



(Foto: Ari Verisani/PAC. Reprodução)

Transição energética não deve apenas reduzir e neutralizar as emissões de carbono, mas também contribuir para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental do país

Transição energética no Brasil

* Gilberto de Martino Jannuzzi

Resumo

A transição energética no Brasil é um processo complexo que vai além da adoção de fontes renováveis. Exige reformas profundas na infraestrutura energética, integração de setores de consumo e reformas regulatórias. A formação de capital humano especializado é crucial para impulsionar inovações e garantir a flexibilidade do setor de serviços de energia. O Brasil tem investido em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) no setor energético, com investimentos anuais de R\$ 4,5 bilhões entre 2017 e 2022. O desafio é redirecionar esses investimentos para temas mais alinhados à transição energética e descarbonização da economia. Além disso, a transição energética exige esforços de adaptação, visando maior resiliência e controle dos impactos das mudanças climáticas. A transição energética é essencial para o Brasil alcançar um futuro mais sustentável e competitivo, e seu sucesso dependerá da colaboração entre diferentes setores da sociedade.

Palavras-chave: Sistema energético; Energia renovável; Eficiência energética; Mudanças climáticas.

Introdução

As crescentes ocorrências de extremos climáticos em diversas regiões do mundo, inclusive no Brasil, reiteram a necessidade de uma rápida redução de emissões de gases de efeito estufa (GEEs), cuja maior participação decorre da produção e uso de combustíveis fósseis. Relatórios como *Assessment Reports* (AR) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) [1], os acordos internacionais, os compromissos nacionais e estaduais [2,3,4,5,6], reconhecem o problema e contemplam recomendações e ações para a redução de emissões.

Grande parte das oportunidades para a descarbonização da economia já são conhecidas e estão se tornando cada vez mais econômicas e viáveis. As estratégias se concentram na disseminação acelerada de tecnologias de baixo carbono e eficiência energética, e dependem de transformações na infraestrutura física, regulatória, e do sistema financeiro, bem como dos comportamentos de investidores (públicos e privados) e consumidores de energia. O maior uso de energia solar, biomassa, eólica (inclusive *offshore*) e tecnologias eficientes de uso final de energia já são opções competitivas com combustíveis fósseis para geração de calor e eletricidade [1] (Figura 1).

O desafio é que a transição para uma economia descarbonizada implica em

uma transformação muito mais abrangente, conforme mencionado acima, que transcende os limites do setor energético convencional. O debate se concentra não só na velocidade que se deseja imprimir a essas transformações, mas também nas trajetórias a serem escolhidas, considerando as oportunidades e os impactos no desenvolvimento econômico, social e ambiental desejado pela sociedade.

O Brasil possui características particulares de disponibilidade de recursos naturais que lhe oferecem grandes oportunidades para realizar essa transição energética de maneira exemplar, mais rápida e possivelmente a menores custos do que muitos países. Ao fazer isso, existe também a oportunidade significativa de aprendizado tecnológico, de inovações em modelos de negócios e instrumentos de política pública. Esses fatores podem potencialmente trazer vantagens competitivas para

“O Brasil possui características particulares de disponibilidade de recursos naturais que lhe oferecem grandes oportunidades para realizar essa transição energética de maneira exemplar.”

produtos e serviços produzidos no país, além de servirem com referência global.

Este artigo busca, inicialmente, definir melhor o entendimento sobre transição energética, apresentando um referencial para análise dessa transição. Em seguida, discute algumas oportunidades e desafios para os próximos anos no Brasil para financiar pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) que acelere a transição energética brasileira promovendo trajetórias de desenvolvimento econômico sustentável, com equidade social.



(Foto: BNDES. Reprodução)

Figura 1. Energia solar tem um papel de destaque na transição energética para economias de baixo carbono.

Afinal, o que é transição energética?

Várias transições

Transições energéticas não são novidades. A história da civilização apresenta inúmeros exemplos de transições que são movimentos progressivos de transformações na composição das fontes de energia utilizadas para produzir calor, iluminação e força motriz, atendendo a uma variedade crescente de necessidades [7]. Periodicamente, essas mudanças deslocam fontes de energia primária dominantes por outras capazes de fornecer serviços mais eficientes e de melhor qualidade. Exemplos clássicos incluem a substituição da lenha pelo carvão e, posteriormente, a predominância do petróleo. Esse é o resultado da última transição que também acelerou a importância e conveniência da eletricidade como energia secundária.

Crises ou choques repentinos de disponibilidade de recursos energéticos e, conseqüentemente, nos preços de energia, aceleram e tem provocado essas transições. Tecnologias inovadoras e/ou disruptivas capazes de executar serviços de energia de maneira mais eficiente, com maior conforto e menores custos fazem parte dos processos de transição energética, e determinam a importância de uma fonte primária (ou secundária) de energia sobre outras. Transição energética tem uma grande importância na medida em que é também capaz de direcionar a

estrutura econômica de um país ou região [8,9,10]. Restrições ambientais e sociais são também determinantes nos processos de transição energética. Exemplos não faltam, como a corrida e posterior desaceleração da energia nuclear, assim como a expansão de hidroeletricidade no Brasil, instalação de complexos para processamento de petróleo, zoneamento de plantação de cana-de-açúcar para fins energéticos.

A literatura que analisa características e impactos das várias transições energéticas é extensa e sólida (ver, por exemplo, [11,12,13,14,15]) e incluem aspectos referentes a impactos em diferentes classes socioeconômicas, setores econômicos, gênero, abrangência geográfica, e mesmo aspectos etários e entre gerações.

