

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA TRANSIÇÃO PARA A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Pedro G. C. da Silva^{1a}, Marcos R. Benso^{1b}, Greicelene J. da Silva^{1c}, Gabriela C. Gesualdo^{1e}, Rodrigo S. Costa^{2f}, André R. Gonçalves^{2g}, Ianca P. Miranda^{1h}, Danielle de A. Bressiani³, Enio B. Pereira²ⁱ, Josiclêda D. Galvincio⁴, Luz Adriana C. Pineda⁵, Suzana M. G. L. Montenegro⁶, Martinus S. Krol⁷ & Eduardo M. Menciondo^{1d}

Abstract: The continued use of non-renewable energy sources, such as fossil fuels, has highlighted the negative impacts caused by greenhouse gas emissions (GHG). With the need to minimize dependence on energy sources of this type, the transition to a more sustainable energy matrix has been widely extended on an international scale. On a national scale, Brazil has the potential to favor the implementation of renewable energy generation systems, with emphasis on photovoltaic energy, which has been the source with the highest increase in installed capacity in the world. Due to its geographical location, the country receives high incidence rates of solar radiation and is relatively uniform throughout the national territory, which allows the development of viable solar projects in different regions. Furthermore, the potential impacts of climate change put pressure on hydroelectric energy generation, which is highly dependent on precipitation and its variability, and therefore carries a high risk of scarcity. In this regard, strategies that seek to increase energy security with lower environmental impact are the main ways to enable a sustainable and fair energy transition, as well as one of the possible mechanisms to address climate change. Thus, the objective of this work is to bring a discussion on the challenges and opportunities of sustainable energy transition, with a focus on the case of Brazil, in order to provide pathways for this process.

Resumo: O contínuo uso de fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis, colocou em evidência os impactos negativos trazidos pelas emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Com a necessidade de minimizar a dependência de fontes de energia desse tipo, a transição de matriz energética mais sustentável tem sido amplamente discutida em escala internacional. Em escala nacional, o Brasil apresenta potencial favorável à implementação de sistemas de geração de energia renovável, com destaque para a energia fotovoltaica que vem sendo a fonte que apresenta o maior incremento de capacidade instalada anualmente no mundo. Por sua localização geográfica, o País recebe elevados índices de radiação solar e relativamente uniformes no território nacional, o que permite desenvolver projetos solares viáveis em diferentes regiões. Além disso, os possíveis impactos das mudanças climáticas pressionam a geração de energia por fonte hidráulica, altamente dependente da precipitação e de sua variabilidade e, portanto, com elevado risco de escassez. Nesse sentido, estratégias que busquem um aumento da segurança energética com menor impacto ambiental são as principais formas de possibilitar uma transição energética sustentável e justa, além de um dos possíveis mecanismos para o enfrentamento das mudanças climáticas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é trazer uma discussão sobre desafios e oportunidades da transição energética sustentável, com enfoque no caso do Brasil, de forma a fornecer caminhos para este processo.

Palavras-Chave – Transição energética sustentável; Recursos hídricos; Mudanças climáticas.

¹USP, Programa de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento. São Carlos-SP, Brasil; ²INPE, Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia, São José dos Campos, Brasil; ³UFPEl, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas, Brasil; ⁴UFPE, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Recife, Brasil; ⁵CEMADEN, São José dos Campos, Brasil; ⁶UFPE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Brasil; ⁷University of Twente, Civil Engineering & Management, Enschede, The Netherlands. E-mails: ^apedrogc.silva@usp.br (autor correspondente); ^bmarcosbenso@usp.br; ^cgreicelene.silva@usp.br; ^demm@sc.usp.br; ^egabriela.gesualdo@usp.br; ^frodrigo.costa@inpe.br; ^gandre.goncalves@inpe.br; ^hiancap Miranda@usp.br; ⁱdaniebressiani@gmail.com; ^jenio.pereira@alumni.usp.br; ^kjosicleda@gmail.com; ^ladriana.cuartas@cemaden.gov.br; ^msuzanam.ufpe@gmail.com; ⁿm.s.krol@utwente.nl.

INTRODUÇÃO

Reduções rápidas e profundas nas emissões de CO₂ são necessárias para limitar o aquecimento para 1,5 °C nos próximos anos (IPCC, 2022; IRENA, 2023). O contínuo uso de fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis, colocou em evidência os impactos negativos trazidos pelas emissões de gases de efeito estufa (GEEs). Em consequência, eventos extremos, em escala global e regional, são cada vez mais severos, o que tem posto em risco a oferta de energia por usinas hidrelétricas em razão da escassez de água. Aliado a isso, a garantia da oferta de energia tem sido realizada nos últimos anos no Brasil através de usinas termelétricas, que fazem uso, basicamente, de combustíveis fósseis.

