



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO SOCIOECONÔMICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

Lucas Corrêa

**Transição energética, políticas de inovação e desenvolvimento econômico: uma  
análise das iniciativas em energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil**

Florianópolis  
2021

Lucas Corrêa

**Transição energética, políticas de inovação e desenvolvimento econômico: uma análise das iniciativas em energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em Economia.

Orientador: Prof. Silvio Antônio Ferraz Cário, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Corrêa, Lucas

Transição energética, políticas de inovação e desenvolvimento econômico : uma análise das iniciativas em energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil / Lucas Corrêa ; orientador, Silvio Antônio Ferraz Cário, 2021.  
172 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, , Programa de Pós-Graduação em Economia, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Economia. 2. Carbon lock-in. 3. Energias renováveis. 4. Janelas de oportunidade. 5. Políticas de inovação mission oriented. I. Cário, Silvio Antônio Ferraz. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Economia. III. Título.

Lucas Corrêa

**Transição energética, políticas de inovação e desenvolvimento econômico:** uma análise das iniciativas em energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Silvio Antônio Ferraz Cário, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato de Castro Garcia, Dr.  
Universidade Estadual de Campinas

Prof. Marcelo Arend, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Pablo Felipe Bittencourt, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Economia.

---

Prof. Marcelo Arend, Dr.  
Coordenador do Programa de  
Pós-graduação em Economia

---

Prof. Silvio Antônio Ferraz Cário, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2021.

À minha vó, Maria Salete Teixeira (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe, Cristiane, que sempre esteve presente e acreditou na minha capacidade e no meu potencial, especialmente quando eu não acreditei.

Agradeço a todos os meus amigos e amigas, os quais, apesar da distância física, foram essenciais para manter minha sanidade nesses tempos de quarentena. Um abraço especial para todos os bons amigos que fiz durante o mestrado.

Agradeço à minha namorada, Paola, pela inacreditável paciência em me ouvir falar interminavelmente sobre economia, inovação e minha dissertação, além de toda o carinho e companheirismo nesses momentos difíceis.

Agradeço aos professores do PPGECO/UFSC, que me ensinaram muito ao longo de todo o mestrado, e aos membros da banca, pelas importantes sugestões. Em especial, sou imensamente grato ao Prof. Dr. Silvio Cário, que além de um excelente orientador também é um exemplo de profissional e pessoa para mim.

Por fim, agradeço ao Estado nacional brasileiro (ou o que ainda sobrou dele), especialmente ao CNPq pelo apoio financeiro e à UFSC pela oportunidade, e ao contribuinte, que tornaram a minha trajetória como aluno e pesquisador de universidade pública possível.

*“We are not an endangered species ourselves yet, but this is not for lack of trying”.*  
(Douglas Adams, 1990)

## RESUMO

O processo inovativo é movido pela busca por soluções de problemas. Atualmente, um dos principais problemas que a humanidade enfrenta é a mudança climática, em que o *carbon lock-in*, isto é, a forte dependência de fontes de energia fósseis, é de particular importância. Por outro lado, nessa questão climática, identificam-se não apenas desafios, mas também oportunidades, especialmente a partir da percepção das energias renováveis como insumos-chave de uma emergente revolução tecnológica, de forma a representarem uma janela de oportunidade para países em desenvolvimento. O aproveitamento dessas oportunidades, entretanto, demandam a atuação de um Estado forte e empreendedor, e de políticas de inovação *mission-oriented* direcionadas para promover a transição energética. Construída sobre essas bases, esta dissertação busca analisar a atuação do Estado brasileiro por meio de políticas de inovação orientadas a promover a transição energética renovável – especificamente eólica e solar fotovoltaica. Baseado na literatura das políticas de inovação *mission-oriented*, em particular no tocante aos princípios essenciais que definem essas políticas, foi conduzido um estudo de caso – abordagem exploratória, aberta e qualitativa apropriada para o problema em questão –, a partir de diversas bases de dados, artigos publicados e documentos oficiais. A análise demonstrou que faltam algumas características importantes nas iniciativas brasileiras para promover de forma efetiva uma transição energética renovável – em particular, destacam-se a ausência de uma visão estratégica de longo prazo para o desenvolvimento do setor renovável; a insuficiência de políticas direcionadas para o desenvolvimento da indústria nacional e da inovação em tecnologias renováveis pelo lado da oferta; e a falta de coordenação dos diferentes instrumentos de promoção das energias renováveis, entre si e com as políticas macroeconômicas. Os resultados sugerem que, embora o Brasil apresente grande potencial eólico e solar, a estrutura de políticas de ciência, tecnologia e inovação no país tem dificuldade em dar um salto mais audacioso na direção do desenvolvimento de tecnologias relacionadas com essas fontes e no aproveitamento da janela de oportunidade em aberto por elas. Nesse sentido, a situação do Brasil é diferente do que se vê acontecendo em outros países do mundo e pode significar a perpetuação do atraso tecnológico e econômico num próximo paradigma tecno-econômico. Ao fim, deste estudo, discute-se o resgate das políticas industriais e de inovação como estratégia de desenvolvimento no Brasil e fazem-se recomendações de políticas para o caso específico das energias renováveis.