Transição energética não está restrita ao setor de produção (ou conversão) de combustíveis e eletricidade. Como vemos, ela inclui também transformações estruturais nos setores de consumo ou uso final de energia. Algumas tecnologias de uso final são capazes de transformar rapidamente o consumo de energia de um

setor específico, como foi o caso da disseminação de lâmpadas LED no setor de iluminação [16]. Tecnologias de uso final de energia, sua disseminação e distribuição entre consumidores, seja através de preferências de mercado ou de políticas públicas também determinam a velocidade e rotas da transição energética.

O aumento da digitalização de diversos processos e da sua importância na economia moderna confere um papel de destaque para a eletricidade e integração crescente do setor energético com o de telecomunicações. Confere também maior flexibilidade para a operação do setor energético e as possibilidades de maior integração de fontes renováveis intermitentes, tecnologias e sistemas de armazenamento de energia, modificações da demanda de energia (também conhecido como Resposta da Demanda) e mesmo a integração do setor de transportes com o elétrico.

Políticas públicas têm sido extremamente importantes para promover diferentes trajetórias e assim determinar a velocidade da transição energética. Por exemplo, a política energética da Alemanha "*Energiewende*", iniciada na década de 1980 visava desenvolver uma economia sem petróleo e energia nuclear, buscando benefícios ambientais, aumentar a segurança energética do país e promover a inovação tecnológica. Com isso, aquele país realizou, na época, grandes investimentos e avanços tecnológicos em energia solar e eólica, além de buscar aumentar a eficiência de uso final de energia, como uma política pública [17, 18].

"A transição que se busca deve atender às crescentes demandas e maior acesso aos serviços de energia para a população, de modo a garantir sustentabilidade ambiental, inclusão de gênero, geração de emprego e custos finais acessíveis."

No Brasil, tivemos, no início da década de 1960, um grande esforço para fazer uma transição da lenha (e carvão vegetal), usada para cocção doméstica, para o GLP, um combustível mais limpo e eficiente. Para realizar essa transição em escala nacional foram necessários quase 30 anos de subsídios ao consumidor final, uma garantia de abastecimento seguro (e também fortemente subsidiado) através de uma empresa estatal (Petrobras), da criação de uma extensa rede de distribuição nacional através de entes privados e de instrumentos de regulação (tanto econômica como a de segurança ao usuário final) desse mercado [19,20].

Outro exemplo nacional bastante interessante para ilustrar diferentes aspectos de transições energéticas, é o caso do etanol como substituto (parcial e total) à gasolina. Novamente, temos uma política pública preocupada em mobilizar investimentos (públicos e privados) para garantir suprimento de um novo combustível produzido localmente. Foram criados subsídios ao novo combustível e aos novos motores automotivos para conseguir transformar o mercado consumidor de energia. Houve, inclusive, financiamento público para desenvolvimento de novas tecnologias e práticas agrícolas com objetivo de aumentar a produtividade de cana-de-açúcar e produção do etanol, assim como a adaptação e eficiência de veículos para o novo combustível. Além de simultaneamente, haver a criação de rede nacional de distribuição [21,22,23]. O etanol possibilitou um extenso e importante aprendizado tecnológico e de política pública de gestão da demanda e oferta



(Foto: Elza Flúza/Agência Brasil. Reprodução)

Figura 2. A construção de um arcabouço de políticas públicas pode garantir ao Brasil protagonismo na transição energética global.

de um novo combustível, ainda que de maneira parcial para o setor energético [24] (Figura 2).

A transição energética necessária hoje

A característica mais relevante da atual transição energética é sua necessidade imperativa de redução drástica das emissões de gases de efeito estufa, especialmente o CO₂ proveniente da combustão de combustíveis fósseis. De um certo modo, é uma transição de volta a energéticos que historicamente foram substituídos, como energia solar, biomassa e energia eólica. No entanto, agora isso é feito com notável progresso tecnológico em termos de eficiência, praticidade e redução de custos dos mesmos.

É consensual que a transição necessária é, de fato, um esforço em aumentar a participação de fontes renováveis, mas também

inclui maior eficiência no uso final e, novas rotas de conversão de energia primária em outras fontes, como, por exemplo, a produção de hidrogênio e maior eletrificação [1]. Ao mesmo tempo, a transição que se busca deve atender às crescentes demandas e maior acesso aos serviços de energia para a população, de modo a garantir sustentabilidade ambiental, inclusão de gênero, geração de emprego e custos finais acessíveis [25]. Essas características da atual transição energética são importantes ao se analisar as diferentes rotas para atingi-la.

Alguns aspectos merecem também atenção. A maior dependência de fontes renováveis introduz novas vulnerabilidades além de sua intermitência sazonal, como a influência da própria mudança do clima nos padrões de pluviosidade, ventos e insolação. Isso significa maiores preocupações com o que chamamos de “segurança

energética” e demonstra a crescente importância de sistemas de armazenamento de energia e de maior eficiência nos usos finais de energia. O sistema energético que deveremos construir durante a atual transição energética será muito mais complexo e deverá ser altamente flexível, envolvendo as diversas alternativas que já conhecemos, tanto do lado da oferta como da demanda de energia, e novos modelos de negócio através do maior uso de tecnologias que chamamos de tecnologias de interface. A geração distribuída de eletricidade e calor, por exemplo, possibilita o surgimento de novos agentes no mercado de energia: o prosumidor (consumidor capaz de gerar e vender seus excedentes para a rede). Deverá ser o resultado de ações de adaptação às mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, contemplar ações de mitigação dos efeitos atuais. A implementação conjunta de ações de mitigação (redução de emissões) e adaptação, considerando os compromissos nacionais [i], gera benefícios adicionais e sinergias para a saúde e o bem-estar humano [1].

As mesmas dinâmicas das transições anteriores aplicam-se, mas agora com novas exigências socioeconômicas e ambientais e considerável aumento do conhecimento científico sobre alternativas para enfrentamento da mudança do clima e emissões de gases estufa.