Com a necessidade de minimizar a dependência de fontes de energia derivadas de combustíveis fósseis visando a diminuição de impactos como a escassez de recursos hídricos e geração de GEEs, a transição para uma matriz energética mais sustentável tem sido amplamente discutida (Breyer et al., 2017). A ideia de transição energética surgiu para revolucionar o setor de energia e tem facilitado uma mudança significativa de fontes baseadas em carbono para fontes renováveis nas próximas décadas (Gorjian et al. 2021). Essa mudança envolve uma série de implicações que necessitam ser implementadas de forma integrada e são bases para essa transição: inovações tecnológicas; adaptação dos sistemas de transmissão; gestão inteligente dos recursos; adaptação e mitigação das mudanças climáticas; desenvolvimento sustentável e transição para fontes de baixo carbono.

No contexto global, de acordo com a Agência de Energia Internacional (IEA, 2023), os investimentos em energia limpa foram impulsionados por uma variedade de fatores. Isso inclui economia voltada para outras fontes de energia em um momento de alta e preços voláteis de combustível; maior apoio político por meio de instrumentos como a Lei de Redução da Inflação dos Estados Unidos (EUA) e novas iniciativas, nesse contexto, na Europa, Japão, China e outros lugares; o forte alinhamento dos objetivos de segurança climática e energética, especialmente em economias dependentes de importações; e um foco na estratégia industrial com os países, buscando fortalecer seus pontos de apoio na economia limpa emergente.

Das fontes de energia para a transição estão: bioenergia, solar, eólica, geotérmica, marinha, hidráulica e nuclear (IEA, IRENA, ABSOLAR, EPE, 2020). A energia solar se destaca, com crescimento anual significativo até 2050 (20 vezes a capacidade instalada). Projeções indicam que ela representa 38% da eletricidade em 2050 (DNV, 2023). Em 2023, espera-se que quase 90% do investimento em eletricidade seja em energias de baixas emissões. Investimentos diários em energia solar devem ultrapassar US \$1 bilhão em 2023 (US \$380 bilhões ao longo do ano) (DNV, 2023).

Essa tendência mundial também se aplica ao Brasil. Por sua localização geográfica, o país recebe elevados índices de radiação solar (inclusive maiores e mais bem distribuídos quando comparados com países onde a fonte solar é mais utilizada), o que permite desenvolver projetos solares viáveis em diferentes regiões. Assim, dada a redução de custos considerada, a fonte solar fotovoltaica se apresenta como alternativa competitiva para geração de energia, podendo contribuir com os compromissos nacionais de redução de GEE (Brasil, 2020; Slameršak et al., 2022). No entanto, no Brasil, essa transição ainda traz desafios para a consolidação de um cenário de menores emissões de carbono e de maior segurança energética. Esses problemas estão ligados à alta dependência de fontes não renováveis; infraestrutura inadequada; custo elevado de algumas das opções de tecnologias renováveis, como a eólica; políticas de regulamentação desfavoráveis; resistência de setores interessados; conscientização e educação sobre novos padrões energéticos (IEA, 2023).

Com isso, esse artigo tem como objetivo expor e discutir os desafios e oportunidades a fim de identificar estratégias e soluções viáveis à transição energética, com destaque ao uso de energia solar fotovoltaica, no Brasil. A seção de resultados e discussão do artigo aborda a situação da matriz energética brasileira; aspectos da necessidade de mudança da matriz energética; os principais desafios encontrados; por fim, abrange as políticas de incentivo para essa transição. Por meio dessa

abordagem, busca-se compreender os obstáculos e as possibilidades existentes, a fim de propor medidas efetivas na busca de transpassar as barreiras ainda persistentes.

METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho compreendeu a análise de documentos institucionais (nacionais e internacionais) de agências de monitoramento energético como forma de compilar os principais aspectos que envolvem a transição de matriz energética. Foram utilizadas as seguintes fontes principais:

1. Empresa de Pesquisa em Energia (EPE) - tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético;
2. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) - autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia criada para regular o setor elétrico brasileiro;
3. Grupo Banco Mundial - tem por objetivo contribuir para o desenvolvimento econômico e social dos seus países-membros;
4. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR) - única associação do Brasil que reúne todos os elos da cadeia de valor solar fotovoltaica e demais tecnologias limpas;
5. *International Energy Agency* (IEA) - atua com governos e indústria para moldar um futuro energético seguro e sustentável;
6. *International Renewable Energy Agency* (IRENA) - agência intergovernamental líder global para a transformação de energia, que serve como a principal plataforma para a cooperação internacional.

