

## O CARBON LOCK-IN E AS ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL NO SÉCULO XXI

Lucas Corrêa<sup>1</sup>  
Sílvia Cário<sup>2</sup>

**RESUMO:** Esse artigo discute o *carbon lock-in*, fenômeno resultado de um processo de mudança tecnológica *path dependent* em tecnologias intensivas em carbono e nocivas ao meio ambiente, reforçado pela inércia das instituições e políticas e pela resistência de interesses estabelecidos. Em particular, discutem-se as especificidades do *lock-in* tecnológico e político-institucional no Brasil, identificando entraves à transição energética, relacionados com o *lock-in*, tanto em relação aos combustíveis fósseis quanto às hidrelétricas. Nesse contexto, fontes alternativas de energia, como a eólica e, em maior medida, a solar fotovoltaica, apesar dos elevados potenciais, se encontram, em grande parte, inexploradas. Ainda assim, a taxa de crescimento da capacidade instalada ao longo do início do século XXI e o crescimento da participação dessas fontes no total de energia elétrica gerada demonstram seus importantes avanços no país, especialmente no caso da eólica, em grande medida frutos de uma série de políticas governamentais.

**Palavras-chaves:** *Carbon lock-in*; Energia eólica; Energia solar fotovoltaica.

## CARBON LOCK-IN AND WIND AND SOLAR PHOTOVOLTAIC ENERGY IN BRAZIL IN THE 21ST CENTURY

**ABSTRACT:** This article discusses the carbon lock-in, a phenomenon resulting from a path dependent technological change process on carbon-intensive technologies that are harmful to the environment, reinforced by the inertia of institutions and policies and by the resistance of the incumbents. In particular, it discusses the specificities of technological and political-institutional lock-in in Brazil, identifying obstacles to the energy transition, related to the lock-in, both in relation to fossil fuels and to hydroelectricity. In this context, alternative energy sources, such as wind and, to a greater extent, photovoltaics, despite its high potentials, are largely unexplored. Even so, the installed capacity growth rate throughout the beginning of the 21st century and the growth in the participation of these sources in the total electric energy generated demonstrate their important evolutions in the country, especially in the case of wind, largely as result of a series of government policies.

**Keywords:** Carbon lock-in; Wind energy; Photovoltaic energy.

Data da submissão: 08-06-2022

Data do aceite: 25-08-2022

### INTRODUÇÃO

O modelo vigente para geração de energia, herança de trajetórias tecnológicas e padrões estabelecidos ao longo do século passado, favorece os combustíveis fósseis. Em 2018, em relação ao consumo de energia primária, o petróleo foi responsável por 34,5%, o carvão mineral, por 27,9%, e o gás natural, por 24,5%, totalizando 86,9% de participação dos combustíveis fósseis (RITCHIE; ROSER, 2018). Por sua vez, as energias renováveis – centrais para minimizar as emissões de  $CO_2$  – possuem papel relativamente pequeno na matriz energética global: cerca de 13%, em 2018, considerando as fontes renováveis – biocombustíveis, hidrelétrica, eólica, solar, geotérmica, etc. (IEA, 2020a).

Nesse contexto, a necessária transição energética enfrenta forte resistência das indústrias baseadas em combustíveis, por conta do que é denominado na literatura como “*carbon lock-in*” (UNRUH, 2000; 2002). Por exemplo, muitas das tecnologias renováveis possuem custos relativos não competitivos por sofrerem com um sistema de preço enviesado – que não considera as externalidades ambientais (KEMP; NEVER, 2017) e que concede elevados subsídios aos combustíveis fósseis (IEA, 2020b; COADY *et al.*, 2019).

<sup>1</sup> Doutorando em Economia – IE/Unicamp. Contato: correa.lucas@outlook.com.br

<sup>2</sup> Professor titular UFSC. Contato: fecario@yahoo.com.br

Os recentes avanços tecnológicos e imenso potencial não utilizado fazem as energias renováveis emergirem como uma importante alternativa às fontes de energia fóssil e nuclear. Mundialmente, os novos investimentos em energias renováveis, incluindo os investimentos em nova capacidade e P&D, apresentaram tendência ascendente, alcançando a marca global de US\$ 301,7 bilhões em 2019, concentrados, especialmente, em energia eólica (47,3% do total em 2019) e solar (46,7%) (REN21, 2020). Verifica-se uma clara tendência de aumento da participação das fontes renováveis nas novas instalações anuais de capacidade de geração elétrica, nas últimas duas décadas, superando as não renováveis (fósseis e nuclear) pela primeira vez em 2012 e representando mais de 70% da capacidade adicionada em 2019 (IRENA, 2020b).

A evidência sobre o surto de investimentos em nova capacidade em energias renováveis mostra que, a partir de 2015, o grupo dos países em desenvolvimento supera o grupo dos países desenvolvidos: em 2019, 54% do total de investimentos (US\$ 152,2 bilhões) foram realizados por países em desenvolvimento (REN21, 2020). O Brasil, entre 2010 e o primeiro semestre de 2019, realizou investimentos em capacidade no montante de US\$ 55 bilhões, o que o colocou em 8º lugar mundial no período (BLOOMBERGNEF, 2019). Apenas em capacidade, em 2019, o Brasil investiu US\$ 6,5 bilhões, que se concentraram especialmente em energia eólica (52,3% do total) e solar (38,4%) demonstrando a relevância dessas fontes no país (REN21, 2020).

Frente às graves consequências ambientais e climáticas, à finitude dos recursos fósseis e à demanda por energia rapidamente crescente, as fontes alternativas e renováveis fazem-se essenciais para o futuro da economia e da vida na Terra. Torna-se requerimento importante realizar estudo cujo objetivo seja apresentar a estrutura produtiva das energias renováveis – em particular, eólica e solar fotovoltaica –, assim como, apontar ocorrências que expressam resistências institucionais, tecnológicas e econômicas na transição em favor dessas novas fontes energéticas renováveis.

Nestes termos, o artigo está organizado em cinco seções, além dessa introdução. Na seção 2, discute-se do ponto de vista teórico a questão do *carbon lock-in*. Na seção 3, apresentam-se as especificidades do *lock-in* no setor de energia elétrica brasileiro. Na seção 4, apontam-se as características do desenvolvimento dos setores de energia eólica e solar fotovoltaica no Brasil. Por fim, na seção 5, fazem-se algumas considerações finais.

## 2. PATH DEPENDENCE E LOCK-IN EM TECNOLOGIAS INTENSIVAS EM CARBONO

O avanço tecnológico não é aleatório, mas segue por trajetórias tecnológicas, evoluindo sobre as preexistentes e acumulando as capacidades necessárias para solucionar problemas. A natureza cumulativa do conhecimento tecnológico faz com que o progresso seja mais fácil sobre as trajetórias estabelecidas do que em trajetórias alternativas, dando origem a um processo em que se verificam retornos crescentes, *path dependency* e irreversibilidade do progresso tecnológico (DOSI, 1982; 1988). O padrão tecnológico que emerge de um processo inovativo com essas características não é, necessariamente, o “melhor”; parcialmente, esse resultado também é determinado por eventos históricos, aleatórios, ocorridos nos estágios iniciais da competição entre diferentes alternativas (ARTHUR, 1989).

Um importante exemplo desse efeito pode ser constatado na competição que resultou no estabelecimento do motor de combustão interna, como fonte de propulsão em automóveis. No início do século XX, três padrões distintos competiram como potenciais substitutos aos veículos de transporte (cavalos e carroças), a saber: automóveis movidos à combustão interna de combustível fóssil, a vapor e a baterias elétricas. Dessa competição, o primeiro saiu vencedor por conta do baixo custo da gasolina. Uma vez estabelecido, o automóvel movido à combustão interna e o sistema de produção em massa associado deram origem a um período de retornos crescentes de escala, diminuição de preços, melhorias no desempenho e, efetivamente, *locking-in* o motor à combustão interna como fonte de propulsão padrão (UNRUH, 2000).

Esse processo de avanço tecnológico *path dependent* pode fazer com que o padrão vencedor fique *locked-in*, de maneira que a introdução de uma nova tecnologia com maior potencial de longo prazo seja dificultada – o que é chamado “*lock-in* tecnológico” (ARTHUR, 1990). Isso acontece porque, sempre que ocorre uma mudança entre paradigmas tecnológicos, as atividades de solução de problemas precisam ser reiniciadas, o que envolve altos custos de mudança para novas tecnologias, desencorajando os agentes econômicos a abandonarem as trajetórias tecnológicas estabelecidas (DOSI, 1982).