A velocidade da descarbonização depende diretamente da rota de descarbonização escolhida e dos benefícios que se busca alcançar. A linguagem adotada em Dubai, na COP28, foi “*transitioning*

away from fossil fuels”, que revela a velocidade mais modesta da trajetória global de descarbonização, consolidando o debate aparentemente semântico que se estabeleceu sobre uma recomendação de “*phase-out*” ou “*phase-down*”, uma transição mais agressiva ou menos agressiva, respectivamente.

Especialmente para países em desenvolvimento e mais pobres, como o caso do Brasil, a descarbonização necessita incorporar os objetivos de desenvolvimento socioeconômicos. Essas rotas ou trajetórias podem incluir alguns setores da economia, ou toda a economia e começa a ser qualificada como transição justa com equidade social, igualdade de gênero, etc. [26, 27, 28].

Transição energética no Brasil

Embora aumentar a participação de fontes renováveis seja crucial, essa maior dependência também introduz novas vulnerabilidades, como a influência das mudanças climáticas nos padrões de pluviosidade, ventos e insolação, conforme já mencionado. O Brasil, que já enfrentou crises de abastecimento elétrico, justamente por ter grande participação de fonte renovável (hidroeletricidade), buscou, como parte importante de sua estratégia de segurança energética, a expansão de seu parque termoelétrico. Daqui em diante, essa não será uma opção e, portanto, transição energética com segurança de abastecimento deverá se apoiar em aumentar as opções de

oferta de energia renovável e gestão da demanda, juntamente com um conjunto de tecnologias e instrumentos econômicos que possibilitem maior flexibilidade na operação do sistema elétrico, incluindo sua maior integração com o setor de transportes (elétrico) e de comunicações.

A transição energética no Brasil precisa também considerar a importância econômica do setor de petróleo e gás para o país e, conseqüentemente, sua contribuição para as emissões atuais e futuras. No que se refere a produção de petróleo, o país ocupava o nono lugar no mundo, com 3,1 milhões de barris por dia, em 2023. É também o nono país em termos de consumo de derivados de petróleo. A exploração, refino e exportação de petróleo, assim como o gás natural, representam uma atividade econômica importante no Brasil, especialmente ao nível local e estadual. Será necessária a participação desse setor nos custos e seu papel nas rotas da transição energética do país.

Outro fato importante no contexto nacional é que uma parcela da população tem dificuldades de acesso e manutenção de serviços de eletricidade [29], transporte e combustíveis para cocção. A região amazônica é um caso desafiador para o fornecimento ambiental e economicamente viável de energia para usos básicos e de desenvolvimento econômico. A transição deverá enfrentar essa pobreza energética, como é caracterizado esse problema. E isso deverá ser feito com tecnologias e energia renovável, através de financiamento e modelos de negócio inovadores. Esse salto para novos patamares

tecnológicos (*technological leapfrogging*) na área de energia foi inicialmente proposto por Goldemberg *et al.* [30], e trabalhos mais recentes analisam as oportunidades da geração distribuída e outras estratégias como alternativas de renda e acesso a serviços de energia para população de baixa renda [31,32,33].

Ainda, outro fato relevante na agenda de enfrentamento a mudanças climáticas e transição energética são os esforços de aumentar a eficiência energética do lado da demanda. Não obstante diversas iniciativas, desde a primeira crise de abastecimento de petróleo, em meados dos anos 1970, o país figurou na modesta 19ª posição na classificação internacional entre as 25 maiores economias que respondem a 82% do consumo mundial de energia (2022), ao se analisar esforços relacionados com eficiência energética [34]. Esse estudo é realizado periodicamente pelo Conselho Americano para uma Economia com Eficiência Energética (ACEEE, na sigla em inglês) e considera diversos indicadores de desempenho técnico, econômico, políticas públicas e regulação que favoreçam o uso eficiente de energia, especialmente nos setores de edificações, transportes e indústria. Com dificuldades, o país tem avançado em estabelecer indicadores mais ambiciosos de eficiência energética de veículos a combustão, equipamentos elétricos e de aparelhos de ar-condicionado [35,36].

O Brasil é signatário de diversos acordos internacionais que lhe conferem compromissos para realizar essa transição na

direção de maior uso de fontes renováveis, redução de emissões de metano e de maior eficiência energética. O país assumiu compromisso de neutralidade de carbono em 2050. Embora já possua grande participação de fontes renováveis, especialmente para geração de eletricidade, serão necessárias inovações em instrumentos de políticas públicas, tanto para desenvolver como financiar a transformação de mercados de tecnologias e energéticos, especialmente no setor de transportes (carga) e alguns segmentos industriais.

Elementos essenciais da transição energética

Como vimos, a transição energética que se busca não apenas deverá reduzir e neutralizar as emissões de carbono, mas também contribuir para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental do país. Entendemos que as diferentes trajetórias de descarbonização que podem compor uma transição atual deve se organizar segundo os eixos estruturantes que já aparecem em diversos documentos oficiais [37,38,39]. Destacamos a seguir alguns desses eixos.

Tecnologias de energia

Embora o desenvolvimento de tecnologias para a transição para uma economia de baixo carbono continue crucial e deva ser um foco constante, este não se configura como o principal desafio para o Brasil nos curto e médio prazos. Na verdade,

o país possui expertise para exportar soluções tecnológicas nesse campo (bioenergia, por exemplo). Diversos estudos, inclusive as Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) brasileiras, indicam que os maiores desafios residem na difusão das tecnologias existentes, o que exige políticas climáticas robustas, instrumentos de mercado adequados e regulamentações eficazes.

Energia eólica-offshore pode se beneficiar de instalações já presentes e aproveitar a experiência e *know-how* existente no setor de petróleo e gás para se estabelecer como uma importante fonte de geração de eletricidade que poderá ser utilizada para produção de hidrogênio verde ou, integrado ao sistema interligado nacional, com maiores investimentos em transmissão e distribuição [40].