**Palavras-chave:** *Carbon lock-in*. Energias renováveis. Janelas de oportunidade. Políticas de inovação *mission-oriented*. Estudo de caso.

## ABSTRACT

The innovative process is driven by the search for solutions to problems and one of the main challenges that humanity faces today is climate change, in which the so-called carbon lock-in, that is, the strong dependence on fossil energy sources, is of particular importance. On the other hand, in the climate issue, not only challenges are identified, but also opportunities, especially from the perception of renewable energies as key-inputs of an emerging technological revolution, so that they can represent a window of opportunity for developing countries. Taking advantage of these opportunities, however, requires the action of a strong and entrepreneurial State, and of mission-oriented innovation policies aimed at promoting the energy transition. Building on these bases, this dissertation seeks to analyze the performance of the Brazilian State through innovation policies aimed at promoting a renewable energy transition - specifically wind and solar photovoltaic. Based on the literature on mission-oriented innovation policies, in particular with regard to the essential principles that define these policies, a case study was conducted – an exploratory, open and qualitative approach appropriate to the problem in question – based on several databases, published articles and official documents. The analysis demonstrates that Brazilian initiatives do not have certain important characteristics to effectively promote a renewable energy transition – in particular, the absence of a long-term strategic vision for the development of the renewable sector, the insufficiency of policies directed at development the national industry and innovation in renewable technologies on the supply side, and the lack of coordination between the different instruments for the promotion of renewable energies, with each other and with macroeconomic policies. The results suggest that, although Brazil has great wind and solar potential, the structure of science, technology and innovation policies in the country has difficulty in taking a more audacious leap towards the development of technologies related to these sources and in taking advantage of the window of opportunity open by them. In this sense, the situation in Brazil is different from what has been happening in other countries in the world and may mean the perpetuation of technological and economic lag in a next techno-economic paradigm. At the end, it is discussed the rescue of industrial and innovation policies as a development strategy in Brazil and policy recommendations are made for the specific case of renewable energies.

**Keywords:** Carbon lock-in. Renewable energy. Windows of opportunity. Mission-oriented innovation policies. Case study.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Trajetória de uma tecnologia individual . . . . .	28
Figura 2.2 – Ciclos de Kondratieff evidenciada pelo rendimento de 10 anos na S&P 500 (%) – 1814-2009 . . . . .	32
Figura 2.3 – Ciclo de vida de uma revolução tecnológica . . . . .	38
Figura 2.4 – Janelas de oportunidades duais em momentos de transição entre para- digmas . . . . .	43
Figura 4.1 – Consumo de energia primária (TWh) – Mundo – 1800-2018 . . . . .	82
Figura 4.2 – Investimentos globais em energias renováveis por tecnologia (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019 . . . . .	83
Figura 4.3 – Nova capacidade de geração de eletricidade por tipo (GW, eixo direito) e indicador de transição energética (% , eixo esquerdo) – Mundo – 2001- 2019. . . . .	84
Figura 4.4 – Investimentos globais em energia eólica (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019 . . . . .	89
Figura 4.5 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica <i>onshore</i> (cinza escuro) e <i>offshore</i> (cinza claro) (MW) – Mundo – 2000-2019 . . . . .	89
Figura 4.6 – Média ponderada de custos instalados, fatores de capacidade e LCOE para a energia eólica <i>onshore</i> – Mundo – 2010-2019 . . . . .	91
Figura 4.7 – Média ponderada de custos instalados, fatores de capacidade e LCOE para a energia eólica <i>offshore</i> – Mundo – 2010-2019 . . . . .	92
Figura 4.8 – Investimentos globais em energia solar (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019 . . . . .	96
Figura 4.9 – Capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica (MW) – Mundo – 2000-2019 . . . . .	97
Figura 4.10–Média ponderada de custos instalados, fatores de capacidade e LCOE para a energia solar fotovoltaica – Mundo – 2010-2019 . . . . .	99
Figura 4.11–Geração de energia elétrica por fonte (GWh) – Brasil – 1990-2019 . . . . .	104
Figura 4.12–Investimento em energias renováveis (bilhões de US\$ de 2019) – Brasil – 2005-2019 . . . . .	106
Figura 4.13–Participação das energias eólica e solar no total de energia elétrica (%) – Brasil – 2000-2019 . . . . .	107
Figura 4.14–Mapa do potencial eólico brasileiro por região . . . . .	108
Figura 4.15–Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica (MW) – Bra- sil – 2000-2019 . . . . .	109
Figura 4.16–Mapa da irradiação solar em território brasileiro . . . . .	113
Figura 4.17–Capacidade instalada de geração de energia elétrica solar fotovoltaica (MW) – Brasil – 2000-2019 . . . . .	114

Figura 5.1 – Investimentos públicos em porcentagem do PIB (%) – Brasil – 2000-2019	124
Figura 5.2 – Resultados dos leilões de geração de energia eólica por leilão em potência (MW, eixo esquerdo) e preço médio (R\$/MWh, eixo direito) – Brasil – 2009-2019 . . . . .	132
Figura 5.3 – Valor contratado das operações contratadas de forma direta e indireta não-automática no setor de energia eólica – Brasil – 2005-2020 . . . . .	135
Figura 5.4 – Resultados dos leilões de geração de energia solar fotovoltaica por leilão em potência (MW, eixo esquerdo) e preço médio (R\$/MWh, eixo direito) – Brasil – 2014-2019 . . . . .	138
Figura 5.5 – Valor contratado das operações contratadas de forma direta e indireta não-automática no setor de energia solar fotovoltaica – Brasil – 2017-2018	139

## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Quadro síntese dos princípios essenciais das políticas *mission-oriented* 80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Potencial teórico e técnico de fontes renováveis de energia (EJ/ano) e sua utilização em 2015 (%) – Mundo . . . . .	85
Tabela 4.2 – Capacidade de energia eólica (MW) e participação no total mundial em 2019 (%) – <i>top</i> 10 países – 2000-2019 . . . . .	90
Tabela 4.3 – Capacidade de energia solar fotovoltaica (MW) e participação no total mundial em 2019 (%) – <i>top</i> 10 países – 2000-2019 . . . . .	98

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo geral	20
1.1.2	Objetivos específicos	20
1.2	JUSTIFICATIVA	21
1.3	ESTRUTURA E METODOLOGIA	22
<b>2</b>	<b>INOVAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS</b>	<b>25</b>
2.1	PARADIGMAS TECNOLÓGICOS E EFEITO <i>LOCK-IN</i>	26
2.1.1	Paradigmas e trajetórias tecnológicas	26
2.1.2	<i>Path dependence</i> e <i>lock-in</i> tecnológico	29
2.2	REVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E JANELAS DE OPORTUNIDADE	31
2.2.1	Revoluções tecnológicas, paradigmas tecno-econômicos e grandes surtos de desenvolvimento	31
2.2.2	Das revoluções tecnológicas às revoluções institucionais	38
2.2.3	<i>Moving target</i> e janelas de oportunidade	41
2.3	ENERGIAS RENOVÁVEIS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES	46
2.3.1	<i>Carbon lock-in</i>	46
2.3.2	Janelas de oportunidades	49
2.4	SÍNTESE CONCLUSIVA	55
<b>3</b>	<b>TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E AS POLÍTICAS DE INOVAÇÃO</b>	<b>57</b>
3.1	JUSTIFICATIVAS PARA POLÍTICAS DE INOVAÇÃO E A DIREÇÃO VERDE	59
3.2	PRINCÍPIOS ESSENCIAIS DAS POLÍTICAS <i>MISSION-ORIENTED</i>	65
3.2.1	Definir uma missão a ser cumprida	65
3.2.2	Promover um portfólio de soluções tecnológicas	68
3.2.3	Conduzir as políticas de forma holística	70
3.2.4	Investir e estimular o investimento	72
3.2.5	Incorporar o aprendizado na governança	75
3.3	COMO AVALIAR POLÍTICAS <i>MISSION-ORIENTED</i> ?	76
3.4	SÍNTESE CONCLUSIVA	79
<b>4</b>	<b>ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO E BRASIL</b>	<b>81</b>
4.1	<i>CARBON LOCK-IN</i> E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO	81
4.2	ECONOMIA DA ENERGIA EÓLICA	86
4.2.1	Histórico e principais aspectos tecnológicos	86
4.2.2	Investimentos e capacidade instalada	88

4.2.3	Características estruturais da indústria . . . . .	91
4.3	ECONOMIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA . . . . .	94
4.3.1	Histórico e principais aspectos tecnológicos . . . . .	94
4.3.2	Investimentos e capacidade instalada . . . . .	95
4.3.3	Características estruturais da indústria . . . . .	97
4.4	<i>LOCK-IN</i> E AS ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL . . . . .	100
4.4.1	Especificidades do <i>lock-in</i> brasileiro e as energias renováveis	100
4.4.2	As energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil . . . . .	106
4.5	SÍNTESE CONCLUSIVA . . . . .	116
<b>5</b>	<b>POLÍTICAS DE INOVAÇÃO EM ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL . . . . .</b>	<b>117</b>
5.1	PLANO DE FUNDO DO CASO BRASILEIRO . . . . .	117
5.1.1	Principais instituições governamentais . . . . .	117
5.1.2	Políticas macroeconômicas . . . . .	122
5.2	O PAPEL DO ESTADO BRASILEIRO NO DESENVOLVIMENTO DOS SETORES DE ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA . . . . .	124
5.2.1	Políticas públicas em energias renováveis . . . . .	124
5.2.2	Políticas públicas em energia eólica . . . . .	130
5.2.3	Políticas públicas em energia solar fotovoltaica . . . . .	136
5.3	ANÁLISE DAS POLÍTICAS E RECOMENDAÇÕES PARA O CASO BRASILEIRO . . . . .	140
5.3.1	Aderência aos princípios essenciais das políticas <i>mission- oriented</i> . . . . .	141
5.3.2	Pelo resgate da atuação do Estado em políticas de inovação como estratégia de desenvolvimento no Brasil . . . . .	149
5.3.3	Recomendações de políticas . . . . .	153
5.4	SÍNTESE CONCLUSIVA . . . . .	155
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>157</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>162</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O processo inovativo é movido pela busca por soluções de problemas. Nessa busca, um dos problemas mais significativo que a humanidade enfrenta atualmente é a mudança climática. O processo de mudança climática está intimamente ligado à emissão de gases do efeito estufa<sup>1</sup>, tendo se verificado que os países que mais emitem esses gases são os que possuem maior renda *per capita*, maior população, uma estrutura industrial e tecnológica baseada em combustíveis fósseis<sup>2</sup> e extensivo desmatamento. As atividades humanas geram emissões em um nível maior do que o meio ambiente é capaz de absorver, aumentando a concentração desses gases e o aprisionamento da energia infravermelha na atmosfera; isso, por sua vez, aumenta a temperatura global média na superfície terrestre e representa potenciais efeitos catastróficos para o meio ambiente, para a economia e para a vida na Terra<sup>3</sup> (STERN, 2015).