Retomando o exemplo dos padrões de propulsão dos automóveis, observa-se que no curso da competição do padrão tecnológico, mais de um século atrás, os automóveis elétricos eram tão comuns quanto

os movidos a combustíveis fósseis. Contudo, os processos de seleção permitiram que os esforços tecnológicos fossem concentrados nos motores à combustão, tornando-os, progressivamente, melhores e mais atrativos para os usuários (EDLER; FAGERBERG, 2017). Hoje, por conta da crescente preocupação com a mudança climática e com a participação dos motores à combustão na emissão de gases do efeito-estufa, têm-se que o padrão escolhido não foi, obviamente, o melhor do ponto de vista social. Ainda assim, após um longo tempo de progresso tecnológico, o padrão de automóvel com motor de combustão interna – baseada em combustíveis fósseis – possui um quase monopólio do mercado e uma infraestrutura associada incomparável.

Mudanças nos paradigmas tecnológicos, dando origem a novas soluções e trajetórias, serão necessárias para o endereçamento dos impactos resultantes da mudança climática, bem como para a redução dos riscos climáticos no futuro, diante dos malefícios causados pela emissão de gases do efeito-estufa causados pela queima de combustíveis fósseis. Ademais, pode-se argumentar que os fenômenos de retornos crescentes conduzindo a um estado de *lock-in* não se aplicam somente às tecnologias individuais. Como os motores à combustão interna, mas também a grandes sistemas tecnológicos, com diversas trajetórias que sinergizam entre si, e.g. sistema de geração de eletricidade e de transporte (FOXON, 2002). Assim, quando uma trajetória tecnológica é bastante poderosa e profundamente estabelecida, como os sistemas energéticos baseados em combustíveis fósseis (UNRUH, 2000), a transição para trajetórias alternativas é especialmente difícil.

Entende-se, ainda, que as instituições, assim como as tecnologias, também podem estar sujeitas a retornos crescentes (NORTH, 1990) e, por conseguinte, sua evolução pode resultar em equilíbrios inerciais em determinadas trajetórias, com custos e barreiras à mudança para trajetórias alternativas crescentes – o que é chamado “*lock-in* institucional” (SETO *et al.*, 2016). Unruh (2000) cunha o termo “complexo tecnoinstitucional” (*techno-institutional complex*) para argumentar que os grandes sistemas tecnológicos – e.g. geração, distribuição e uso de energia elétrica – são enraizados no contexto social das instituições, públicas e privadas. Nesse contexto, atores políticos, sociais e econômicos atuam de forma deliberada e coordenada reforçando as trajetórias tecnológicas estabelecidas, através de regras, normas e restrições, e bloqueando a difusão de novas tecnologias.

Um importante exemplo de como poderosas instituições, continuamente, apoiam e sustentam as fontes de energia fóssil é a existência de concessão de elevados subsídios ao consumo. O valor dos subsídios alcançou a cifra de US\$ 427 bilhões globais em 2018, dos quais US\$ 182 bilhões só para o petróleo (IEA, 2020b). Se forem considerados os custos ambientais, a cifra estimada atingiu impressionantes US\$ 5,2 trilhões, equivalente a 6,5% do PIB mundial, em 2017 (COADY *et al.*, 2019).

Unruh (2000) argumenta que o avanço tecnológico *path dependent* e sujeito a retornos crescentes, combinado com a inércia das instituições e políticas e do poder dos interesses estabelecidos, conduziu e aprisionou as economias industriais em um sistema energético – tecnologias e infraestrutura – fortemente baseado em combustíveis fósseis, intensivo em carbono e que levanta obstáculos à transição para sistemas alternativos. Em 2015, cerca de 80% da energia global, usada nos domicílios, nas indústrias, nos serviços e transportes era obtida a partir da queima de combustíveis fósseis (WORLD BANK, 2019). Esse estado é denominado como “*carbon lock-in*” (UNRUH, 2000).

O sistema energético atual é a maior infraestrutura já construída pela humanidade, representando dezenas de trilhões de dólares em ativos e dois séculos de desenvolvimento tecnológico, reforçado por fatores institucionais, políticos e comportamentais (SETO *et al.*, 2016). Esses séculos de desenvolvimento deram às tecnologias baseadas em carbono vantagens de custo, desempenho e maior aceitação entre os usuários. O estado de *carbon lock-in* é, portanto, resultado de um processo de coevolução tecnológica e institucional, em que os fatores institucionais e tecnológicos se reforçam mutuamente (UNRUH, 2002; FOXON, 2002). A combinação e interação de sistemas tecnológicos e instituições estabelecidas, sujeitos a *lock-in* e inércia, representam barreiras à inovação verde, dentre as quais as energias renováveis.

Na produção de eletricidade, em especial, o modelo organizacional predominante atualmente remonta ao início do século passado, quando o baixo custo do aço para a produção de grandes equipamentos propiciou o estabelecimento de redes altamente centralizadas, reforçado, posteriormente, nessa mesma direção, pela produção em massa e pelo baixo custo do petróleo, que fecharam o espaço para outras fontes de energia. Essas *path-dependencies* dificultaram, até mesmo, a concepção de modelos semi-descentralizados de geração de energia, impedindo o completo entendimento e a implementação efetiva de tecnologias energéticas novas e renováveis (PEREZ, 1985).

O termo *lock-in* implica no favorecimento do *status quo*, porém é, normativamente, neutro, podendo reforçar e aprisionar um sistema num resultado positivo ou negativo; o *carbon lock-in*, por outro lado, é, necessariamente, negativo, pois representa um obstáculo para uma desejada transição na direção de uma economia de baixo carbono (SETO *et al.*, 2016). Essa condição faz com que tecnologias baseadas em combustíveis fósseis se perpetuem, apesar das externalidades ambientais e da existência de alternativas tecnológicas verdes, até mesmo alternativas custo-efetivas. Entretanto, apesar de o *carbon lock-in* restringir a expansão de mercado de tecnologias alternativas, entende-se que ele apenas atrasa uma transição inevitável (UNRUH; CARRILO-HERMOSILLA, 2006).

Argumenta-se que o *carbon lock-in*, entretanto, pode não ser um problema tão grave em economias em desenvolvimento, quando comparadas com as economias industriais avançadas. Kemp e Never (2017) argumentam que os efeitos de *lock-in* tendem a ser menos intensos em casos em que não haja significativo desenvolvimento tecnológico; onde não ocorreu completa instalação das indústrias intensivas em carbono. Por sua vez, Seto *et al.* (2016) argumentam que podem existir oportunidades de colocar os países em desenvolvimento em trajetórias menos intensivas em carbono, já que esses países não precisam superar as vantagens enraizadas de uma tecnologia estabelecida e dominante. Reforçando essa linha, Mathews e Reinert (2014) citam o Brasil como país onde se espera que o *carbon lock-in* seja menos restritivo.

Em tempo, cabe destacar alguns argumentos críticos em relação a adoção de tecnologias renováveis sob o regime capitalista de produção. A economia capitalista se desenvolve sob os ditames da geração de lucro e, portanto, orientada pelo imperativo do crescimento econômico. Tal corrida para crescer significa um maior consumo de energia – que, de modo geral, é satisfeito através de combustíveis fósseis (LI, 2008) – e materiais, além do despejo de resíduos no meio ambiente. Nesse quadro, questões sobre a sustentabilidade não assumem ordem maior, dado que não podem ser incorporadas no horizonte de curto prazo de valorização do capital, que precisa recuperar os investimentos, garantir fluxos de lucro e se constituir em melhor do que oportunidades alternativas de inversão (FOSTER, 2002). Em outras palavras, Foster (2002) critica a visão de “bala mágica” da tecnologia para combater a mudança climática, dado que as tecnologias que permitiriam diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> existem há tempos – tanto as turbinas eólicas quanto as células fotovoltaicas existem desde a segunda metade do século passado –, porém não são implementadas sob o capitalismo, dado que o sistema promove as fontes de energia que geram maiores lucros e não as mais benéficas para o meio ambiente.

Ademais, a abordagem crítica de Foster (2002) reconhece que a sociedade humana co-evolui com a natureza, e não independente dela. Porém, isso não significa dizer que o progresso humano deva ser abandonado ou que não possa haver um desenvolvimento contínuo da riqueza. Entretanto, esse desenvolvimento, deve sim ocorrer no sentido da satisfação mais completa das necessidades humanas; para tanto, novos requerimentos devem ser estabelecidos. Para tal, Karl Marx, no passado, defendeu a constituição de um sistema produtivo sob controle social. Assim, através de um controle coletivo do processo de produção utilizando menor gasto de energia, pode-se alcançar condições mais dignas e apropriadas para a natureza humana (FOSTER, 2002). Ou seja, a proposta de Foster (2002) é a mudança de regime de produção, sob o qual a sociedade seria governada não pela busca por lucros, mas pelas necessidades das pessoas e os requerimentos para uma sustentabilidade ecológica. Para Li (2008), adicionalmente, a solução mais simples e direta para as questões climáticas seria limitar o crescimento econômico, o que também só seria possível num sistema em que o “mais-valor” seja colocado sob controle social.