Como já mencionado, a maior dependência de fontes intermitentes necessitará de sistemas e tecnologias de armazenamento de eletricidade e integração. Essa infraestrutura deverá ser muito mais flexível do que a que temos atualmente, capaz, inclusive, de rapidamente poder contar não só com diferentes fontes de eletricidade, como também com instrumentos de modificação da demanda.

Cabe salientar que diversas tecnologias limpas e eficientes já estão disponíveis comercialmente, inclusive no Brasil. Aprimoramentos regulatórios (incluindo tarifação), integração entre redes inteligentes de eletricidade, gestão da demanda de energia, sistemas de telecomunicações e de transporte, aliada à confiabilidade, estabilidade e capacidade de resposta desses

sistemas frente a eventos climáticos extremos, são áreas que demandam atenção prioritária.

Modernização da infraestrutura física de fornecimento e uso de energia

A infraestrutura do Brasil de energia (petróleo & gás e eletricidade) foi construída principalmente após a Segunda Guerra Mundial, com maior intensidade a partir da década de 1970. Grande parte dessa infraestrutura, incluindo a malha viária, já não atende às demandas atuais, como a integração de novas tecnologias (incluindo geração distribuída, maior uso de biometano, biogás e futuramente hidrogênio) e a resiliência a eventos climáticos extremos.

Maior uso de fontes de energia solar e eólica (*onshore* e *offshore*) implicarão em adaptações e inovações no setor de transmissão e operação do sistema elétrico, que também se integrará com o setor de transporte elétrico e de armazenamento de energia (e produção de hidrogênio verde).

É urgente adaptar e inovar não apenas os sistemas de geração, transporte e distribuição de energia, mas também a infraestrutura de consumo de energia (malha viária, prédios, equipamentos, veículos e planejamento urbano). Grande parte das tecnologias eficientes e de baixo carbono, especialmente eletromobilidade, exigem novas estruturas capazes de operar em redes e integradas ao ambiente

construído e resilientes a eventos climáticos [41].

Reformas institucionais e regulatórias

A transição para uma economia de baixo carbono e a maior participação de novas tecnologias de conversão de energia exigem reformas profundas no ambiente regulatório e institucional [38]. Essa necessidade se estende além das novas tecnologias de conversão de energia, abrangendo também as tecnologias digitais que possuem a capacidade de introduzir novos modelos de negócios, incorporar e integrar novos agentes econômicos e possibilitar a integração de setores como transportes, habitação e comunicações.

Esses desafios exigem investigação, avaliação de impactos e planejamento abrangentes. Para alcançar os objetivos da transição energética é necessário revisar e reformar as instituições, sua regulação técnica e econômica, e adaptá-las às novas realidades tecnológicas. Isso permitirá a necessária participação de investimentos e esforços da iniciativa privada para o desenvolvimento de novos mercados de energia, preservando benefícios públicos e sustentabilidade ambiental. É conhecido que o volume de investimento necessário para promover a transição energética vai muito além daqueles que podem ser financiados pelo setor público.

É importante ter em mente que os arranjos institucionais,

regulatórios, instrumentos de financiamento e recursos humanos são peças críticas no desenvolvimento do mercado de energia de baixo carbono e que precisam ser considerados para serem capazes de atrair recursos financeiros para investir na transição energética.

Financiamento e novos modelos de negócio para a transição energética

A transição para um sistema energético mais sustentável e resiliente exige investimentos significativos em novas tecnologias, infraestrutura e modelos de negócio. As políticas públicas devem contemplar mecanismos de financiamento (público e privado) para sistemas de inovação e para a modernização de cadeias produtivas relevantes à transição energética. Isso inclui desde a pesquisa e desenvolvimento até a implementação e comercialização de novas tecnologias.

É crucial estimular a criação de novos modelos de negócio, especialmente para PMEs e startups nas áreas de tecnologia e finanças. Isso pode ser feito através de incentivos, parcerias e programas de desenvolvimento específicos.

Uma variedade de instrumentos financeiros pode ser utilizada como capital de risco, empréstimos verdes, fundos de investimento e mecanismos de pagamento por resultados. A escolha do instrumento ideal dependerá das características específicas de cada projeto.

O mercado de certificados de carbono pode ser um importante instrumento para financiar projetos de redução de emissões de gases de efeito estufa. As empresas que emitem gases poluentes podem adquirir certificados de projetos que removem carbono da atmosfera, como reflorestamento e geração de energia renovável. O RENOVABIO [42] é um instrumento já existente e que pode ser ampliado.

A dimensão humana da transição energética

Um elemento chave nas transformações necessárias para a transição energética é aprimorar a compreensão de como os brasileiros entendem o papel da energia, sua percepção dos recursos naturais disponíveis e seu papel nas estratégias de mitigação e adaptação. Essa compreensão profunda da relação entre sociedade e energia é fundamental para o sucesso da transição, pois permitirá a construção de soluções e políticas públicas mais eficazes, que considerem as necessidades e realidades da população brasileira.

Nesse contexto, os recursos humanos assumem um papel crucial. A transição energética exige uma força de trabalho altamente qualificada e engajada, capaz de desenvolver e implementar as tecnologias e práticas necessárias para a descarbonização da economia. Isso inclui profissionais em diversas áreas, como:

- Ciência e tecnologia: Pesquisadores, engenheiros e técnicos

especializados em energias renováveis, eficiência energética, sistemas de armazenamento de energia e outras áreas relacionadas à transição energética.