Nesse contexto, o setor energético é de particular importância, já que a maior parte da emissão de gases do efeito estufa por humanos envolve atividades de geração ou consumo de energia (MOWERY *et al.*, 2010). Desde a Revolução Industrial, a intensificação do uso de combustíveis fósseis conduziu a um rápido crescimento na concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre (STERN, 2015). Dois séculos depois, o modelo estabelecido para geração de energia ainda apresenta essa elevada intensidade em carbono: em 2015, por exemplo, cerca de 80% da energia global usada nos domicílios, nas indústrias, nos serviços e transporte foi obtida a partir da queima de combustíveis fósseis (WORLD BANK, 2019). Esse fenômeno, chamado de *carbon lock-in* (UNRUH, 2000; UNRUH, 2002), é resultado de um processo de mudança tecnológica *path dependent* (DOSI, 1982; DOSI, 1988; ARTHUR, 1989) em tecnologias intensivas em carbono e nocivas ao meio ambiente – trajetória subótima do ponto de vista social –, reforçado pela inércia das instituições e das políticas, assim como pela resistência deliberada e coordenada de poderosos interesses estabelecidos.

Dessa dinâmica, tem-se hoje uma matriz energética na qual as energias renováveis – consideradas a maneira mais efetiva de minimizar as emissões de CO<sub>2</sub> – possuem papel relativamente pequeno (13,8%, em 2018, considerando todas as fontes renováveis<sup>4</sup> (IEA, 2020a)) apesar dos avanços tecnológicos atingidos. Muitas dessas tecnologias possuem custos relativos não competitivos, especialmente por não terem se beneficiado dos retornos crescentes, como suas concorrentes sujas (FOXON, 2002), e por sofrerem com um sistema de preço enviesado – que não leva em conta as externalidades ambientais das tecnologias intensivas em carbono (KEMP; NEVER, 2017; MOWERY *et al.*, 2010) e que concede elevados subsídios aos combustíveis fósseis (IEA, 2020b; COADY *et al.*, 2019).

<sup>1</sup> Por exemplo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) etc.

<sup>2</sup> Petróleo, carvão mineral e gás natural.

<sup>3</sup> Em geral, os impactos da mudança climática envolvem de alguma forma a água, ou sua ausência: tempestades, enchentes, inundações, secas, desertificação, acidificação dos oceanos e aumento do nível do mar.

<sup>4</sup> Biocombustíveis e resíduos, hidrelétrica, eólica, solar, geotérmica etc.

Nesse sentido, segue-se Mathews (2013a), no entendimento de que o *carbon lock-in* é uma característica central do paradigma tecno-econômico do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa, estendendo-se ao paradigma das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). A quebra do *carbon lock-in*, via processo de destruição criadora, é, portanto, um grande desafio para a emergência de um paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis. Entende-se, assim, que, para realizar essa transição energética, deve-se promover o desenvolvimento e a introdução de novas soluções tecnológicas renováveis, ao mesmo tempo que se lida com a complexidade das transformações políticas e institucionais necessárias para quebrar a resistência tecnológica, social, institucional e política das indústrias estabelecidas.

Por outro lado, na questão climática, identificam-se também oportunidades, e não apenas desafios, visto que combater os urgentes problemas ambientais requer uma extensa mudança na base tecnológica e na infraestrutura da economia, de forma a superar o *carbon lock-in*, o que coloca a ciência e a inovação tecnológica em posição de destaque (BOWEN; HEPBURN, 2014; FAGERBERG, 2018b). Os recentes avanços tecnológicos na produção e consumo de energia, na organização das cidades e no uso da terra demonstram que os objetivos de crescimento, desenvolvimento, mitigação e adaptação são compatíveis e que “*the portrayal of climate action as being in inexorable conflict with growth, poverty reduction, and radical improvements in human well-being is false and diversionary*” (STERN, 2015, p. xxvii). Dessa forma, o comprometimento com a transição para uma economia de baixo carbono pode representar uma nova e promissora onda de investimento, inovação e prosperidade global.

Seguir a trajetória criada pela revolução tecnológica das energias renováveis requer inovações radicais, em grande quantidade e em diversos setores (FAGERBERG, 2018b), possibilitando o alinhamento de objetivos ambientais com objetivos econômicos e sociais (BUSCH *et al.*, 2018). Para Pegels e Lütkenhorst (2014), alinhar a proteção ambiental aos objetivos mais tradicionais das políticas industriais e de inovação, como competitividade e geração de emprego, permite conquistar maior apoio na e da sociedade. A proposta, então, é que os problemas ambientais sejam enfrentados com ciência, tecnologia e inovação, de forma a não parar o crescimento econômico, mas reorientá-lo.

