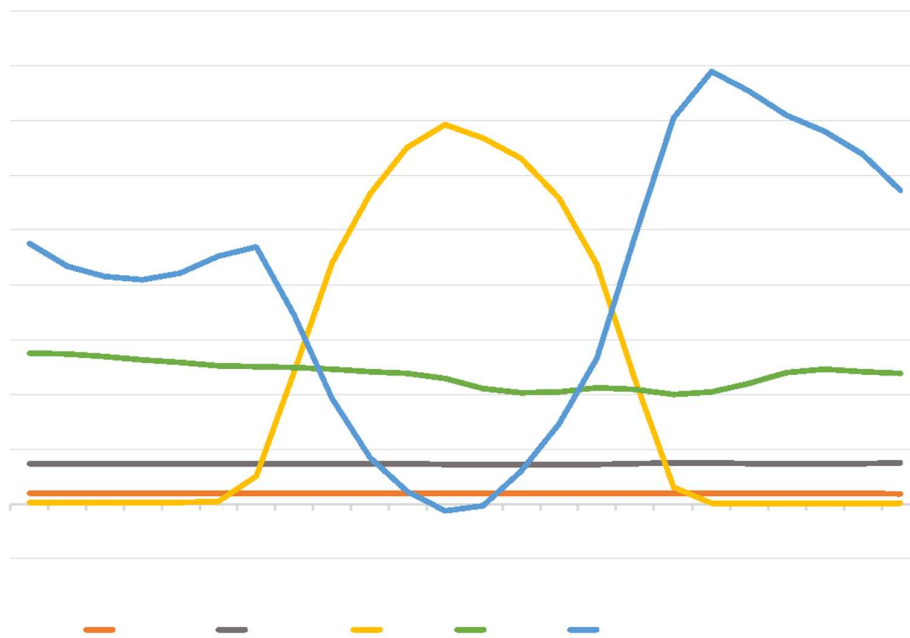
ter sido utilizada para gerar energia. Essas defluências mínimas representam, em condições normais, cerca de 19 GW.

Além disso, há usinas a fio d'água, ou seja, sem reservatórios significativos e que precisam gerar utilizando as afluições do momento ou então verter. No período úmido, somente as Usinas de Santo Antônio, Jirau, Teles Pires e Belo Monte, principais usinas a fio d'água, precisam gerar em torno de 20 GW para aproveitar integralmente as afluições. Por outro lado, no auge do período úmido, este valor pode descer a cerca de 2 GW.

Outra questão são as restrições de rampas de defluência, configurando limites colocados à operação de muitas hidrelétricas que previnem variações acentuadas do nível do rio a jusante, capazes de gerar riscos para populações ribeirinhas. Finalmente, há restrições de transmissão, que não permitem o tráfico de energia livremente entre as regiões. Assim, por exemplo, pode haver sobra de potência hídrica na Região Sudeste sem que possa ser integralmente utilizada para atender ao consumo de ponta em outra região.

O somatório dessas restrições resulta em dificuldades para o uso da geração hidrelétrica da maneira, cada vez agressiva, suposta nos Gráficos 4 e 5. Para melhor visualizar este problema, foi elaborado o Gráfico 6, que apresenta novamente a composição da geração em uma quarta-feira de inverno por volta de 2031, porém com as fontes separadas e não mais empilhadas. Chama a atenção o formato da curva em azul, que corresponde ao requisito de a geração atender à carga, complementando as gerações inflexíveis (no caso, todas menos a hídrica) que atribuímos, para fins didáticos, às hidrelétricas. Trata-se da famosa curva do pato, com uma geração relativamente intensa de madrugada, muito pequena nas horas de sol, muito forte no início da noite e decrescendo no final do período.

Gráfico 6: Geração de energia elétrica no Brasil por tipo de fonte: 2 de julho de 2031  
(em %)



Fonte: GESEL-UFRJ.

Em um dia do início de inverno como o simulado, provavelmente as hidrelétricas seriam capazes de atender facilmente ao requisito de geração complementar no horário de ponta da noite, de 79 GW. Contudo, a geração ligeiramente negativa por volta da hora do almoço não é fisicamente possível. Na verdade, uma geração hidrelétrica abaixo de algo como 25 a 30 GW, que, no Gráfico 6, ocorre entre 8 e 16hs, não seria possível no início do inverno, quando as usinas a fio d'água ainda têm vazões significativas, sem acionar os vertedouros. Todo esse volume de energia seria perdido, seja por vertimentos nas próprias hidrelétricas, seja por cortes na geração renovável (*curtailment* para usar o termo em inglês).