Por outro lado, há alguns contrapontos na literatura evolucionária. Perez (2013) argumenta que, ainda que muitos produtos e serviços “verdes” não sejam capazes de serem imediatamente lucrativos, a sua viabilidade econômica pode ser induzida através de iniciativas governamentais. De fato, no caso das energias renováveis, notadamente a eólica e a solar fotovoltaica, pode-se verificar uma clara tendência de queda nos custos de geração, o que pode conduzir a uma maior penetração nos mercados e, assim, maior lucratividade para tais indústrias. Ademais, pode-se argumentar que as tecnologias verdes, ao possibilitar a transformação dos padrões de consumo e produção, e a reformulação da infraestrutura, permite, em princípio, alinhar os objetivos de sustentabilidade e crescimento (MAZZUCATO, 2014). Assim, não é o crescimento econômico, em geral, que é não-sustentável, mas sim o crescimento em determinadas trajetórias tecnológicas, em particular. Essa proposta alternativa, portanto, é de que os problemas ambientais sejam enfrentados com ciência, tecnologia e inovação, não de forma a frear o crescimento, mas no sentido de reorientá-lo e alimentá-

lo com fontes limpas de energia (o que justifica nosso interesse em analisar tais indústrias, especialmente no caso de um país em desenvolvimento, que precisa crescer, como o Brasil). Central para isso é, também, o papel do Estado: as políticas industriais e de inovação são essenciais na definição da direcionalidade das transições tecnológicas e, assim, permitem criar novos mercados (MAZZUCATO, 2014). De fato, o Estado tem sido essencial tanto no empurrão inicial para o desenvolvimento de turbinas eólicas e células fotovoltaicas, quanto na difusão destas tecnologias.

### 3. AS ESPECIFICIDADES DO *LOCK-IN* NO BRASIL

Ferraço (2016), que analisa os entraves à transição energética a partir de entrevistas com profissionais do setor, identifica, no caso brasileiro, diversos fatores que reforçam um estado de *carbon lock-in*, tanto tecnológico quanto institucional. Do ponto de vista tecnológico, verifica-se uma trajetória histórica que coloca relevância na estatal Petrobras S. A., fundada em 1953, e, atualmente, a maior empresa do país, que opera na exploração, produção, refino, comercialização e transporte de petróleo, gás natural e seus derivados. Além de toda a *expertise* tecnológica, acumulada ao longo de sua trajetória, o aumento da exploração do petróleo com o descobrimento de novas jazidas no litoral brasileiro – situadas na camada do pré-sal em águas profundas, área em que a Petrobras é líder tecnológica – reflete o *lock-in* do país na exploração e consumo de combustíveis fósseis.

Historicamente, o Plano de Metas (1956) foi um marco para a indústria petróleo-automobilística no Brasil, através do qual o Estado brasileiro colocou elevada ênfase (71,3% do total de recursos) nos setores de energia – principalmente, petróleo e carvão – e transporte – especialmente, rodoviário, com a instalação da indústria automobilística estrangeira – como motores da industrialização e de desenvolvimento (ORENSTEIN; SOCHACZEWSKI, 2014). Atualmente, o setor automobilístico representa cerca de 3% do PIB nacional e 18% do PIB da indústria de transformação. Esse segmento emprega, direta e indiretamente, 1,3 milhão de pessoas, colocando o país como 8º maior produtor e 6º maior mercado interno (ANFAVEA, 2020).

Do ponto de vista político-institucional, Ferraço (2016) argumenta que as instituições e as estruturas de poder estabelecidas formam um sistema rígido e inapto às mudanças, não dando espaço para as inovações e perpetuando escolhas que garantem resultados positivos para o poder hegemônico no setor energético. Uma força de resistência política são as multinacionais do setor automobilístico, especialmente as que não dispõem de tecnologias de veículos elétricos: as empresas estabelecidas e relacionadas ao complexo petróleo-automobilístico perderiam com ações para mudanças na matriz energética, já que muitos investimentos em bens de capitais seriam perdidos. Adicionalmente, segundo Melo *et al.* (2016), o Ministério de Minas e Energia (MME), órgão responsável pela formulação e implementação de políticas e programas estruturais no setor energético, enfrenta forte influência da Petrobras nos processos de tomada de decisão, o que pode retardar as iniciativas de promoção e difusão das fontes renováveis.

Outro exemplo importante remete à estrutura institucional, que direciona um elevado montante de incentivos e subsídios destinados à produção e ao consumo de combustíveis fósseis no Brasil. Tais incentivos e subsídios apresentaram ritmo crescente desde 2017, e alcançaram o expressivo valor de R\$ 99,39 bilhões, em 2019, correspondendo a 1,36% do produto interno bruto (PIB) do país, ou 29 vezes o orçamento total do Ministério do Meio Ambiente (MMA) (INESC, 2020). Esses números demonstram, ainda, que os investimentos em energias renováveis são marginais em comparação com o que ainda é destinado ao petróleo e às termoeletricas a carvão e gás no país: o investimento de US\$ 6,8 bilhões, em 2019, representou menos do que um terço (na cotação Dólar-Real de 2019) do que foi destinado apenas pelo governo, em forma de subsídios, para a produção e consumo de combustíveis fósseis no mesmo ano.

No entanto, a característica central do sistema elétrico brasileiro é a elevada dependência da fonte hidrelétrica. O setor de eletricidade foi estruturado ao redor do planejamento centralizado da exploração dos recursos hidrelétricos do país, para gerar energia para a industrialização e o desenvolvimento econômico (BRADSHAW, 2017). Nessa linha, a estatal Eletrobras já era a maior empresa de geração de eletricidade no país, na década de 1970 e, durante os anos 1970 e 1980, as companhias de eletricidade vinculadas realizaram elevados investimentos em grandes represas e em transmissão e distribuição de hidroeletricidade (FURTADO; PERROT, 2015). Como resultado, a fonte hidrelétrica tem participação elevada, cerca de dois terços do total, enquanto essa fonte na matriz elétrica mundial é de apenas 16% (IEA, 2020a). Nessa linha, o

Brasil se encontra num cenário peculiar: trata-se de um caso de sucesso devido à participação das hidroelétricas, que possui tecnologia madura, conhecida e estabelecida, enquanto as fontes renováveis, como a eólica e a solar, possuem um desenvolvimento relativamente baixo.

Carstens e Cunha (2019) argumentam, ainda, que o sistema elétrico brasileiro apresenta estabilidade e continuidade da predominância das hidrelétricas, que tiveram seu início com a própria história do sistema e conduzem a um estado de *lock-in*. Apesar das crescentes pressões para a diversificação, a infraestrutura hidrelétrica pré-existente, continuou a criar restrições à adoção de formas alternativas de energia. Do ponto de vista tecnológico, com as políticas para explorar o potencial hidrelétrico do território brasileiro, especialmente durante o governo ditatorial militar, desenvolveu-se, no Brasil, uma *expertise* na construção de usinas hidroelétricas (FERRAÇO, 2016). Ademais, o custo da energia hidrelétrica, após a construção inicial da represa, é baixo em comparação com outras fontes de eletricidade, dificultando, assim, a entrada de novas tecnologias no mercado de geração no país (BRADSHAW, 2017).

Do ponto de vista político e institucional, por sua vez, a incipiente estrutura regulatória herdou as dotações institucionais do sistema anterior, segundo as quais a contínua construção do setor hidrelétrico fazia parte da prática comum – outros tipos de instalações de energia renovável, como os parques eólicos, tiveram que se adaptar a esses padrões que, originalmente, tinham como objetivo garantir a expansão da energia hidrelétrica (BRADSHAW, 2017). Melo *et al.* (2016) apontam, também, que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é influenciada por empresas do setor de eletricidade que são contrárias ao desenvolvimento de geração distribuída, e.g. solar fotovoltaica, e podem colocar obstáculos às iniciativas da agência nesse sentido.

Nos anos 1990, com a redemocratização política e as reformas de mercado, a privatização das empresas de energia federais e estaduais se tornou possível (FURTADO; PERROT, 2015). A administração do Presidente Fernando Henrique Cardoso introduziu um modelo de mercado – privatizando grandes parcelas da distribuição de eletricidade e criando agências reguladoras (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). A abordagem orientada pelo mercado adotada tinha neutralidade de tecnologia, sem privilegiar nenhuma fonte em específico, no entanto, na mesma época, surgiam diversos argumentos a favor de um setor elétrico mais limpo e diversificado, tirando proveito dos avanços nas tecnologias renováveis – motivados tanto pela conferência internacional RIO-92 quanto pela elevada dependência das hidrelétricas no Brasil (BRADSHAW, 2017).