Essa discussão apresenta importantes implicações para o caso específico dos países em desenvolvimento. De maneira geral, entende-se que o crescimento econômico é essencial para a criação de empregos e redução da pobreza (LEE; MATHEWS, 2015), e o crescimento na direção verde pode permitir que milhões de novos consumidores nesses países adotem melhor padrão de vida – ainda que diferentes da noção de “boa vida” do século XX (PEREZ, 2016). Além disso, o setor energético é estratégico para o desenvolvimento, dado que é essencial em toda atividade econômica. Assim, ao passo que os países em desenvolvimento buscam aumentar seus níveis de riqueza e renda, torna-se necessário criar um vasto sistema energético para alimentar o crescimento na manufatura: os combustíveis fósseis são a

primeira opção – assim como ocorreu em todas as potências industriais –, porém a sua busca enfrenta sérios problemas nos limites da oferta e nas questões geopolíticas – bloqueios e guerras comerciais, guerras civis, revoluções e terrorismo (MATHEWS, 2018). Isso implica, segundo Mathews (2018), a necessidade de se estabelecer um modelo de desenvolvimento baseado em indústria verde em larga escala – no qual as inovações radicais e incrementais nas indústrias energéticas são essenciais –, contrapondo-se, fundamentalmente, ao modelo baseado em combustíveis fósseis, de forma a aumentar a segurança energética.

Entende-se, ainda, que o *carbon lock-in* pode ser menos restritivo em economias em desenvolvimento e, por esse motivo, pode-se esperar que esses países tenham maior sucesso na revolução tecnológica das energias renováveis (MATHEWS; REINERT, 2014). Mais do que isso, no arcabouço teórico-analítico dos paradigmas tecno-econômicos (FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 2002; PEREZ, 2010), argumenta-se que cada revolução tecnológica abre uma janela de oportunidade para que diferentes países realizem iniciativas para se emparelharem ou, até mesmo, tomarem liderança na trajetória de desenvolvimento. Em especial, segundo argumenta Mathews (2013a), um emergente sexto paradigma tecno-econômico está em sua fase de gestação — ou nos estágios iniciais de instalação –, e nele as energias renováveis constituem um conjunto de insumos-chave. Argumenta, ainda, o autor que as energias renováveis satisfazem os três critérios estabelecidos em Freeman e Perez (1988): a) custo relativo em rápido declínio; b) oferta virtualmente ilimitada por longos períodos; e c) potencial claro na sua utilização em diversos produtos ou processos, ao longo de toda a economia, diretamente ou através de outras inovações.

O aproveitamento dessas oportunidades, entretanto, envolve uma reformulação das políticas de desenvolvimento, em que o componente tecnológico seja central e um Estado “forte” seja visto como necessário para lidar com a magnitude e complexidade do processo (PEREZ, 2001). Como os mecanismos de mercado podem direcionar a mudança tecnológica para resultados potencialmente ineficientes e autorreforçadores (ARTHUR, 1989) – como, argumenta-se, é o caso do *carbon lock-in* (UNRUH, 2000; UNRUH, 2002) –, o Estado, ao enfrentar desafios sociais, “*have sometimes led the process and provided the direction towards new ‘techno-economic paradigms’, which did not come about spontaneously out of market forces*” (MAZZUCATO, 2014a, p. 16).

Verifica-se que há, na literatura da inovação, uma crescente atenção voltada para a atuação do Estado no processo inovativo não apenas como um importante instrumento para promover crescimento econômico, mas também como meio de atingir objetivos sociais concretos e imediatos, e.g. a mudança climática (FORAY *et al.*, 2012; MAZZUCATO, 2014b; MAZZUCATO, 2018). As ideias oriundas dos estudos sobre inovação podem ser aplicadas de maneira mais crítica quando orientadas para um objetivo social mais específico e significativo, ou seja, quando a política é *mission-oriented* (MAZZUCATO, 2016), do que quando, simplesmente, sobre um objetivo genérico de “mais inovação” (FLANAGAN; UYARRA, 2016), que é a perspectiva comum das falhas de mercado da teoria ortodoxa e

das falhas sistêmicas da abordagem de sistemas nacionais de inovação (SNI). Mais do que somente uma taxa, entende-se que a inovação – e o crescimento econômico – também tem uma direção. Isso sugere que as políticas públicas de inovação podem desempenhar um papel central na definição da direcionalidade das transições tecnológicas e, assim, criar novos mercados e não somente consertá-los (MAZZUCATO, 2014b).

O caso das tecnologias de energias renováveis, que são centrais para combater a mudança climática, a poluição do ar, a escassez de recursos e garantir a a segurança energética, é, segundo Mazzucato e Penna (2015), paradigmático: o papel ativo do setor público em lidar com os investimentos em energias renováveis pode ser visto como uma nova missão, relacionada com a economia verde. Ressalta-se, portanto, o papel empreendedor do Estado, seja na identificação de setores-chave que permitam realizar a transição para um paradigma das energias renováveis, seja na condução de políticas de inovação *mission-oriented* nessa direção, ressaltando os desafios e as oportunidades existentes nesse processo.