- Ciências sociais e humanas: Sociólogos, antropólogos, psicólogos e outros profissionais que podem auxiliar na compreensão dos comportamentos sociais, das percepções e dos valores relacionados à energia e na elaboração de estratégias de comunicação e engajamento da população.
- Economia e gestão: Economistas, gestores e outros profissionais que podem contribuir para a análise dos custos e benefícios da transição energética para o desenvolvimento de modelos de negócios inovadores e para a gestão eficiente dos recursos energéticos.
- Educação: Professores e educadores que podem incorporar a temática da transição energética nos currículos escolares e na formação de adultos, promovendo a educação ambiental e a conscientização sobre a importância da sustentabilidade energética. Além da formação de novos profissionais, é

fundamental investir na requalificação e na atualização daqueles que já atuam no setor energético, especialmente na área de petróleo e gás. Isso permitirá que os profissionais se adaptem às novas demandas da transição energética e contribuam para a construção de um futuro mais sustentável. Ações de pesquisa sobre cultura, comportamentos e informação são cruciais não só para comunicar descobertas e avanços tecnológicos, mas também para melhorar as escolhas e comportamentos sociais, econômicos e políticos dos cidadãos. Essas ações devem ser direcionadas tanto para a população em geral quanto para consumidores corporativos visando promover novas formas de consumo energético que visem à redução do consumo e das emissões. A comunicação clara, acessível e engajadora é fundamental para a população brasileira compreender os benefícios da transição energética e se engaje ativamente no processo. Isso exige a criação de campanhas de conscientização, a utilização de diferentes canais de comunicação e a participação da

sociedade civil na construção das políticas públicas relacionadas à energia.

Transição energética: investimentos de pesquisa, desenvolvimento e inovação

Desde a década de 1990, uma parcela da atividade econômica nas áreas de petróleo e gás natural, biocombustíveis e energia elétrica gera recursos substanciais para PD&I (Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-FNDCT) na área de energia administrados por fundos nacionais de natureza pública (CT-Petro e CT-Energ, e as agências Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e Financiadora de Estudos e Projetos - Finep) e fundos supervisionados pelas agências reguladoras Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (fundos chamados de publicamente orientados). Os recursos publicamente orientados, na verdade, financiam projetos propostos pelas empresas que atuam no setor, atendendo a critérios e orientações das agências reguladoras.

Considerando o período de 2017-22, a média anual do total de investimentos em PD&I foi de R\$ 4,5 bilhões (Tabela 1). É claro que existem diferenças importantes com relação à natureza dos investimentos de cada uma das agências, fundações como a Fapesp,

Tabela 1. Investimentos em PD&I Energia 2013-2022 (milhões de R\$).

	Total (*)
2013	R\$ 4.871,40
2014	R\$ 5.020,90
2015	R\$ 4.327,10
2016	R\$ 3.774,60
2017	R\$ 4.335,40
2018	R\$ 5.220,50
2019	R\$ 4.588,70
2020	R\$ 4.823,30
2021	R\$ 4.414,80
2022	R\$ 3.767,30
Total	R\$ 45.144,00
média anual	R\$ 4.514,40

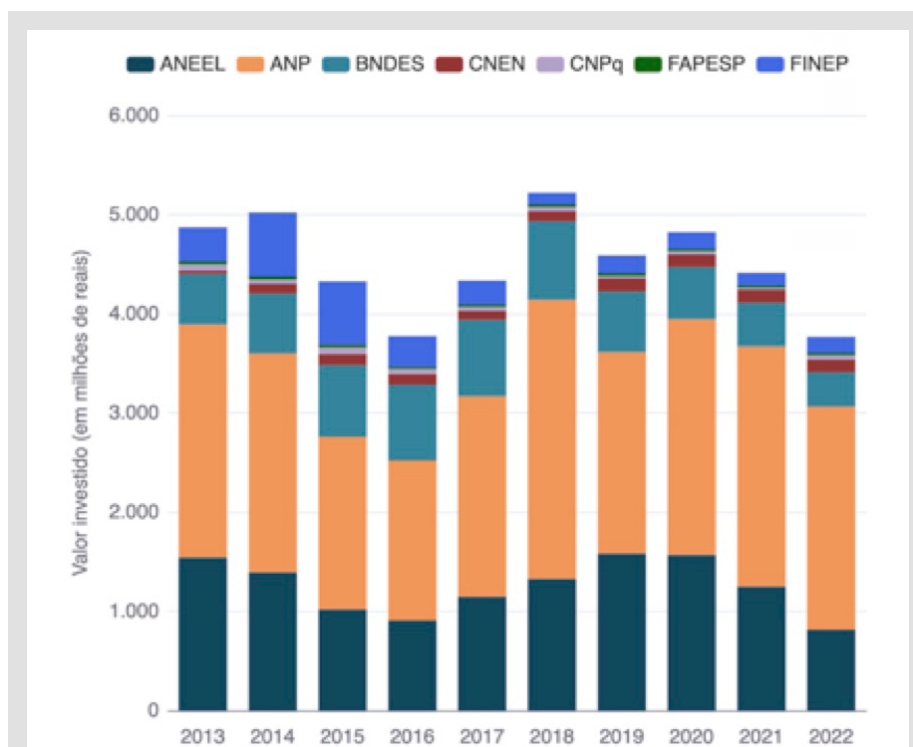
Nota: (*) ANP, ANEEL, FINEP, BNDES, CNPq, CENEN e Fapesp Fonte: EPE, 2024 [43].

bancos de desenvolvimento, fundos setoriais e os recursos supervisionados pelas agências reguladoras. Esses últimos tendem a ter uma destinação

para pesquisa aplicada e mais altos TRLs (*Technology Readiness Levels*). São recursos significativos para financiar investimentos para formação de recursos humanos, laboratórios e projetos de pesquisa que podem acelerar inovações e projetos de demonstração relevantes para alavancar também a curva de aprendizado tecnológico e de transformação de mercado para a transição energética.