Entretanto, foi preciso uma crise energética, ocorrida no início dos anos 2000, para impulsionar a vontade política para realizar mudanças sistêmicas na oferta de energia elétrica no Brasil (MELO *et al.*, 2016; BRADSHAW, 2017). O período de seca, ocorrido entre 2001 e 2002, aliado com o baixo crescimento da capacidade de geração de eletricidade, nos anos 1990, resultou em escassez de oferta elétrica, apagões generalizados, e levou o sistema elétrico a uma crise. Tal evento expôs as vulnerabilidades estruturais do sistema de eletricidade altamente baseado em hidrelétricas. Além disso, o Brasil passou a registrar, com maior frequência, eventos climáticos extremos, com volume de chuvas significativamente abaixo das médias (AVELINO, 2020). Aliado esse quadro, a expansão das hidrelétricas enfrenta, progressivamente, maiores custos e restrições, inclusive severos impactos sociais e ambientais adversos, que dificultam o desenvolvimento de novas usinas hidrelétricas de grande porte (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

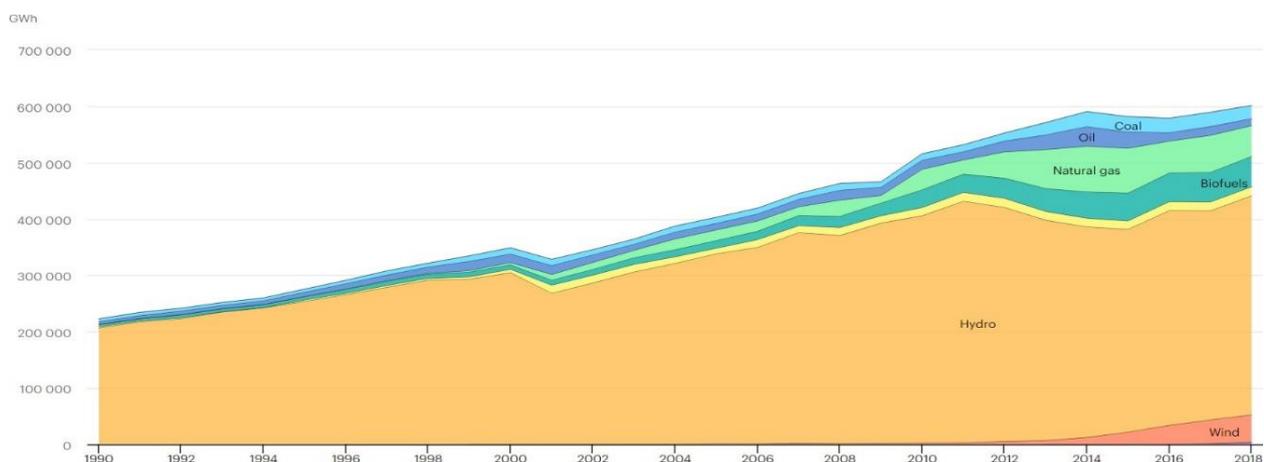
O ímpeto político gerado pela crise energética resultou na implementação de políticas de promoção das energias renováveis, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002. Na administração do Presidente Lula, a partir de 2003, o setor de eletricidade se caracterizou por intervenção estatal mais forte e políticas expansionistas, com o objetivo de ampliar e diversificar o fornecimento de energia renovável (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Nesse período, o Estado recuperou seu papel ativo no desenvolvimento do setor elétrico nacional e o planejamento e a operação se encontravam centralizadas em instituições governamentais, que regulavam e controlavam os leilões para suprir a demanda por energia (CARSTENS; CUNHA, 2019). Em 2016, o governo que assumiu após o processo de “*impeachment*” da Presidente Dilma promoveu mudanças na governança energética, retomando a política de privatização; e, o atual governo sinaliza a venda de ativos públicos com o Projeto de Lei N° 5.877, de 2019, que dispõe sobre a privatização da Eletrobras (AVELINO, 2020).

Atualmente, o Brasil é o 9º maior consumidor de energia total e 8º de eletricidade do mundo; apesar disso, é apenas o 14º maior emissor de  $CO_2$ , através da queima de combustível fóssil (ENERDATA, 2019). A matriz energética brasileira apresenta participação menor dos combustíveis fósseis na geração de energia, apenas 53,2% do total, em 2018, contra 81,2% da média mundial. Desagregando por tipo de combustível fóssil, tem-se o petróleo, com 36,6%, o gás natural, com 10,8%, e o carvão, com apenas 5,8% do total. Quando se analisa a matriz de geração de energia elétrica, verifica-se que a participação dos combustíveis fósseis é limitada no Brasil. Os combustíveis fósseis representaram somente 15% da oferta de eletricidade brasileira, em 2018 – significativamente baixa quando contrastado com o contexto mundial (64%) –, dos quais o principal componente é o gás natural (9,1%), seguido do carvão (3,9%) e do petróleo (2,1%) (IEA, 2020a).

Esses números evidenciam que as energias renováveis são um caso de sucesso nas matrizes energética e elétrica brasileira. A participação das fontes renováveis na matriz energética foi de 43,5%, em 2018, enquanto a média mundial foi de apenas 13,8% (IEA, 2020a). Essa participação é ainda mais significativa quando se considera a matriz de geração de eletricidade: enquanto a brasileira mostrou participação de fontes renováveis de 82,3%, em 2018, a média mundial ficou muito aquém, com cerca de 26,3% (IEA, 2020a). Esse número coloca o Brasil em 3º lugar em porcentagem de renováveis na matriz de geração de eletricidade do mundo, em 2018 (ENERDATA, 2019).

A evolução da matriz de geração de energia elétrica no Brasil de 1990 a 2019, está representada na Figura 1. O sistema elétrico brasileiro passou por mudanças nas últimas décadas: a fonte hidrelétrica, o pilar principal da geração desde os anos 1970 e dominante durante toda a década de 1990, vem perdendo participação no século XXI – inicialmente após 2001 (ano em que representava mais de 80%), mas, especialmente, após 2011. Em 2019, dentre as energias renováveis, verifica-se que, a principal fonte continuava sendo a hidrelétrica (então com uma participação menor, cerca de 63,5% do total), seguida pela eólica (8,9%), biocombustíveis (8,7%) e solar fotovoltaica (1,1%) (IEA, 2020a).

Observa-se, por outro lado, o crescimento de fontes fósseis, como o gás natural e o carvão, tanto em termos absolutos quanto relativos (IEA, 2020a). Segundo Ferraço (2016), a exploração do petróleo do pré-sal e o aumento do uso de usinas termelétricas são emblemáticos da despreocupação do governo federal com os impactos ambientais. Ainda que a participação das fontes renováveis na produção de eletricidade seja muito superior do que na maioria dos outros países, o Brasil está carbonizando sua matriz energética, exatamente em um momento histórico em que o mundo está começando a limpar as suas.



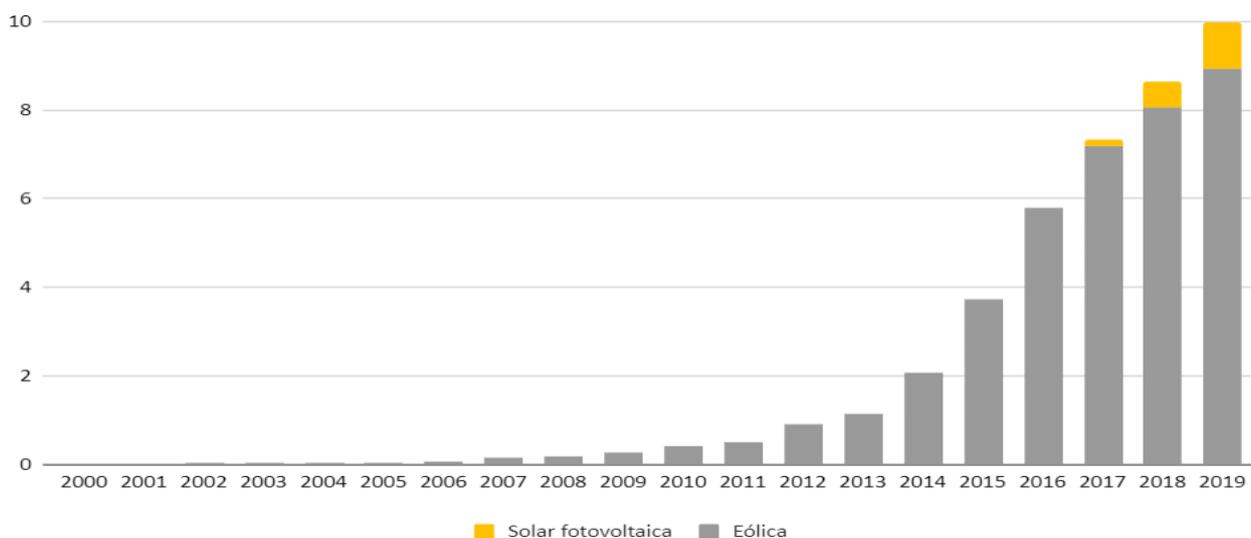
**Figura 1.** Geração de energia elétrica por fonte (GWh) – Brasil – 1990-2019.