Mundialmente, verifica-se que os novos investimentos em energia oriundos de fontes de energia renováveis, o que inclui os investimentos em nova capacidade e P&D, apresentaram tendência ascendente, crescendo cerca de 80% entre 2009 e 2019 e alcançando a marca global de US\$ 301,7 bilhões, especialmente nas fontes eólica (47,3% do total em 2019) e solar (46,7%); a título de comparação, em 2019, a bioenergia e os biocombustíveis representaram, respectivamente, apenas 3,71% e 0,99% do total dos investimentos (REN21, 2019; REN21, 2020). Em nova capacidade, em particular, as fontes renováveis receberam investimento de US\$ 282,2 bilhões em 2019, que representaram 71,2% do total de investimentos em adição de capacidade no setor energético global, superando, em muito, os investimentos em combustíveis fósseis – carvão e gás natural – (cerca de US\$ 84 bilhões ou 21,2% do total investido em nova capacidade no ano) e nuclear<sup>5</sup> (cerca de 15 bilhões ou 3,8%), ambos não renováveis (REN21, 2020). Um importante ator nessa dinâmica é o Estado. Verifica-se que políticas públicas relacionadas às energias e aos combustíveis renováveis estão presentes em quase todos os países, e muito do progresso no desenvolvimento e implantação de tecnologias de energias renováveis foi conseguido através de políticas governamentais, investidas na superação de barreiras econômicas, técnicas e institucionais.

Fagerberg (2018b, p. 1571) afirma que um “*energy-system based on renewables, particularly wind and solar, would mean that the whole world will have to go electric*”, e.g. o setor de transporte, responsável por grande parcela da emissão global de gases do efeito estufa. Essa reestruturação do sistema energético na direção da eletrificação – na geração, distribuição e uso –, abre múltiplas oportunidades para posteriores inovações. Ademais, um sistema energético baseado em energias renováveis sofre de um grande desafio referente à intermitência – *what to do when the wind doesn't blow and/or the sun doesn't shine?* (FAGERBERG, 2018b, p. 1571) –, tornando o armazenamento de energia e os sistemas

<sup>5</sup> Os acidentes de Chernobyl na Ucrânia (1986) e Fukushima no Japão (2011) contribuíram para a percepção de perigo com relação à energia nuclear e para o crescimento no interesse por soluções alternativas, como as fontes renováveis (AQUILA *et al.*, 2017).

de gerenciamento uma área “quente” para inovação.

Além disso, a bioenergia pode não desempenhar um papel central num novo paradigma, considerando-se que a fotossíntese é um processo ineficiente para conversão da energia solar em outras formas usáveis de energia: sua produção demanda muita água (recurso escasso) e compete com a produção de alimentos (que possui oferta limitada) (FAGERBERG, 2018a). A bioenergia está, ainda, submetida a um regime de retornos decrescentes, pois depende diretamente da agricultura; enquanto, por outro lado, a obtenção de energia eólica e solar, por dependerem de artigos manufaturados, como turbinas eólicas e módulos fotovoltaicos, apresentam retornos crescentes (MATHEWS; REINERT, 2014). Por essas razões, e por serem alvo da maior parte dos investimentos (REN21, 2020), a presente pesquisa foca nas fontes eólica e solar fotovoltaica. Nesse sentido, a “missão” do Estado é superar a dependência de combustíveis fósseis através da maior utilização de renováveis, entre as quais destacam-se as energias eólica e solar fotovoltaica como fontes – não necessariamente tecnologias específicas – com elevado potencial de fazerem parte da “solução”.

A evidência sobre o surto de investimentos em nova capacidade de energias renováveis mostra que, a partir de 2015, o grupo dos países em desenvolvimento supera, em bilhões de US\$ investidos, o grupo dos países desenvolvidos: em 2019, 54% do total de investimentos (US\$ 152,2 bilhões) foi realizado por países em desenvolvimento (REN21, 2020). O *top* 10 países com maior investimento em capacidade de energia renovável, em 2019, inclui quatro países em desenvolvimento – China, Índia, Taiwan e Brasil. O Brasil, entre 2010 e o primeiro semestre de 2019, realizou investimentos em capacidade no montante de US\$ 55 bilhões, colocando-se em 8º lugar mundial no período (BLOOMBERGNEF, 2019). Em 2019, os investimentos totais – que incluem também os gastos em P&D – em energias renováveis somavam US\$ 6,8 bilhões no Brasil, muito aquém do pico ocorrido em 2008, US\$ 11,1 bilhões (REN21, 2020). 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%) (REN21, 2020), demonstrando a relevância dessas fontes também em nível nacional.