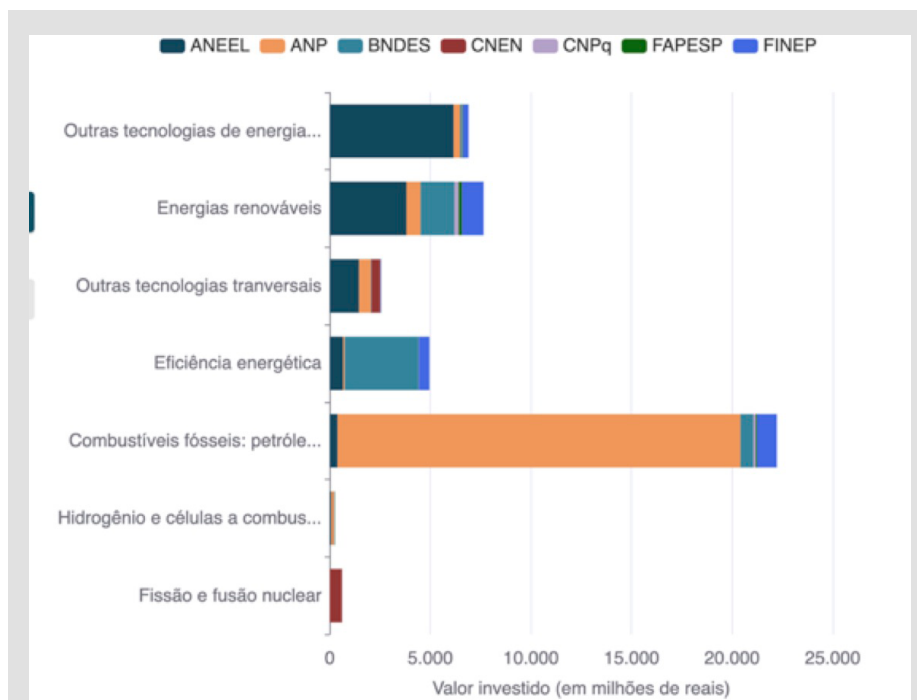
São recursos significativos e, muito provavelmente, suficientes para desenvolver uma inteligência de planejamento e assim instrumentalizar a transição energética no Brasil nos próximos anos.

A maior parte dos recursos é destinada à área de petróleo e gás natural (Figuras 3 e 4) através da ANP, refletindo diretamente a maior arrecadação de receitas desse setor (petróleo e gás natural), bem como a



(Fonte: EPE, 2024 [43].)

Figura 3. Investimentos totais durante 2013-2022 por agência de fomento.



(Fonte: EPE, 2024 [43].)

Figura 4. Total de investimentos em PD&I por agência de fomento e grandes temas (2017-2022).

sua importância econômica. O montante que se pode atribuir a projetos de PD em TE (energias renováveis, eficiência energética, hidrogênio, tecnologias transversais) é muito menor, com destaque para o desenvolvimento de fontes renováveis e eficiência energética. Mais recentemente tem havido maior atenção ao desenvolvimento da cadeia do hidrogênio, em particular do hidrogênio verde. Essa prioridade foi objeto de deliberações do Conselho Nacional de Energia e resultou na criação do Programa Nacional de Hidrogênio (PNH2), com recursos de R\$ 200 milhões até 2025 [44].

Será um desafio buscar aumentar o fomento de investimentos em PD&I para temas mais diretamente relacionados com uma agenda de Transição Energética, considerando especialmente o montante atualmente destinado

ao setor de combustíveis fósseis. Minha sugestão inicial é dar mais atenção à formação e capacitação de uma nova geração de profissionais do setor de petróleo e gás que possam analisar as possibilidades de realizar a descarbonização da economia brasileira e preparar a transição da infraestrutura instalada para biometano, biogás, hidrogênio (incluindo a produção de hidrogênio a partir do gás natural), por exemplo.

Conforme mencionado, a novidade da atual transição energética é não só a velocidade de se promover a descarbonização, mas principalmente como fazê-la. Existem diferentes maneiras de se promover essa descarbonização que chamamos de rotas ou trajetórias (*pathways, roadmaps*). Transição energética agrega novas dimensões especialmente relevantes para atender e estender os benefícios

de serviços de energia para os mais diversos setores da economia, da população e regiões. Isso inclui o acesso universal a fontes de energia limpa, eletrificação com fontes de energia de baixas emissões de gases de efeito estufa, a promoção da mobilidade ativa e transporte público para melhorar a qualidade do ar, a saúde e o emprego, garantir a segurança energética e promover a equidade. Já existem algumas propostas de trajetórias de descarbonização, tanto em âmbito nacional como estadual e municipal que podem se beneficiar de suporte de PD&I para seu aprimoramento e desenvolvimento de ferramentas para monitoramento e experimentação [45,46,47,48,49]. Entender

melhor essas diferentes rotas, seus custos, desafios de implementação, benefícios e impactos pode orientar uma agenda de PD&I em transição energética com maior adesão e, conseqüentemente, com maiores possibilidades de sucesso.

Alterações de padrões hidrológicos, regime de chuvas, ventos e insolação afetam a segurança energética de sistemas renováveis, como já experimentamos no país. Ondas

“Transição energética agrega novas dimensões especialmente relevantes para atender e estender os benefícios de serviços de energia para os mais diversos setores da economia, da população e regiões.”

de calor, frio e chuvas (extremos climáticos) afetam a demanda de energia e a resiliência da própria infraestrutura física do sistema de produção e abastecimento de energia no curto prazo. Esses fatores impactam de maneiras diferentes setores econômicos, regiões e classes sociais que precisam ser mais bem estudados. Desse modo, transição energética requer também esforços de PD&I para adaptação de modo a promover maior resiliência e controle dos impactos das mudanças climáticas no atual e no novo sistema energético de baixo carbono.