Fonte: IEA (2020a).

#### 4. AS ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

A participação das fontes eólica e solar fotovoltaica, em conjunto, na geração de eletricidade apresentou um significativo crescimento nos anos recentes, no Brasil, de 0,18% em 2008, para 8,64%, em 2018 – em ritmo mais rápido do que a média mundial (de 1,15% para 6,84%) no mesmo período. Para o ano de 2019, a participação dessas duas fontes de energia combinadas subiu para 10% (IEA, 2020a). Na Figura 2, pode-se verificar esse expressivo crescimento, desde os anos 2000, ano no qual essa sua participação era

insignificante, até 2019. Pode se verificar que esse crescimento foi puxado, especialmente, pela energia eólica.



**Figura 2.** Participação das energias eólica e solar no total de energia elétrica (%) – Brasil – 2000-2019.

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da IEA (2020a).

#### 4.1 ENERGIA EÓLICA

A energia eólica fornece energia para os seres humanos há muito tempo, e.g. veleiros e moinhos. Entretanto, foi somente a partir da década de 1970, diante da Crise do Petróleo, que diversos países começam a investir em turbinas eólicas de grande porte como solução para mitigar a dependência de combustíveis fósseis na geração de eletricidade. A participação do Estado no desenvolvimento de turbinas e na implementação da energia eólica foi central para o estabelecimento da indústria. Nos anos 1970, Dinamarca, Alemanha e EUA – este último, através da NASA (*National Aeronautics and Space Agency*) –, iniciaram grandes projetos de P&D em energia eólica; as iniciativas da Dinamarca incluíram o desenvolvimento de protótipos patrocinados pelo Estado, que levou grandes fabricantes – e.g. *Vestas* – a desenvolver experiência com a tecnologia e criar uma cadeia de suprimentos funcional (MAZZUCATO, 2014). A partir dos anos 2000, diversos países implementaram políticas de promoção da energia eólica permitindo o desenvolvimento tecnológico e de mercado de forma mais acelerada.

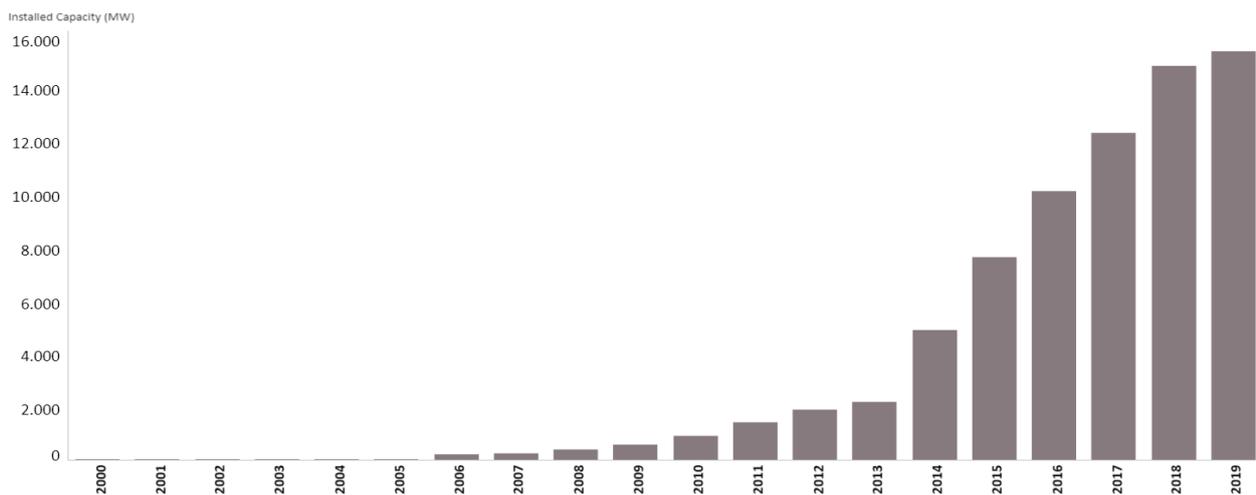
No Brasil, a primeira turbina eólica – de 23 metros de altura, rotor de três pás de 17 metros de diâmetro e potência nominal de 75 kW (JUÁREZ *et al.*, 2014) – foi instalada, na ilha de Fernando de Noronha, apenas em 1992, em cooperação entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a empresa de distribuição estadual (CELPE) (FURTADO; PERROT, 2015), efetivando o primeiro passo da energia eólica brasileira. Em 2003, 10 anos depois, a capacidade instalada em todo o país ainda era bastante baixa, cerca de 24 MW (IRENA, 2020a), demonstrando o pouco progresso no estabelecimento da fonte eólica. Esse cenário começou a se alterar a partir de meados dos anos 2000, com a instauração de políticas de promoção das fontes alternativas às hidroelétricas.

A inserção da energia eólica no Brasil motivou estudos sobre o potencial dos ventos. O Atlas do potencial eólico brasileiro estimou que o país tem potencial disponível, somente no segmento *onshore*, de 143,5 GW para torres de 50 metros, com imensa parcela do potencial concentrado na região Nordeste (52%) (AMARANTE *et al.*, 2001). Esse número é bastante expressivo quando confrontado com a capacidade total instalada de geração elétrica no Brasil, que foi de 140,9 GW, em 2015 (EPE, 2019). Adicionalmente, Pereira (2016) realizou uma reavaliação do potencial *onshore* para torres de 100 metros e chegou ao número de 880,5 GW ao nível nacional (mais de seis vezes maior do que a estimativa obtida em 2001), suficiente para produzir 1,7 PWh/ano (2,7 vezes o total da matriz elétrica brasileira, em 2019 (IEA, 2020a)). Além disso, estimou o potencial *offshore* brasileiro em 1.300 GW ao nível nacional, suficientes para produzir 3,5 PWh/ano (5,6 vezes).

Tais números mostram o potencial da participação eólica na matriz elétrica brasileira. Soma-se a esse potencial o argumento de que a energia eólica é uma fonte que se encontra alinhada às estruturas hidrelétricas

subjacentes. Primeiro, essa é uma fonte de geração centralizada, a qual permite que a energia eólica reduza a dependência das hidrelétricas sem alterar o sistema de geração e transmissão tradicional; segundo, grande parte do potencial de geração eólica tem pico em períodos secos, quando as represas se esvaziam, essas fontes apresentam complementariedade entre si e contribuem para maior segurança e estabilidade na oferta de energia; e terceiro, a intermitência da fonte eólica pode ser, parcialmente, compensada pela capacidade de armazenamento de grandes reservatórios hidrelétricos, fornecendo uma flexibilidade operacional que poderia facilitar sua integração técnica e econômica à rede elétrica (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

A Figura 3 expressa a capacidade instalada acumulada de energia eólica no Brasil de 2000 a 2019. Por conta da quantidade e qualidade dos ventos da região, a maior parte da capacidade eólica brasileira está instalada no Nordeste. Ressalta-se, ainda, o fato de que a energia eólica limita-se ao segmento *onshore* e o segmento *offshore* segue inexplorado no país (PEREIRA, 2016). Os primeiros passos foram dados pela Petrobras S. A. com a instalação de uma planta-piloto nas proximidades de uma de suas plataformas na região Nordeste, com expectativa de operação em 2022 (LUCENA; LUCENA, 2019).



**Figura 3.** Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica (MW) – Brasil – 2000-2019.

Fonte: IRENA (2020a).

O crescimento da capacidade instalada acumulada de energia eólica no Brasil ocorreu de maneira bastante rápida, entre 2000 e 2019, cerca de 41% por ano. Essa taxa, muito superior à observada no mundo (21%), significa que a capacidade instalada de energia eólica brasileira dobrou a cada dois anos aproximadamente. Apenas na última década (2009-2019), período a partir do qual foram realizados leilões específicos para essa fonte, a capacidade instalada de energia eólica cresceu mais de 25 vezes. A rápida expansão da energia eólica colocou o país no *top 10* maiores mercados de energia eólica no mundo, em 2015; e a capacidade instalada, em 2019, atingiu 15 GW (aproximadamente 2,5% do total mundial), colocando o país na 8ª posição entre todos os países (IRENA, 2020a).

Em adições líquidas, verificam-se diversas fases distintas de crescimento. Entre 2000 e 2005, o crescimento médio foi ínfimo, cerca de 1,4 MW por ano, chegando a ser registrado um ano de estagnação (2004) e, inclusive, um ano de decréscimo da capacidade eólica instalada (2002). Entre 2006 e 2013, o crescimento acelerou, mas ainda permaneceu baixo, cerca de 271 MW por ano. Para o padrão brasileiro, foi entre 2014 e 2018 que o crescimento alcançou seu ritmo mais rápido, mais do que 2,5 GW por ano. Em 2019, o crescimento regrediu consideravelmente, com a instalação de apenas 531 MW de novas capacidades de energia eólica (IRENA, 2020a).