A partir da análise relacionada às fontes renováveis, em especial a solar fotovoltaica, foi feita uma revisão sobre os principais pontos, que seguem destacados neste documento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Situação atual da matriz energética e elétrica brasileira

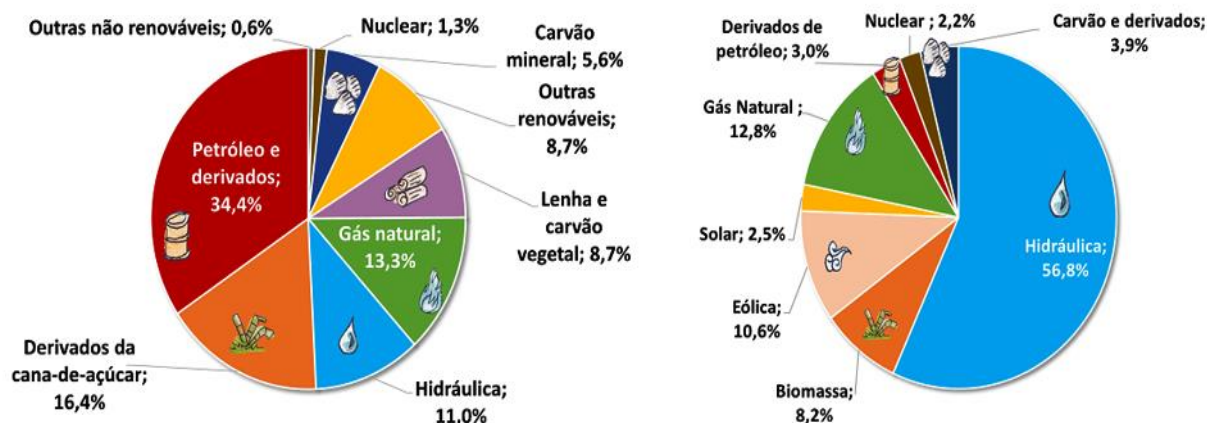
De acordo com o Fundo Populacional das Nações Unidas (UNFPA, 2023), a população mundial atual é de 8,045 bilhões de pessoas. No Brasil, a população chegou ao patamar de 216,4 milhões de pessoas. Esse aumento populacional pode estar diretamente relacionado com aumento da demanda por energia, impulsionado por dois principais fatores:

1. O aumento da população implica em um maior consumo de energia. À medida que a população cresce, mais pessoas necessitam de energia para atender às suas necessidades básicas, como eletricidade para iluminação, aquecimento e refrigeração, além de energia para transporte, indústria, entre outros setores. Portanto, um crescimento populacional maior resulta, em teoria, em uma maior demanda por energia.
2. O crescimento populacional pode estar associado ao desenvolvimento econômico de um país. Conforme a população cresce, há um aumento na mão de obra disponível, o que pode impulsionar a produção econômica e o consumo. Esse crescimento econômico geralmente demanda mais energia para impulsionar a produção industrial, transporte, infraestrutura e serviços.

No entanto, a relação entre crescimento populacional e disponibilidade energética não é linear (Brasil, 2020). O avanço tecnológico, mudanças nos hábitos de consumo e políticas de eficiência energética podem acompanhar o aumento da população, reduzindo a intensidade energética por pessoa e aliviando a pressão sobre os recursos. Diversificar a matriz energética com fontes renováveis e práticas sustentáveis é essencial para garantir disponibilidade energética adequada, independentemente do crescimento populacional.

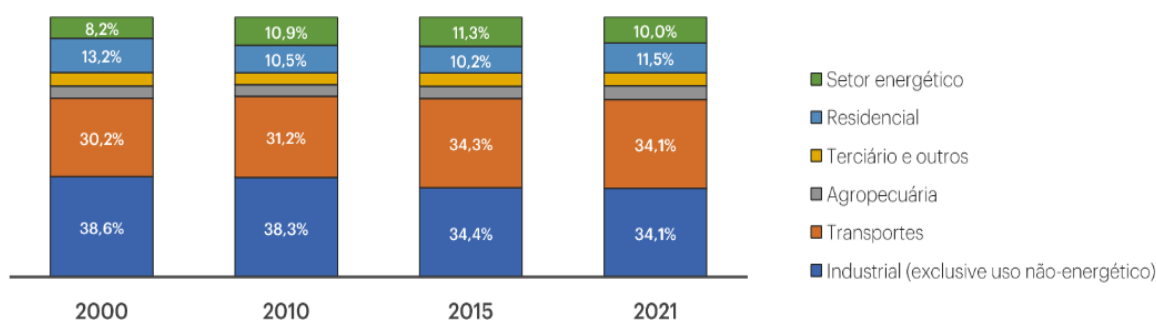
Dados da ANEEL (2023), ABSOLAR (2023) e Brasil (2020) mostram que a matriz energética brasileira é composta pelas seguintes fontes: hídrica, solar fotovoltaica, eólica, gás natural, biomassa+biogás, petróleo e outros fósseis, carvão mineral, nuclear e parte da energia vem da importação. A energia produzida através de hidrelétricas corresponde a 11%, como apresentado na Figura 1. A energia por combustíveis com potencial de emissão de GEEs corresponde a 51,6%. Quando verificamos a produção de energia solar esse valor é de apenas 2,5% (Figura 1).