Se, por um lado, podem-se identificar, historicamente, políticas brasileiras na implementação, no desenvolvimento tecnológico e na inovação no setor – e.g. PROINFA (2002), leilões de energia, políticas de conteúdo local e de financiamento público do BNDES, Inova Energia (2013) etc. –, por outro, a recente guinada neoliberal e os atuais retrocessos políticos põem à prova a efetiva capacidade do Estado brasileiro de realizar políticas de inovação com vistas a uma transição entre paradigmas, especialmente uma que ressalta, em seu centro, a preocupação com as questões ambientais. Em recente publicação, visando ressaltar o papel do Estado no contexto pós-pandemia da COVID-19, Carvalho (2020) afirma que o Brasil, apesar de possuir os instrumentos necessários para pôr em ação políticas focadas no desenvolvimento de uma estrutura produtiva capaz de atender

os desafios do século XXI, vem os desmontando nos últimos anos. A “demonização” das políticas de desenvolvimento tecnológico foi intensificada por erros cometidos no passado, quando as políticas industriais visavam estender a vida de empresas pouco competitivas, mas com alto poder de influência, herdadas da era desenvolvimentista do século XX. Nesse contexto, os desafios do século XXI, e.g. as questões climáticas, bem como as políticas de desenvolvimento tecnológico ativas e estratégicas para sua superação, ficaram de lado (CARVALHO, 2020).

Não se verifica apenas o desmonte de mecanismos importantes para a execução de políticas de inovação, nos últimos anos, verifica-se também uma crescente impopularidade das políticas de inovação frente à opinião pública. A plataforma eleitoral do atual presidente aproveitou-se da percepção de que a corrupção era a causa da crise econômica que se arrasta desde 2015 – percepção essa estabelecida pelos escândalos da Operação Lava Jato – para colocar a população contra o próprio Estado. Nesse contexto, organizar a atuação da política de inovação a partir do estabelecimento de missões orientadas à solução de problemas sociais pode se tornar uma nova forma de construir apoio popular às políticas de inovação, através da geração de melhorias no bem-estar e benefícios sociais diretos de médio e longo prazos. Ainda que falte intenção do governo atual de implementar qualquer plano nessa direção, isso não deveria nos impedir de traçá-lo (CARVALHO, 2020).

Com essas observações, este estudo é norteado pela seguinte pergunta de pesquisa: Como se dá a atuação do Estado em políticas de inovação orientadas à promoção da transição energética renovável – especificamente eólica e solar fotovoltaica – no Brasil?

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar a atuação do Estado brasileiro por meio de políticas de inovação orientadas a promover a transição energética renovável – especificamente eólica e solar fotovoltaica.

### 1.1.2 Objetivos específicos

1. Discutir a problemática das inovações em energias renováveis, tanto em termos do *carbon lock-in* quanto da janela de oportunidade que elas podem representar, com base na literatura neo-schumpeteriana;
2. Explorar, teoricamente, as políticas de inovação *mission-oriented* para promoção da transição energética renovável e, por conseguinte, para o aproveitamento da janela de oportunidade em aberto;
3. Caracterizar as tecnologias e a estrutura dos mercados e das indústrias eólica e solar fotovoltaica, no mundo e no Brasil; e

4. Analisar as políticas de inovação em energia eólica e solar fotovoltaica conduzidas pelo Estado brasileiro.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segue-se Perez (2013a) no entendimento de que é importante antecipar mudanças e identificar tendências promissoras, ainda que atualmente fracas, e estudá-las assim surgem. Argumenta-se que a mudança tecnológica na direção verde (PEREZ, 2013a; MAZZUCATO; PEREZ, 2015), em especial no que tange à geração de energia a partir de fontes renováveis (MATHEWS, 2013a; MATHEWS, 2013b; BUSCH *et al.*, 2018), pode se tornar a próxima grande oportunidade tecnológica e de mercado, com alto potencial para gerar benefícios econômicos e sociais. A presente pesquisa encontra sua justificativa na frase de Perez (2013a, p. 98): “*The policies and conditions that could bring these innovations forth – from private or public sources – and propagate their use surely merit the attention of innovation scholars*”.

Em particular, busca-se discutir o argumento de que as energias renováveis são um conjunto de insumos-chave de um emergente paradigma tecno-econômico (MATHEWS, 2013a; MATHEWS, 2013b). Seguindo a literatura acerca das revoluções tecnológicas, paradigmas tecno-econômicos e grandes surtos de desenvolvimento (PEREZ, 1985; FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 2002; PEREZ, 2010), essas fontes de energia podem representar uma janela de oportunidade (PEREZ; SOETE, 1988; PEREZ, 2001), em aberto para os países em desenvolvimento. Ainda que as energias renováveis representem, por pressuposto, uma janela de oportunidade, a transição para um paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis, isto é, o efetivo aproveitamento dessa janela, não é atingida sem esforços. Em específico, ressalta-se que esse aproveitamento está relacionado com a atuação ativa do Estado através de políticas de inovação, orientadas à direção verde e colocadas no centro das estratégias de desenvolvimento. A análise dessas políticas, portanto, torna-se objeto de estudos, particularmente importante para países tecnológica e economicamente atrasados, como o Brasil.

Em grande medida, essa dissertação inspira-se no artigo “*Microelectronics, long waves and world structural change*”, de Perez (1985), que aborda a transição para o paradigma tecno-econômico das TIC como uma janela de oportunidade para países em desenvolvimento. O artigo termina com um questionamento: “*The question remains whether the developing countries are preparing themselves to face the challenge and take best advantage of the new opportunities*” (PEREZ, 1985, p. 33). No caso do Brasil, a resposta é não. Contudo, com a emergente revolução das energias renováveis, essa pergunta se renova e, argumenta-se, merece a devida atenção.