Conclusão

Apesar da expressiva participação de fontes renováveis na geração de eletricidade, o Brasil enfrenta obstáculos para descarbonizar sua economia e atender aos requisitos de viabilidade econômica, equidade social e sustentabilidade ambiental. A transição energética, caracterizada pela substituição gradual de fontes energéticas fósseis por renováveis, configura-se como um processo intrincado e multifacetado que transcende a mera adoção de novas tecnologias. Para alcançar um futuro energético sustentável e competitivo, o Brasil necessita de uma reestruturação profunda em diversos aspectos, desde a infraestrutura de produção e distribuição de energia até a integração de diferentes setores de consumo e a implementação de reformas regulatórias que fomentem novos mercados energéticos.

Nesse contexto, a formação de capital humano especializado assume um papel fundamental. Investimentos em educação e capacitação profissional são cruciais para impulsionar inovações tecnológicas, desenvolver infraestruturas resilientes, criar modelos de negócios inovadores e aprimorar instrumentos de política pública. Tais medidas visam garantir a flexibilidade necessária ao setor energético e seus serviços de energia, permitindo sua adaptação às demandas e desafios da nova matriz energética.

Ao longo das últimas décadas, o Brasil tem demonstrado compromisso com a pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) no setor energético. Setores como petróleo, gás natural, biocombustíveis e energia elétrica geraram recursos significativos para essa área, com investimentos anuais em PD&I estipulados em R\$ 4,5 bilhões entre 2017 e 2022. Essa robusta base financeira coloca o país em uma posição favorável para desenvolver inteligência de planejamento e acelerar a transição energética nos próximos anos.

No entanto, o desafio reside em redirecionar esses investimentos para temas mais alinhados à transição energética, considerando especialmente o montante atualmente destinado ao setor de combustíveis fósseis. Nesse sentido, a formação e capacitação de profissionais do setor de petróleo e gás para analisar as possibilidades de descarbonização da economia brasileira surge como uma das medidas estratégicas.

Além do redirecionamento de investimentos e capacitação profissional, a transição energética exige um esforço direcionado em PD&I para adaptação. Essa iniciativa visa promover maior resiliência e controle dos impactos das mudanças climáticas no atual e no novo sistema energético de baixo carbono. Mudanças nos padrões hidrológicos, regime de chuvas, ventos, produção de biomassa e insolação podem afetar a segurança energética de sistemas renováveis, como já experimentado no país.

Em suma, a transição energética se configura como um processo essencial e inevitável para o Brasil alcançar um futuro mais sustentável e competitivo. Apesar dos desafios inerentes a essa mudança paradigmática, o país possui diversas oportunidades para descarbonizar sua economia e investir em fontes renováveis de energia. O sucesso dessa jornada dependerá da colaboração entre os diferentes setores da sociedade, incluindo o governo, o setor privado, a academia e a população em geral. Somente através de um esforço conjunto e engajado será possível construir um futuro energético resiliente, sustentável e próspero para o Brasil.

* **Gilberto de Martino Jannuzzi** é professor de Sistemas Energéticos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e pesquisador sênior do Núcleo de Planejamento Energético NIPE (Unicamp). É membro da coordenação do Programa de Mudanças Climáticas Globais da FAPESP.

Referências

- [1] LEE, H.; ROMERO, J. *Summary for policymakers*. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [2] BRAZIL. *Brazil's NDC: National determination to contribute and transform*. United Nations Framework Convention on Climate Change, 2024.
- [3] SÃO PAULO. Decreto no 65.881, de 20 de julho de 2021. Dispõe sobre a adesão do Estado de São Paulo às campanhas "Race to Zero" e "Race to Resilience", no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, e dá providências correlatas. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 2021.
- [4] UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. *The Paris Agreement*. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- [5] UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. *Race to Resilience*. Disponível em: <https://climatechampions.unfccc.int/race-to-resilience-launches/>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- [6] UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE. *Race to Zero*. Disponível em: <https://climatechampions.unfccc.int/system/race-to-zero/>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- [7] SMIL, V. *Energy transitions: Global and national perspectives*. London: Bloomsbury Academic, 2017.
- [8] FOUQUET, R. Historical energy transitions: Speed, prices and system transformation. *Energy Research & Social Science*, v. 22, p. 7-12, 2016.
- [9] GROSSMAN, P. Z. Energy shocks, crises and the policy process: A review of theory and application. *Energy Policy*, v. 77, p. 56-69, 2015.
- [10] GRUBLER, A. Energy transitions research: Insights and cautionary tales. *Energy Policy*, v. 50, p. 8-16, 2012.
- [11] KOWALSKA-PYZALSKA, A. Introduction to innovative energy services (IES) in transitioning energy markets. In: KOWALSKA-PYZALSKA, A. *Diffusion of innovative energy services*. Cambridge: Academic Press, 2024. p. 1-19.
- [12] SOLOMON, B. D.; KRISHNA, K. The coming sustainable energy transition: History, strategies, and outlook. *Energy Policy*, v. 39, n. 11, p. 7422-7431, 2011.
- [13] SOVACOOOL, B. K.; BRISBOIS, M. C. Elite power in low-carbon transitions: A critical and interdisciplinary review. *Energy Research & Social Science*, v. 57, p. 101242, 2019.
- [14] WANG, X.; LO, K. Just transition: A conceptual review. *Energy Research & Social Science*, v. 82, p. 102291, 2021.
- [15] YANG, Y.; XIA, S.; HUANG, P.; QIAN, J. Energy transition: Connotations, mechanisms and effects. *Energy Strategy Reviews*, v. 52, p. 101320, 2024.
- [16] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Tracking Clean Energy Progress 2023*. IEA, jul. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>. Acesso em: 19 jun. 2024.
- [17] JOAS, F.; PAHLE, M.; FLACHSLAND, C.; JOAS, A. Which goals are driving the Energiewende? Making sense of the German Energy Transformation. *Energy Policy*, v. 95, p. 42-51, 2016.
- [18] RENN, O.; MARSHALL, J. P. Coal, nuclear and renewable energy policies in Germany: From the 1950s to the "Energiewende". *Energy Policy*, v. 99, p. 224-232, 2016.
- [19] JANNUZZI, G. M.; SANGA, G. A. LPG subsidies in Brazil: an estimate. *Energy for Sustainable Development*, v. 8, n. 3, p. 127-129, 2004.
- [20] LUCON, O.; COELHO, S.; GOLDEMBERG, J. LPG in Brazil: lessons and challenge. *Energy for Sustainable Development*, vol. 8, n. 3, p. 82-90, 2004.
- [21] CORTEZ, L. A. B. *Bioetanol de cana-de-açúcar*. P&D para produtividade e sustentabilidade. 1. ed. São Paulo: FAPESP, 2010.
- [22] LEITE, R. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil*. 2009.
- [23] MOREIRA, J. R.; PACCA, S. A.; PARENTE, V. The future of oil and bioethanol in Brazil. *Energy Policy*, v. 65, p. 7-15, 2014.
- [24] GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; NASTARI, P. M.; LUCON, O. Ethanol learning curve: The Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, n. 3, p. 301-304, 2004.
- [25] PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V. *Mitigation of Climate Change - Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [26] CLANCY, J. S.; OPARAOCHA, S.; ROEHR, U. *Gender equity and renewable energies: Thematic background paper*. Paper presented at Renewables, Internationale Konferenz für Erneuerbare Energien, 2004.
- [27] HALFF, A.; SOVACOOOL, B. K.; ROZHON, J. *Energy Poverty: Global challenges and local solutions*. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- [28] URPELAINEN, J.; AKLIN, M.; BAYER, P. *Escaping the energy poverty trap: When and how governments power the lives of the poor*. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [29] PAIVA, J. C.; JANNUZZI, G. M.; MELO, C. Mapping electricity affordability in Brazil. *Utilities Policy*, v. 59, p. 100926, 2019.
- [30] GOLDEMBERG, J.; JOHANSSON, T. B.; REDDY, A. K. N. *Energy for a sustainable world*. 1. ed. New York: Wiley, 1988.
- [31] BANERJEE, M.; PRASAD, R.; REHMAN, I. H.; GILL, B. Induction stoves as an option for clean