Figura 1. Distribuição da produção da matriz energética (à esquerda) e elétrica brasileira (à direita).



Considerando o consumo por setor (Figura 2), os principais consumidores de energia são os setores de Transportes e Industrial, com alta emissão de GEEs. No setor de transportes, as emissões provêm principalmente do uso de combustíveis fósseis (gasolina, diesel) nos veículos, liberando CO₂ e outros poluentes atmosféricos. O transporte aéreo e marítimo também emitem grandes quantidades de CO₂ e outros GEEs devido ao consumo de combustíveis pesados. O setor industrial, por sua vez, emite significativamente devido ao uso intensivo de energia, especialmente de fontes não renováveis como carvão e gás natural. Processos industriais como produção de cimento, aço, papel e químicos também emitem GEEs.

Figura 2. Consumo de energia no Brasil por setor (Brasil, 2023)



Pondo em evidência a energia solar, a fatia ainda é bastante inexpressiva frente às demais fontes. No entanto, o Brasil vem crescendo neste setor e nos últimos anos bateu recorde na produção de energia advinda de fonte solar fotovoltaica (ABSOLAR, 2023). Isso se deve à diminuição do custo e ao crescimento da geração da energia solar distribuída. O aproveitamento deste recurso é relevante devido ao país encontrar-se em uma zona tropical, o que favorece uma alta incidência de radiação solar ao longo de todo o ano, fazendo com que a eficiência dos painéis solares seja maximizada, tornando a energia solar uma fonte viável e rentável no país.

Necessidade de mudança da matriz energética

Muitas das atividades humanas atualmente consomem energia, sendo que a maior parte dela é obtida através da queima de combustíveis fósseis (Breyer et al., 2017; IEA, 2023). No setor de transporte, a queima de gasolina e óleo diesel é responsável pela energia utilizada para movimentar os veículos. Na indústria, o gás natural e outros derivados de petróleo, como o óleo combustível, são amplamente utilizados. Essa queima de combustíveis fósseis resulta na emissão de grandes quantidades de GEE na atmosfera. No Brasil, as emissões de GEE estão primariamente relacionadas com a mudança do uso do solo (desmatamento e às queimadas); atividades agropecuárias vem em seguida, e logo atrás o setor de energia (sendo puxadas principalmente pelo setor de transporte e pelo setor industrial, devido ao uso predominante de combustíveis fósseis e suas operações).

As mudanças climáticas globais estão intimamente relacionadas às emissões de GEE resultantes da queima de combustíveis fósseis. Em todo o mundo, as preocupações com o clima têm impulsionado uma série de reflexões e iniciativas voltadas para a transição energética, que consiste em uma transformação na composição da matriz energética (IRENA, 2023; Slameršak et al., 2022). Para alcançar essa transição, os países estão concentrando esforços em reduzir a dependência de fontes de energia fósseis em suas matrizes, além de promover medidas para aumentar a eficiência energética, o armazenamento de energia e incentivar o uso de fontes que não emitam gases de efeito estufa durante sua operação.

Face às alterações no clima, os eventos extremos, como secas e inundações, têm se tornado cada vez mais frequentes e com magnitudes elevadas, pondo em evidência a necessidade da adoção de caminhos de desenvolvimento mais “verdes” e com impactos menores ao meio ambiente. Essa abordagem está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (UN, 2018). Os ODSs são uma coleção de 17 metas estabelecidas para abordar os desafios globais que enfrentamos, que foram adotados pelos países membros da Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 como parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Desses 17, os ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima; e o ODS 7 - Energia limpa e acessível.

Desafios e oportunidades para a transição da matriz energética

As implicações ambientais, sociais e econômicas da política energética devem ser consideradas de forma holística e devem ser refletidas em arranjos institucionais. Os formuladores de políticas e os projetistas de estratégias corporativas devem medir e avaliar os efeitos atuais e futuros da produção e uso de energia na saúde, equidade, economia e meio ambiente, entre outros. Os desafios dessa abordagem envolvem vários pilares que são fundamentais para que a transição possa ser posta em prática, são eles: ambiental, técnico-econômico, social e político-institucional.