Trata-se de um desperdício expressivo de energia que precisaria ser coberto por outras fontes de geração, notadamente por térmicas. A única forma de evitar ou, ao menos, minorar esse desperdício é mediante o aumento da carga durante as horas de sol. Esse aumento pode ser realizado pelo deslocamento do consumo para estas horas, algo difícil de fazer em larga escala, ou pela introdução de volumes expressivos de projetos de armazenamento, capazes de retirar energia do sistema quando ela é abundante para injetá-la em outras horas, especialmente na parte da noite.

Há, todavia, um segundo problema para a operação do sistema associado à curva do pato. A curva azul de carga líquida, representada pelas hidrelétricas no Gráfico 6, tem uma rampa muito acentuada na parte da tarde, indo de valores negativos em torno do meio-dia para 79 GW às 19hs. Ocorre que as hidrelétricas

brasileiras não são capazes de aumentar a geração de forma brusca, em parte devido às restrições hídricas e em parte devido a restrições de transmissão. Por isso, essas usinas precisarão ser complementadas por outros empreendimentos: térmicas, ampliações da capacidade instalada hídrica ou projetos de armazenamento.

Aqui, os projetos de armazenamento também se mostram muito vantajosos, uma vez que conseguem contribuir de forma notável para as rampas. Enquanto uma usina térmica de 100 MW pode fazer uma rampa de 100 MW, partindo de zero e atingindo a geração equivalente à capacidade instalada, um projeto de armazenamento de mesma potência pode carregar durante a tarde (-100 MW) e alternar para a injeção de potência à noite (+100 MW), realizando uma rampa duas vezes mais acentuada.

Deste modo, nota-se que o aumento do descasamento a nível horário entre a carga e a geração não controlável das fontes solar e eólica criará uma necessidade crescente de flexibilidade, de modo a permitir que o operador do sistema assegure a igualdade, em tempo real, entre geração e carga, a partir de um despacho econômico e evitando um desperdício maciço de geração. Destaca-se que os sistemas de armazenamento podem desempenhar esta função, tanto as baterias de grande porte quanto as usinas hidrelétricas reversíveis.

Hoje, são comuns e cada vez mais baratas as baterias de até 4hs de duração, que podem desempenhar funções de atendimento de ponta, de rampa e de otimização do despacho, evitando cortes maciços de renováveis, além de serem adequadas para a prestação de serviços ancilares, como regulação de frequência, entre outros. Já as usinas hidrelétricas reversíveis podem prestar bem a regularização semanal, através do transporte de grandes excedentes de energia esperados para os fins de semana, quando o consumo é mais baixo, para as horas de maior consumo durante a semana.

## **Conclusões**

A transição energética em curso representa um marco significativo na história da humanidade, impulsionada pela urgente necessidade de mitigar os impactos do aquecimento global e avançar em direção a um futuro sustentável. Os sistemas de armazenamento de energia elétrica podem desempenhar um papel crucial neste processo, oferecendo a flexibilidade e a segurança necessárias para integrar fontes de energia renováveis variáveis à matriz elétrica, de modo a garantir um fornecimento contínuo e confiável de eletricidade. O Brasil, com sua matriz elétrica predominantemente renovável e um potencial significativo para a expansão das fontes eólica e solar, está em uma posição vantajosa para liderar essa transformação. Contudo, o país enfrenta desafios técnicos e operacionais significativos, especialmente no que diz respeito à integração de geração não controlável e ao manejo de picos de demanda e oferta.

Este texto procurou evidenciar a importância de investimentos em tecnologias de armazenamento, tanto de pequena quanto de grande escala, para maximizar o aproveitamento das fontes renováveis. Neste sentido, as baterias de grande porte e as usinas hidrelétricas reversíveis emergem como soluções viáveis para atender às necessidades de flexibilidade do sistema, oferecendo alternativas econômicas ao gerenciamento de picos e à otimização do despacho de energia.

Assim, o Brasil e o mundo estão diante de uma oportunidade única de remodelar o futuro energético, adotando estratégias que alinhem crescimento econômico, segurança energética e sustentabilidade ambiental. A transição energética, apoiada por sistemas de armazenamento avançados e políticas inovadoras, representa um caminho promissor para a construção de um legado de resiliência e prosperidade para as gerações futuras.