O crescimento da energia eólica no Brasil não apenas pode ser observado em termos absolutos de capacidade instalada, mas também em termos relativos da sua participação em toda a energia elétrica produzida. Assim, a participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira passou de apenas 0,18% em 2008, para significativos 8,1% em 2018 – crescendo em ritmo mais rápido do que a média mundial (de 1,1% para 4,8%), no mesmo período (IEA, 2020a). Dados de 2019 apontam que essa participação subiu quase um ponto percentual, atingindo 8,9% (IEA, 2020a). Ademais, a fonte eólica gerou 55,9 TWh, em 2019, com destaque para a participação nos subsistemas do Nordeste (86,7%) e do Sul (10,3%), o que equivale ao

consumo médio residencial de 28,8 milhões de residências ou 86,3 milhões de habitantes e supera todas as fontes fósseis separadamente (ABEEÓLICA, 2020).

A comparação das características do segmento eólico *onshore* no Brasil com a média mundial mostra resultados interessantes. Apesar da significativa queda nos custos instalados entre 2010 e 2019, cerca de 39%, os custos instalados no Brasil se mostram ligeiramente maiores do que os custos instalados no mundo, nesse último ano, 1.559 US\$/kW contra 1.473. Por outro lado, o país apresenta um fator de capacidade, indicador usado como *proxy* de eficiência, em rápido crescimento e historicamente muito superior à média mundial, 51% contra apenas 36%, em 2019. Além disso, apresenta um LCOE (custo nivelado da energia) em queda acelerada e em nível mais competitivo do que a média mundial, em 2019, 0,048 US\$/kWh contra 0,053. Dos países/regiões selecionados pelo relatório, o Brasil fica em 1º lugar em fator de capacidade e em 2º lugar, atrás apenas da China, em termos de LCOE (IRENA, 2020d).

Com relação à indústria eólica, o Brasil possui um grau de conteúdo local ainda limitado, especialmente em componentes intensivos em conhecimento do nacele, como geradores, dispositivos eletrônicos e caixa de transmissão. Seguindo a alemã *Wobben*, a primeira empresa estrangeira a estabelecer produção no Brasil, em 1995, outras empresas estrangeiras se estabeleceram no país (FURTADO; PERROT, 2015), e.g. *Vestas* (Dinamarca), *Siemens Gamesa* (Espanha-Alemanha), *GE Renewable Energy* (EUA) – três das quatro maiores empresas do setor –, *IMPISA* (Argentina) etc. A WEG, empresa de capital nacional, ingressou no setor em 2012 (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Ainda assim, o Brasil conseguiu nacionalizar parte da produção de equipamentos eólicos – turbinas, torres e subcomponentes (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015) –, contando com políticas de conteúdo local, aplicadas no âmbito do PROINFA e pelo BNDES. Estimativas apontam que o conteúdo local do setor eólico brasileiro é de, aproximadamente, 80% (IRENA, 2020c). A cadeia produtiva brasileira de turbinas eólicas conta com 133 empresas; destas, 25 estão envolvidas com a produção de componentes – sete produzem o nacele; quatro, as pás; e 16 as torres –, enquanto, 111 empresas produzem subcomponentes – 65 empresas produzem subcomponentes de nacele; 48, de rotor; e 31, de torres (ABDI, 2020a). Os fabricantes de subcomponentes se concentram, principalmente, na região Sudeste, em especial no estado de São Paulo; enquanto, a maior concentração de fabricantes de componentes situa-se na região Nordeste, com destaque para os estados da Bahia e do Ceará (ABDI, 2020a). A indústria eólica emprega, no Brasil, direta e indiretamente, 19 mil pessoas (IRENA, 2020c).

#### 4.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A célula solar de silício cristalino foi inventada em 1954, no *Bell Telephone Laboratories* nos EUA, e as primeiras grandes oportunidades para a tecnologia fotovoltaica foram criadas, pelo governo estadunidense, na corrida espacial – Departamento de Defesa e NASA –, como comprador dos primeiros produtores, independente do custo (MAZZUCATO, 2014). A primeira aplicação prática da energia solar fotovoltaica foi para alimentar o satélite estadunidense *Vanguard I*, lançado em março de 1958. Esse uso da energia solar impulsionou o investimento do Estado nessa fonte de energia, estimulando, ainda mais, a criação da indústria. No início dos anos 1980, os primeiros parques solares fotovoltaicos começaram a surgir e demonstrar a viabilidade comercial dessa fonte de energia.

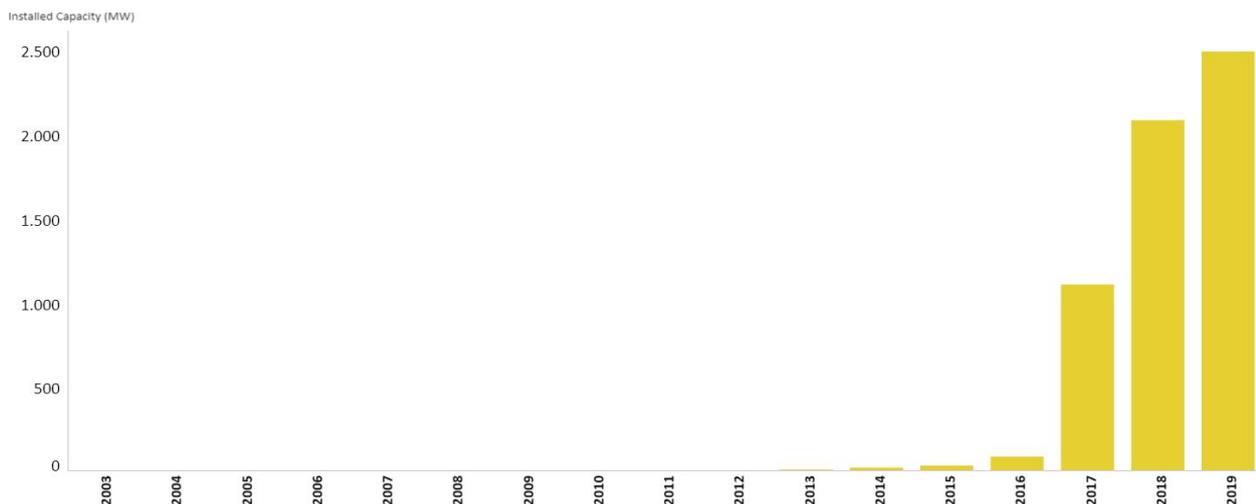
No Brasil, as primeiras instalações de energia solar fotovoltaica distribuída ocorreu como parte das iniciativas de levar energia elétrica para comunidades rurais, localizadas em áreas remotas, sem ligação com o sistema elétrico nacional, no âmbito do Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM, 1994), posteriormente, incorporado no programa Luz Para Todos (2003); ademais, projetos pilotos de geração distribuída, conectados à rede, começaram a ser instalados no final da década de 1990, principalmente em concessionárias de energia elétrica, universidades e centros de pesquisa (FERREIRA *et al.*, 2018; AVELINO, 2020). Com relação à geração centralizada, o país teve sua primeira usina solar fotovoltaica (com potência de 1 MW) inaugurada em 2011, resultado de uma iniciativa privada no município de Tauá no Ceará (AVELINO, 2020). O cenário da energia solar fotovoltaica, no Brasil, começou a se alterar apenas a partir de 2012, com a publicação da Resolução Normativa Nº 482, e, depois, em 2014, com o início da realização de leilões exclusivos para essa fonte.

Os recursos solares são abundantes no Brasil. A média anual da irradiação solar global horizontal, em qualquer região do Brasil, é significativamente maior do que a maioria dos países europeus, e.g. Alemanha (25 a

3,5  $kWh/m^2$ ) e Espanha (3,28 a 5,3  $kWh/m^2$ ), países onde projetos de obtenção de energia a partir dos recursos solares são amplamente disseminados, muitos dos quais com grandes incentivos governamentais (PEREIRA; LIMA, 2008). Segundo Pereira (2016), o Brasil precisa de somente 11.306  $km^2$ , ou 0,2% de todo o território nacional, para atender 100% da demanda por eletricidade, através da fonte solar fotovoltaica. O potencial teórico de produção de energia, a partir da fonte fotovoltaica é bastante expressivo, cerca de 468 PWh/ano (PEREIRA, 2016), correspondendo a 747 vezes o total da matriz elétrica brasileira, em 2019 (IEA, 2020a).