cooking in rural India. *Energy Policy*, v. 88, p. 159-167, 2016.

[32] SERMARINI, A. C. de P.; AZEVEDO, J. H. P.; ALBUQUERQUE, V. C.; CALILI, R. F.; GONÇALVES, F.; JANNUZZI, G. Distributed energy resources in low-income communities: A public policy proposal for Brazil. *Energy Policy*, v. 187, p. 114030, 2024.

[33] STRITZKE, S.; BRICKNELL, M.; LEACH, M.; THAPA, S.; KHALIFA, Y.; BROWN, E. Impact financing for clean cooking energy transitions: Reviews and prospects. *Energies*, v. 16, n. 16, p. 5992, 2023.

[34] SUBRAMANIAN, S.; BASTIAN, H.; HOOFMEISTER, A.; TOLENTINO, C.; NADEL, S. 2022 International Energy Efficiency Scorecard ACEEE. Washington: American Council for an Energy-Efficient Economy, 2022.

[35] LETSCHERT, V. E.; KARALI, N.; PARK, Y.; SHAH, N. The manufacturer economics and national benefits of cooling efficiency for air conditioners in Brazil. *ECEEE Summer Study Proceedings*, Presqu'île de Giens, France, 2020.

[36] MELO, C.; JANNUZZI, G. M.; SANTANA, P. H. Why should Brazil to implement mandatory fuel economy standards for the light vehicle fleet? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, p. 1166-1174, 2018.

[37] FAPESP. Plano Científico Mudanças Climáticas 2020-2030. *Fapesp*, São Paulo, 30

abr. 2021. Disponível em: <https://fapesp.br/14884/plano-cientifico-mudancas-climaticas-2020-2030>. Acesso em: 8 nov. 2023.

[38] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Plano Nacional sobre Mudança do Clima*: Brasil. Brasília: MMA, 2008.

[39] GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Plano de Ação Climática PAC2050*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2022.

[40] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Roadmap Eólica Offshore Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

[41] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Plano Nacional de Adaptação Volume II à Mudança do Clima*. Brasília: MMA, 2016.

[42] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *RenovaBio*. ANP, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio/renovabio>. Acesso em: 7 mar. 2024.

[43] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Painel de indicadores de investimentos em inovação em energia no Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

[44] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Brasil terá mais de R\$ 200 milhões de investimento para pesquisa sobre hidrogênio de baixa emissão de carbono. *Ministério de Minas e Energia*, Brasília, 24 ago. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-tera-mais-de-r-200-milhoes-de-investimento-para-pesquisa-sobre-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono>. Acesso em: 7 mar. 2024.

www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-tera-mais-de-r-200-milhoes-de-investimento-para-pesquisa-sobre-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono. Acesso em: 7 mar. 2024.

[45] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Neutralidade de carbono até 2050: cenários para uma transição eficiente no Brasil*. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

[46] PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO. *Plano de Ação Climática. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente*, São Paulo, 1º jul. 2024. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/comite_do_clima/index.php?p=284394. Acesso em: 27 jun. 2024.

[47] PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. *Plano Local de Ação Climática do Recife*. Disponível em: <https://americadosul.iclei.org/documentos/plano-local-de-acao-climatica-do-recife-pe>. Acesso em: 21 jun. 2024.

[48] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *O compromisso do Brasil no combate às mudanças climáticas: Produção e uso de energia*. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

[49] PREFEITURA MUNICIPAL DE SALVADOR. *Plano de Ação Climática de Salvador. Prefeitura Municipal de Salvador*, nov. 2020. Disponível em: <https://sustentabilidade.salvador.ba.gov.br/programas/plano-de-acao-climatica-de-salvador>. Acesso em: 27 jun. 2024.