A produção de energia geralmente leva a pressões antropogênicas significativas sobre o meio ambiente, incluindo mudanças climáticas, poluição do ar local, desmatamento, consumo de água, uso da terra, redução da qualidade do solo, entre outros. Muitos dos efeitos das atividades relacionadas à energia são de longo termo e possuem um certo grau de incerteza (IPCC, 2022; IRENA, 2023). Os indicadores ambientais incluem esses aspectos, bem como riscos associados com a atividade humana e desastres naturais. Esses indicadores são uso da água; impactos na qualidade da água e biodiversidade; uso do solo; impactos na qualidade do solo e biodiversidade terrestre; emissões de gases de efeito estufa; e vulnerabilidade e risco.

O pilar técnico-econômico avalia principalmente os custos de produção associados para diferentes tecnologias, um aspecto subjacente que determina as decisões de alocação de mercado para tecnologias energéticas. Também inclui outros aspectos, como curvas de aprendizado, efeitos *upstream* e *downstream* nas cadeias produtivas, eficiência de energia e diversidade. No que concerne ao aspecto social, há ligação direta com a criação de empregos e geração de receita. Esses fatores estão intimamente ligados ao estímulo ao crescimento econômico e suporte de políticas públicas. Já no aspecto político-institucional, há um número de questões que são de difícil quantificação ou que

tem um aspecto mais qualitativo, como a visão de futuro sustentável ainda aquém das ações necessárias para esse alcance (Brasil, 2023; IEA, 2023; ABSOLAR, 2023). A matriz energética brasileira e, em especial a matriz elétrica brasileira tem maior participação de energias renováveis que as matrizes mundiais, além do fato de o setor energético não ser o principal responsável pelas emissões de GEE.

Entretanto, visando o atendimento da demanda futura de maneira a manter a alta renovabilidade destas matrizes, a geração de energia por fontes renováveis como a eólica e a solar tem feito parte do planejamento energético do país, o que também incrementa a segurança energética. A segurança na geração de eletricidade é hoje garantida pelas termelétricas, funcionando como mecanismos de estabilização do sistema. Eles absorvem impactos relacionados à variabilidade climática, o que inclui a redução da geração por fonte hidráulica por conta da diminuição do volume dos reservatórios em função de períodos de estiagem, como os eventos de 2013-2014 e mais recentemente, entre os anos de 2020 e 2021. Seu acionamento pode ocorrer de forma mais imediata, o que também permite a suavização de efeitos de curto prazo, como a flutuação das fontes eólica e solar.

Um dos nossos maiores desafios está no setor de transportes, que utiliza principalmente combustíveis fósseis (Brasil, 2023). Para reduzir as emissões de GEE desse setor no Brasil, uma das iniciativas é o estímulo ao uso de biocombustíveis. Também está em discussão a eletrificação do transporte de passageiros através de ônibus elétricos e mesmo veículos de menor porte, que não emitem GEEs no seu funcionamento. Também se encontra em elaboração o programa Combustível do Futuro, que propõe medidas para incrementar o uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono.

Apesar disso, o Brasil pode causar impacto global com inovação em energia limpa (IEA, 2023). Desde que se tornou membro da IEA em 2017, o Brasil tem fortalecido sua cooperação em inovação. Em 2018, a EPE e o MME analisaram maneiras de vincular políticas de energia e inovação, buscando orientação da IEA sobre financiamento e apoio para inovação em energia limpa. Essas discussões levaram ao projeto Energy Big Push em 2019, apoiado pelo governo alemão e pelas Nações Unidas. Ele reuniu importantes atores governamentais, incluindo a EPE e o Centro de Estudos e Gestão Estratégica, para melhorar dados e embasar políticas de inovação energética no Brasil (IEA, 2023).

Para impulsionar o uso da energia solar fotovoltaica, os principais desafios são: alto custo inicial dos equipamentos, como módulos fotovoltaicos, dificultando a adoção em larga escala; infraestrutura inadequada da rede elétrica brasileira para atender à geração distribuída e permitir a interligação dos sistemas; regulamentação e burocracia, com processos de licenciamento, conexão à rede e compensação de energia demorados e complicados; e falta de linhas de financiamento e crédito, representando um desafio significativo para sua disseminação (IRENA, 2023; Carstens e Cunha, 2019). No entanto, superar essas barreiras podem impulsionar o aumento de empregos, competitividade industrial, diversificação energética, incremento de créditos de carbono, disponibilidade hídrica e ter um impacto positivo no clima.

De acordo com a ABSOLAR (2023), em dados acumulados desde o ano de 2012, em termos de geração de energia solar, o país detém mais de 28,9 GW operacionais, R\$ 143,4 bilhões em investimentos, geração de mais de 868,8 mil empregos; mais de R\$ 42,7 bilhões em arrecadação de tributos e mais de 36,7 milhões de toneladas de CO₂ evitadas. Esses números servem para mostrar que o mercado de energia fotovoltaica apresenta um nicho promissor e pode não só agregar valor de mercado, mas também contribuir para a consolidação de uma matriz energética nacional mais limpa.