A natureza descentralizada da tecnologia solar fotovoltaica pode contrabalancear o tradicional modelo centralizado de geração de eletricidade, associado com investimentos em transmissão e distribuição existentes no Brasil. A geração distribuída oferece a possibilidade de expandir o acesso à eletricidade em comunidades isoladas, além de potenciais melhorias na eficiência energética, reduzindo as perdas na transmissão e distribuição (BRADSHAW, 2017). Nos períodos secos – nos quais as represas se esvaziam e a produção de hidreletricidade fica comprometida – são marcados por uma menor incidência de nuvens e, por consequência, são picos de geração solar fotovoltaica, demonstrando complementariedade desta com a fonte hidrelétrica (MONTEIRO et al., 2017).

Na Figura 4, expressa-se a capacidade instalada acumulada de energia solar fotovoltaica no Brasil, de 2000 a 2019. Vale ressaltar que a energia fotovoltaica representa todo o mercado de energia solar, isto é, atualmente, a energia heliotérmica não é utilizada no país. Atualmente, o país detém três das 15 maiores usinas de energia solar fotovoltaica centralizada, do mundo: a *EDF Energies Nouvelles*, de 400 MW, em Minas Gerais (6°); o Parque Solar Nova Olinda, de 290 MW, no Piauí (8°); e o Parque Solar de Ituverava, de 252 MW, na Bahia (9°) (SILVA et al., 2019).



**Figura 4.** Capacidade instalada de geração de energia elétrica solar fotovoltaica (MW) – Brasil – 2000-2019.

Fonte: IRENA (2020a).

O crescimento da capacidade instalada acumulada de energia solar fotovoltaica, no Brasil, ocorreu de maneira ainda mais rápida do que a capacidade eólica de 2000 a 2019, cerca de 51% por ano. Essa taxa, superior à observada no mundo em sua totalidade (41%), significa que, em média, o Brasil viu sua capacidade instalada de energia solar fotovoltaica dobrar a cada 1,5 ano aproximadamente. Apenas entre 2014 e 2019, período no qual foram realizados leilões específicos para essa fonte, a capacidade instalada brasileira cresceu 155 vezes. Apesar de a taxa de crescimento ser alta, o nível da capacidade instalada brasileira é, em termos relativos, baixíssimo: o país não apareceu no *top 10* maiores mercados de energia solar fotovoltaica no mundo, em nenhum ano; e a capacidade instalada, em 2019, cerca de 2,5 GW, representava somente 0,43% do total mundial (IRENA, 2020a).

Em adições líquidas, verificam-se diversas fases distintas de aumento da capacidade instalada. Entre 2000 e 2012, nenhuma nova capacidade foi instalada no país, com exceção de 1 MW, em 2010, e 1 MW, em 2012. Entre 2013 e 2016, o ritmo de instalação se acelerou, e atingiu cerca de 20 MW por ano. O período de maior crescimento se deu entre 2017 e 2018, quando foi instalado cerca de 1 GW anual. Em 2019, o ritmo de crescimento regrediu, com a instalação de apenas 407 MW, análogo ao verificado na energia eólica (IRENA, 2020a).

O crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil pode ser observado em termos relativos no conjunto da energia elétrica produzida no país. A participação da energia fotovoltaica na matriz elétrica brasileira passou de 0%, até o ano de 2012, para 0,6%, em 2018 – em ritmo aquém da média mundial (de 0,06% para 2,1%). Para 2019, a participação da energia solar fotovoltaica foi praticamente o dobro do registrado um ano antes, atingindo cerca de 1,1% da matriz de eletricidade (IEA, 2020a).

No tocante aos custos instalados da energia eólica *onshore*, os custos brasileiros se mostram superiores à média de custos mundiais na energia solar fotovoltaica. A diferença é muito significativa: enquanto a média mundial de custos instalados era de 995 US\$/kW, em 2019, os custos, no Brasil, foram de 1.255 US\$/kW, isto é, cerca de 26% maior. A comparação das características do setor no Brasil com o mundo encontra limitações na pouca importância do setor no país: a amostra de países, dos quais o relatório da IRENA (2020d) apresenta e analisa dados de LCOE, não inclui o Brasil. O relatório também não inclui dados por país, dos indicadores de fator de capacidade. Dados da ABSOLAR (2020) mostram que a capacidade da energia solar fotovoltaica centralizada no país, é bastante elevado, chegando a alcançar a média diária de 26,1%, superior aos 18% da média mundial, em 2019.

Somam-se a esses dados, as informações que apontam para aumento da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica de forma distribuída. Registra-se crescimento liderado pelos sistemas residenciais, com participação crescente de sistemas comerciais e rurais (REN21, 2020), mais de 3,7 GW até setembro de 2020, o que faz com que esse segmento represente 55% do total instalado de energia solar fotovoltaica no Brasil. Diferente do segmento centralizado, que se concentra, especialmente, na região Nordeste, o segmento distribuído concentra-se nas regiões Sudeste (38,1% do total) e Sul (25%) (ABSOLAR, 2020). Uma explicação para esse fenômeno é o maior nível de renda dos consumidores nesses estados, que favorece a instalação de sistemas fotovoltaicos por parte dos seus habitantes (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Com relação à indústria, a cadeia produtiva brasileira do setor solar fotovoltaico conta com 378 empresas; destas, verifica-se que a maioria, 293 empresas, está envolvida com o fornecimento de serviços (montagem, instalação, construção, operação, manutenção etc.) – 188 empresas fornecem serviço para geração distribuída; 38, para centralizada; e 67, para ambas. Com relação às fabricantes de equipamentos, 83 empresas estão envolvidas com a produção de componentes para sistemas fotovoltaicos (módulos, inversores, estruturas etc.), enquanto 28 produzem sistemas fotovoltaicos completos. Ao passo que as empresas prestadoras de serviço estão espalhadas pelo país, as empresas fabricantes de equipamentos, especialmente as que produzem sistemas fotovoltaicos completos, estão concentradas nas regiões Sudeste e Sul (ABDI, 2020b). A indústria solar fotovoltaica emprega no Brasil, direta e indiretamente, 43 mil pessoas (IRENA, 2020c).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse artigo discutiu-se a questão do *carbon lock-in*, fenômeno resultado de um processo de mudança tecnológica *path dependent* em tecnologias intensivas em carbono e nocivas ao meio ambiente, reforçado pela inércia das instituições e das políticas, assim como pela resistência deliberada e coordenada de interesses estabelecidos. Dessa dinâmica, tem-se que hoje os combustíveis fósseis representam cerca de 80% da energia utilizada no mundo, de forma que as fontes renováveis possuem baixa relevância.

Analisando o caso específico do Brasil, verificou-se que a matriz de eletricidade brasileira se encontra num ponto peculiar: apesar de possuir baixa participação dos combustíveis fósseis (15%, em 2018) e de as energias renováveis serem um caso de sucesso no país (82,3%), este se resume, principalmente, à fonte hidrelétrica (64,7%). Além disso, discutiram-se as especificidades do *lock-in* tecnológico e político-institucional na matriz energética e elétrica brasileira. A partir dessa discussão, entende-se que há entraves à transição energética, relacionados com a questão do *lock-in* tecnológico e institucional, tanto em relação aos combustíveis fósseis – especialmente da Petrobras, das multinacionais automobilísticas e dos subsídios e incentivos ao consumo e produção desses combustíveis – quanto às hidrelétricas – especialmente das empresas de construção de usinas e de distribuição de energia.

Nesse contexto, observa-se que fontes alternativas de energia, como a energia eólica e, em maior medida, a energia solar fotovoltaica, apesar dos elevados potenciais existentes no país, se encontram, em grande parte, inexploradas. Ainda assim, a taxa de crescimento da capacidade instalada dessas duas fontes, ao longo do início do século XXI (41% ao ano na eólica, e 51% na solar fotovoltaica), e o crescimento da

participação dessas fontes no total de energia elétrica gerada no país (alcançando 8,9% da eólica e 1,1% da solar fotovoltaica, em 2019), demonstram importantes avanços na penetração dessas fontes no setor de eletricidade no país, especialmente no caso da energia eólica, em grande medida frutos de uma série de políticas governamentais orientadas, e.g. PROINFA, leilões de energia, política de financiamento público do BNDES.

Nesse sentido, sugere-se como caminho para pesquisas futuras o estudo da atuação do Estado brasileiro através de políticas públicas no âmbito do setor energético frente às questões da mudança climática e da emissão de gases do efeito-estufa associados aos combustíveis fósseis. Em especial, pode ser interessante estudar comparativamente essa atuação específica nas fontes eólica e solar fotovoltaica, contrastando a prioridade dada e os instrumentos utilizados, como forma de explorar as diferenças percebidas nas trajetórias dessas duas indústrias, consideradas estratégicas para o desenvolvimento tecnológico e econômico no caso brasileiro.

## REFERÊNCIAS

ABDI. **Energia eólica**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2020a. Disponível em: <<http://sitesinteligencia.abdi.com.br/sites/energia-eolica/>>. Acesso em: 16 set. 2020.

ABDI. **Energia solar fotovoltaica**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2020b. Disponível em: <<http://sitesinteligencia.abdi.com.br/sites/energia-solar/>>. Acesso em: 16 set. 2020.