Carstens e Cunha (2019) afirmam que o setor fotovoltaico brasileiro pode ser dividido em sete grupos de interesse: a) indústria; b) instituições governamentais; c) associações e ONG's; d) financiadores; e) treinamento profissional e educação; f) geração centralizada; g) geração distribuída. Esse agrupamento e trabalho conjunto propiciará competitividade, mas as políticas públicas necessitam de adaptação às condições de mudanças do mercado consumidor (IEA, 2023).

Abordagens de complementaridade entre fontes energéticas são frequentemente implementadas para a transição energética e para lidar com flutuações em diversas escalas, promovendo maior segurança energética. Por exemplo, empreendimentos híbridos que combinam geração solar fotovoltaica e eólica permitem aumentar o fator de capacidade da instalação e possibilitam a geração durante a noite ou em condições meteorológicas desfavoráveis, como calmaria. Essas estratégias proporcionam benefícios em termos de aproveitamento mais eficiente dos recursos e maior resiliência do sistema energético.

No mesmo sentido, quando se considera a geração por fonte hidráulica juntamente com a fonte solar (como no caso da geração por fonte solar fotovoltaica flutuante instalada nos reservatórios das hidroelétricas), a fonte solar pode ser o principal mecanismo gerador em períodos de estiagem, mantendo o recurso hídrico disponível para outros usos – por muitas vezes, conflitantes – como irrigação ou abastecimento humano ao invés de gerar energia. Esta também seria uma abordagem para gerir o recurso hídrico enquanto uma espécie de bateria do sistema, o que permite absorver flutuações de ordem sazonal, relacionadas com a precipitação. Há ainda possíveis incrementos na geração em regiões de grandes lagos, onde a brisa lacustre diminui a formação de nebulosidade nestes locais no período vespertino, o que aumentaria a geração por fonte fotovoltaica como apontado por Gonçalves et al. (2020).

Também é importante trazer a problemática da instalação massiva da fonte solar fotovoltaica, o que demanda uma massiva instalação de módulos, com vida útil de 20 – 30 anos. Chowdhury (2020) estima que 78 milhões de toneladas de lixo serão geradas até 2050 e que, portanto, serão necessárias melhorias nos processos de reciclagem, com melhor e maior aproveitamento dos diversos materiais envolvidos, além de uma maior viabilidade econômica do processo. Uma transição baseada na fonte solar pode acarretar também o desafio de gestão do descarte dos painéis, não sendo esse impacto completamente explorado (BBC, 2023).

Análise crítica das políticas e medidas para avançar a transição

As energias renováveis são estratégicas para lidar com flutuações de preços de combustíveis e atraem investimentos privados significativos (ABSOLAR, 2023). No entanto, o Brasil está atrasado em energia solar em comparação com outros países desenvolvidos e em desenvolvimento de porte equivalente, apesar de possuir um dos melhores recursos solares do mundo. De acordo com a IRENA (2023), é necessário um investimento global de mais de \$1,7 trilhões de dólares por ano para atingir a meta de temperatura de 1,5 °C até 2050. Isso requer uma transição energética urgente e esforços multissetoriais. Um sistema de energia sustentável só é alcançável com o máximo aproveitamento das melhores inovações em produtos e serviços energéticos em todos os setores (IRENA, 2023). Para isso, é essencial impulsionar investimentos públicos e privados, bem como parcerias público-privadas, desempenhando um papel fundamental nesse contexto.

O Relatório sobre Clima e Desenvolvimento para o Brasil (World Bank, 2023) afirma, o país em 2050 possui oportunidades de descarbonização da matriz com zero emissões brutas, a um custo incremental insignificante para o setor elétrico em comparação a cenários de referências (Business as Usual-BAU, Figura 3). O cenário ZPS (sistema de zero emissões) prevê um acréscimo de 10 GW do armazenamento hidrelétrico até 2050, o que custaria somente 1 bilhão a mais em comparação ao BAU (Figura 4). Além disso, se projetarmos o cenário ZPS resiliente aos impactos das mudanças climáticas, o mesmo ainda se apresenta como um cenário econômico, se comparado ao BAU sob as mesmas condições de baixa hidrologia.

Segundo a ABSOLAR (2023), há pontos importantes para o crescimento da energia solar fotovoltaica: 1) Participação na criação e aprimoramento dos marcos legais regulatórios; 2) Busca por incentivos tributários justos; 3) Articulação com o sistema bancário por mais linhas de financiamento acessíveis; 4) Consolidação da cadeia produtiva nacional; 5) Desenvolvimento de competências em avaliação econômica, autorização, construção e operação de sistemas fotovoltaicos;

6) Estabelecimento de normas e boas práticas técnicas; 7) Certificação de profissionais e empresas para garantir qualidade; 8) Relacionamento produtivo com as concessionárias para cumprir diretrizes e responsabilidades legais; e 9) Fiscalização, intervenção e punição pelo regulador para garantir o cumprimento das regras vigentes.

Figura 3. Cenários de transição energética para o Brasil, em R\$ bilhão (World Bank, 2023).

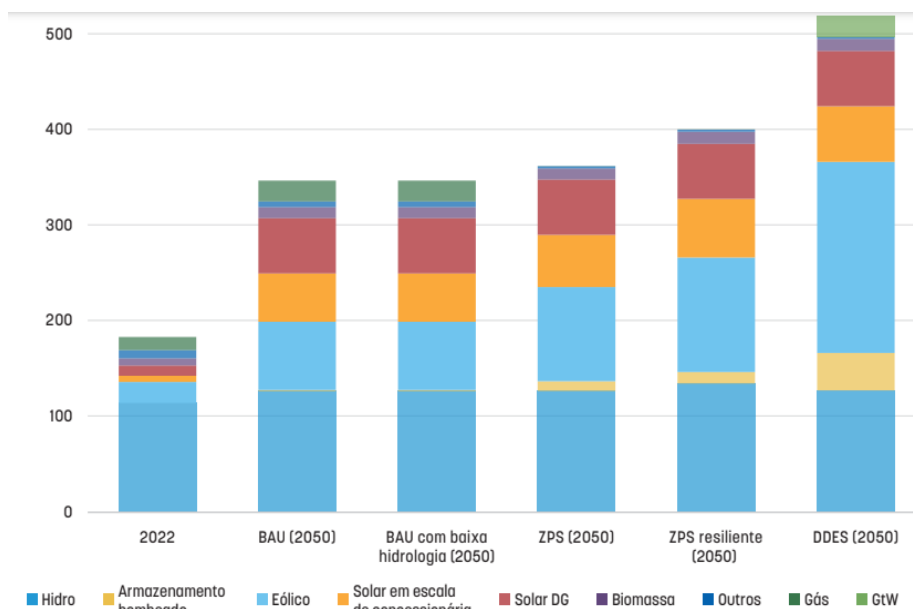
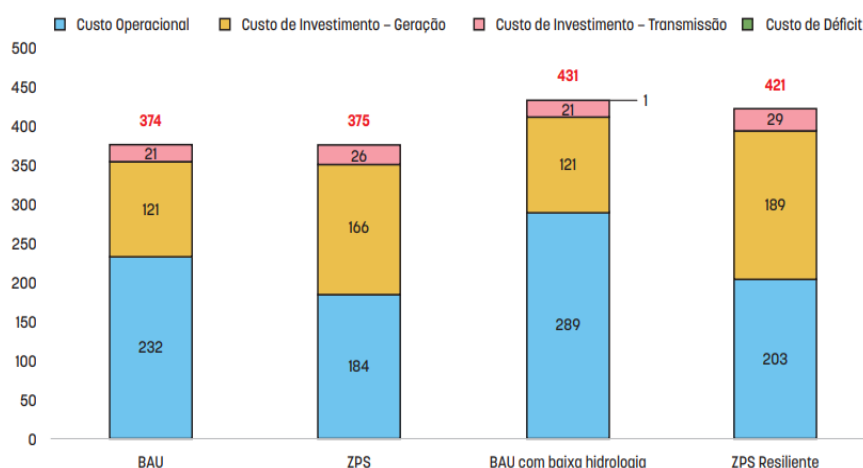


Figura 4. Custo líquido para alguns cenários brasileiros para 2050, em R\$ bilhão (World Bank, 2023).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a situação atual da matriz energética e elétrica do Brasil, o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico aumentam a demanda por energia. No entanto, a relação entre crescimento populacional e disponibilidade energética não é linear. Avanços tecnológicos, mudanças nos hábitos de consumo e políticas de eficiência energética podem reduzir a intensidade energética por pessoa. Além disso, é fundamental diversificar a matriz energética com fontes renováveis para garantir uma disponibilidade energética adequada, independentemente do crescimento populacional. Atualmente, o Brasil depende principalmente de fontes não renováveis, o que torna necessário buscar uma transição para uma matriz mais sustentável. A transição energética

enfrenta desafios ambientais, técnicos, econômicos, sociais e políticos, mas também oferece oportunidades para impulsionar a inovação em energia limpa e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