ABEEÓLICA. **Boletim anual de geração eólica 2019**. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Eólica, 2020.

ABSOLAR. **Infográfico ABSOLAR N° 24**. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html/>>. Acesso em: 17 nov. 2020.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2001.

ANFAVEA. **Anuário da indústria automobilística brasileira 2020**: Conhecer, avaliar, reformar. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2020.

ARTHUR, W. B. Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events. **The economic journal**, JSTOR, v. 99, n. 394, p. 116–131, 1989.

ARTHUR, W. B. Positive feedbacks in the economy. **Scientific American**, JSTOR, v. 262, n. 2, p. 92–99, 1990.

AVELINO, L. P. **Energia solar fotovoltaica centralizada e distribuída: o caso do Brasil**. 89 p. Dissertação (Mestrado em Economia e Gestão do Ambiente) – Faculdade de Economia, Universidade do Porto, Porto, 2020.

BLOOMBERGNEF. Global trends in renewable energy investment 2019. **Frankfurt School of Finance and Management**, 2019.

BRADSHAW, A. Regulatory change and innovation in Latin America: The case of renewable energy in Brazil. **Utilities Policy**, Elsevier, v. 49, p. 156–164, 2017.

CARSTENS, D. D. dos S.; CUNHA, S. K. da. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy policy**, Elsevier, v. 125, p. 396–404, 2019.

COADY, D.; PARRY, I.; LE, N.-P.; SHANG, B. Global fossil fuel subsidies remain large: an update based on country-level estimates. **IMF Working Papers**, International Monetary Fund, v. 19, n. 89, p. 39, 2019.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research policy**, Elsevier, v. 11, n. 3, p. 147–162, 1982.

DOSI, G. Sources, procedures, and microeconomic effects of innovation. **Journal of economic literature**, JSTOR, p. 1120–1171, 1988.

EDLER, J.; FAGERBERG, J. Innovation policy: what, why, and how. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press, v. 33, n. 1, p. 2–23, 2017.

ENERDATA. **Global Energy Statistical Yearbook 2019**. ENERDATA, 2019. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/>>. Acesso em: 24 out. 2020.

- EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2019.
- FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; SOUZA, T. A. D.; TONEZER, C.; SANTOS, G. R. D.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181–191, 2018.
- FERRAÇO, A. L. **Transição energética no Brasil**: entraves e possibilidades no âmbito institucional. 82 p. Dissertação (Mestrado em Estudos Latino Americanos) – Departamento de Estudos Latino Americanos, Leiden, 2016.
- FOSTER, J. B. **Ecology against capitalism**. New York: Monthly Review Press, 2002.
- FOXON, T. J. Technological and institutional ‘lock-in’ as a barrier to sustainable innovation. **Imperial College Centre for Policy and Technology Working Paper**, 2002.
- FRAUNDORFER, M.; RABITZ, F. The Brazilian renewable energy policy framework: instrument design and coherence. **Climate Policy**, Taylor & Francis, v. 20, n. 5, p. 652–660, 2020.
- FURTADO, A. T.; PERROT, R. Innovation dynamics of the wind energy industry in South Africa and Brazil: technological and institutional lock-ins. **Innovation and Development**, Taylor & Francis, v. 5, n. 2, p. 263–278, 2015.
- HOCHSTETLER, K.; KOSTKA, G. Wind and solar power in Brazil and China: interests, state–business relations, and policy outcomes. **Global Environmental Politics**, MIT Press, v. 15, n. 3, p. 74–94, 2015.
- IEA. **Data and statistics**. International Energy Agency, 2020a. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/>>. Acesso em: 26 out. 2020.
- IEA. **Energy subsidies**. International Energy Agency, 2020b. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/energy-subsidies/>>. Acesso em: 2 mar. 2020.
- INESC. **Incentivos e Subsídios aos Combustíveis Fósseis no Brasil em 2019**: Conhecer, avaliar, reformar. Brasília: Instituto de Estudos Socioeconômicos, 2020.
- IRENA. **Data and Statistics**. International Renewable Energy Agency, 2020a. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- IRENA. Renewable capacity highlights: 31 march 2020. **International Renewable Energy Agency**, 2020b.
- IRENA. Renewable energy and jobs: annual review 2020. **International Renewable Energy Agency**, 2020c.
- IRENA. Renewable power generation costs in 2019. **International Renewable Energy Agency**, 2020d.
- JUÁREZ, A. A.; ARAÚJO, A. M.; ROHATGI, J. S.; FILHO, O. D. Q. O. Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 39, p. 828–834, 2014.
- KEMP, R.; NEVER, B. Green transition, industrial policy, and economic development. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press UK, v. 33, n. 1, p. 66–84, 2017.
- LI, M. Climate change, limits to growth, and the imperative for socialism. **Monthly Review**, v. 60, n. 3, p. 51–67, 2008.
- LOSEKANN, L.; HALLACK, M. Novas energias renováveis no Brasil: desafios e oportunidades. In: NEGRI, J. A. D.; ARAÚJO, B. C.; BACELETTE, R. (Ed.). **Desafios da Nação: artigos de apoio, volume 2**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2018. p. 631–655.
- LUCENA, J. d. A. Y.; LUCENA, K. Â. A. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line. **Clean Energy**, Oxford University Press UK, v. 3, n. 2, p. 69–84, 2019.
- MATHEWS, J. A.; REINERT, E. S. Renewables, manufacturing and green growth: energy strategies based on capturing increasing returns. **Futures**, Elsevier, v. 61, p. 13–22, 2014.
- MAZZUCATO, M. **O Estado Empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado**. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2014.

- MELO, C. A.; JANNUZZI, G. M.; BAJAY, S. V. Nonconventional renewable energy governance in Brazil: Lessons to learn from the German experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 61, p. 222–234, 2016.
- MONTEIRO, N. d. S. C.; MONTEIRO, R. A. B.; MARIANO, J. D.; JUNIOR, J. U.; ROMANO, C. A. Brazil market outlook for photovoltaic solar energy: a survey study. **Current Journal of Applied Science and Technology**, p. 1–11, 2017.
- NORTH, D. **Institutions, institutional change and economic performance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- ORENSTEIN, L.; SOCHACZEWSKI, A. C. Democracia com desenvolvimento: 1956-1961. In: ABREU, M. d. P. (Ed.). **A ordem do progresso: cem anos de política econômica republicana**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 157–177.
- PEREIRA, E. B. **Segurança Energética: perspectivas no enfrentamento às mudanças climáticas globais**. Conferência Internacional do INCT para Mudanças Climáticas, 2016. Disponível em: <<https://fapesp.br/eventos/2016/09/inct/ENIO.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2020.
- PEREIRA, E. B.; LIMA, J. H. G. **Solar and wind energy resource assessment in Brazil**. [S.l.]: National Institute for Space Research, 2008.
- PEREZ, C. Microelectronics, long waves and world structural change: new perspectives for developing countries. **World development**, v. 13, n. 3, p. 441–463, 1985.
- PEREZ, C. Innovation systems and policy for development in a changing world. In: FAGERBERG, J.; MARTIN, B. R.; ANDERSEN, E. S. (Ed.). **Innovation studies: evolution and future challenges**. Oxford: Oxford University Press, 2013. p. 90–110.
- REN21. **Renewables 2020 global status report**. Paris: REN21, 2020. Disponível em: <<http://www.ren21.net/gsr-2020/>>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. **Energy**. Our World in Data, 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/renewable-energy/>. Acesso em: 8 mai. 2020.
- SETO, K. C.; DAVIS, S. J.; MITCHELL, R. B.; STOKES, E. C.; UNRUH, G.; ÜRGE-VORSATZ, D. Carbon lock-in: types, causes, and policy implications. **Annual Review of Environment and Resources**, Annual Reviews, v. 41, p. 425–452, 2016.
- SILVA, G. D. P. D.; MAGRINI, A.; TOLMASQUIM, M. T.; BRANCO, D. A. C. Environmental licensing and energy policy regulating utility-scale solar photovoltaic installations in Brazil: status and future perspectives. **Impact Assessment and Project Appraisal**, Taylor & Francis, v. 37, n. 6, p. 503–515, 2019.
- UNRUH, G. C. Understanding carbon lock-in. **Energy policy**, Elsevier, v. 28, n. 12, p. 817–830, 2000.
- UNRUH, G. C. Escaping carbon lock-in. **Energy policy**, Elsevier, v. 30, n. 4, p. 317–325, 2002.
- UNRUH, G. C.; CARRILLO-HERMOSILLA, J. Globalizing carbon lock-in. **Energy Policy**, Elsevier, v. 34, n. 10, p. 1185–1197, 2006.
- WORLD BANK. **Fossil fuel energy consumption (% of total)**. World Bank, 2019. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS>>. Acesso em: 21 nov. 2019.