A energia solar representa uma alternativa altamente promissora para a transição energética nacional, devido à sua natureza renovável e à variedade de benefícios que oferece. Entre esses benefícios estão a capacidade de reduzir as emissões de carbono, a disponibilidade abundante do recurso e a capacidade de geração distribuída. Apesar disso, a adoção em larga escala ainda enfrenta desafios significativos, como o custo inicial elevado dos sistemas solares, dificultando o acesso e a disseminação. Além disso, a infraestrutura elétrica precisa ser atualizada para lidar com a geração distribuída. Os desafios incluem complexidade regulatória e burocrática, falta de conscientização e educação sobre os benefícios da energia solar, bem como questões técnicas e de qualidade. Apesar desses obstáculos, os esforços direcionados à superação desses desafios têm o potencial de impulsionar um futuro com uma geração de energia mais limpa, resultando em uma redução dos impactos causados pelas emissões de gases de efeito estufa e limitando o aumento da temperatura global.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Proc. 141079/2022-3 e INCT ONSeadapta Proc. 406919/2022-4) e Projeto OUR-EYES (FAPESP 2022/07521-5; FACEPE PROJ-APQ-0392-22).

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABSOLAR. (2023). “*Políticas públicas para catalisar o desenvolvimento da energia solar no Brasil*”. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/artigos/politicas-publicas-para-catalisar-o-desenvolvimento-da-energia-solar-no-brasil/>>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- Brasil, Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2023). “*Plano Nacional de Energia 2050 / Ministério de Minas e Energia*”. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.
- BREYER, C.; BOGDANOV, D.; GULAGI, A.; AGHAHOSSEINI, A.; BARBOSA, L. S.N.S.; KOSKINEN, O.; BARASA, M.; CALDERA, U.; AFANASYEVA, S.; CHILD, M.; FARFAN, J.; VAINIKKA, P. (2017). “*On the role of solar photovoltaics in global energy transition scenarios*”. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 25, n. 8, p. 727–745, 17 mar. 2017.
- BBC Brasil (2023). “*Por que popularização de painéis solares pode causar ‘bomba ambiental’*”. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/articles/cw4vpveq7pyo>>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- CARSTENS, D. D. DOS S.; CUNHA, S. K. DA. (2019). “*Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil*”. *Energy Policy*, v. 125, p. 396–404, fev. 2019.
- DNV - When trust matters – DNV. (2023). Disponível em: <<https://www.dnv.com/>>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- Gonçalves, A.R.; Assireu, A.T.; Martins, F.R.; Casagrande, M.S.G.; Mattos, E.V.; Costa, R.S.; Passos, R.B.; Pereira, S.V.; Pes, M.P.; Lima, F.J.L.; et al. (2020). Enhancement of Cloudless Skies Frequency over a Large Tropical Reservoir in Brazil. *Remote Sens.* 2020, 12, 2793. <https://doi.org/10.3390/rs12172793>.
- GORJIAN, S.; SHARON, H.; EBADI, H.; KANT, K.; SCAVO, F. B.; TINA, G. M. (2021). “*Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems*”. *Journal of Cleaner Production*, v. 278, p. 124285, jan. 2021.

- GRAMKOW, C. (2023). BRASIL PERSPECTIVAS, “*O Big Push Ambiental no Brasil Investimentos coordenados para um estilo de desenvolvimento sustentável*”. [s.l: s.n.]. Disponível em: <http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44506/S1900163_pt.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- Grupo Banco Mundial. (2023). “*Relatório sobre clima e desenvolvimento para o país*”. América Latina e Caribe. Brasil - 2023. Washington DC, 2023. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/af026935-5f2d-4edd-b19e-d8fb66f6e9da/content>. Acesso em: 12 jun 2023.
- International Energy Agency (IEA). (2023) “*Clean Energy Transitions Programme – Programmes*”. Disponível em: <<https://www.iea.org/programmes/clean-energy-transitions-programme>>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- _____. (2023). “*Renewable power on course to shatter more records as countries around the world speed up deployment – News*”. Disponível em: <<https://www.iea.org/news/renewable-power-on-course-to-shatter-more-records-as-countries-around-the-world-speed-up-deployment>>.
- IPCC, (2022): “*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*”. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). “*World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*”, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2023.
- Md. Shahariar Chowdhury, Kazi Sajedur Rahman, Tanjia Chowdhury, Narissara Nuthammachot, Kuaanan Techato, Md. Akhtaruzzaman, Sieh Kiong Tiong, Kamaruzzaman Sopian, Nowshad Amin. (2020). An overview of solar photovoltaic panels’ end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, Volume 27, 2020, 100431, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.
- Slameršak, A., Kallis, G. & O’Neill, D.W. (2022). Energy requirements and carbon emissions for a low-carbon energy transition. *Nat Commun* **13**, 6932 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33976-5>.
- United Nations - UN. (2018). “*The 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals: An opportunity for Latin America and the Caribbean*” (LC/G. 2681-P/Rev). 2018.
- UNITED NATIONS POPULATION FUND, UNFPA - United Nations Population Fund. (2023). Disponível em: <<https://www.unfpa.org/>>. Acesso em: 09 jun. 2023.