Esta dissertação tenciona distanciar-se dos estudos precedentes em dois sentidos. Primeiro, assim como Mathews (2013a), propõe confrontar o “paradoxo” de que a emergente revolução nas tecnologias energéticas renováveis é pouco estudada sob as lentes da

literatura neo-schumpeteriana. Acredita-se que a discussão de como acelerar a transição para uma economia verde, ainda bastante enraizada nos instrumentos neoclássicos de imposto de carbono e *cap and trade*, apesar de seus pequenos e limitados efeitos, pode receber importantes contribuições da escola neo-schumpeteriana. Segundo, existem, em abundância, estudos recentes que tratam da problemática das políticas de inovação para promover a transição verde, em especial das energias renováveis, bem como a sua análise em países desenvolvidos – e.g. Pegels e Lütkenhorst (2014) para a Alemanha, Fagerberg (2018a) para a Dinamarca, Alemanha e Noruega, Grillitsch *et al.* (2019) para a Suécia –, entretanto, são relativamente mais escassos os estudos que abordam a problemática especificamente do ponto de vista dos países em desenvolvimento. Esta dissertação coloca explicitamente a questão ambiental e as energias renováveis como elementos-chave nas políticas de desenvolvimento econômico.

### 1.3 ESTRUTURA E METODOLOGIA

Além dessa Introdução e das Considerações Finais, esta dissertação está estruturada em quatro capítulos principais, nos quais busca-se alcançar cada um dos objetivos específicos propostos.

Para cumprir com o primeiro objetivo específico, no Capítulo 2, discutem-se os conceitos teórico-analíticos relacionados com o processo inovativo, presentes na literatura econômica neo-schumpeteriana, apresentando-se exemplos e dados, quando disponíveis e pertinentes, para ilustrar a discussão. Assim, é dada ênfase aos conceitos de “paradigma tecnológico”, “trajetória tecnológica” (DOSI, 1982; DOSI, 1988), “revolução tecnológica”, “paradigma tecno-econômico”, e “grande surto de desenvolvimento” (PEREZ, 1985; PEREZ, 2010; FREEMAN; PEREZ, 1988), dos quais é possível retirar importantes contribuições relacionadas ao *lock-in* tecnológico, à inércia institucional e política, e às janelas de oportunidade para o desenvolvimento que se abrem em momentos de mudança de paradigma. Além disso, discute-se a literatura que versa, especificamente, sobre as energias renováveis dentro desse arcabouço teórico-analítico (MATHEWS, 2013a; MATHEWS, 2013b; MATHEWS, 2018), de forma a elaborar os argumentos relacionados ao *carbon lock-in* e à janela de oportunidade em aberto pela transição energética renovável.

O segundo objetivo específico envolve a complementação do panorama teórico-analítico com as questões relacionadas, especificamente, às políticas públicas de inovação, constituindo o Capítulo 3 desta dissertação. Em especial, são apresentados argumentos acerca da inadequação das teorias de falhas de mercado e de sistemas nacionais de inovação para fornecer sugestões de políticas eficazes para a transição energética renovável, destacando-se a perspectiva teórica que dá ênfase no papel ativo, tomador de risco e empreendedor do Estado através de políticas de inovação *mission-oriented* (MAZZUCATO, 2014b; MAZZUCATO, 2015; MAZZUCATO, 2016; MAZZUCATO, 2018; FAGERBERG, 2018b; BUSCH *et al.*, 2018). Em especial, são discutidos, nesse capítulo, os princípios

essenciais que definem as políticas de inovação *mission-oriented*, entendidas como adequadas para embasar a atuação do Estado na promoção da transição energética renovável. Os Capítulos 2 e 3, portanto, constituem os capítulos teóricos da dissertação, servindo de base teórico-analítica para os capítulos subsequentes.

No tocante ao terceiro objetivo específico, realiza-se a caracterização das tecnologias, dos mercados e das indústrias de energia eólica e solar fotovoltaica, aos níveis mundial e brasileiro, de forma a dar embasamento para as análises de políticas públicas de inovação colocadas em prática pelo Brasil. Dessa forma, o Capítulo 4, além de apresentar dados e discutir a questão do *carbon lock-in* e da transição energética, aborda, em detalhes, questões como o histórico dessas tecnologias e seus aspectos técnicos, a evolução dos investimentos, a capacidade instalada e os principais países do mercado, e as características estruturais de preço, custo, concorrência, concentração dessas indústrias. Ênfase é dada ao caso brasileiro, tanto em relação às especificidades do *lock-in* no Brasil quanto ao papel das energias renováveis no país, sobretudo eólica e solar fotovoltaica, em termos de potencial e de evolução dessas fontes e de suas indústrias associadas. Para tal, utiliza-se de base de dados como IEA (2020a), IRENA (2020) e ENERDATA (2019); relatórios ou publicações como REN21 (2019), REN21 (2020), Ritchie e Roser (2018) e IRENA (2020c); além de artigos científicos, publicações governamentais e outras bases de dados específicas para o caso brasileiro, e.g. ABEEÓLICA (2020), ABSOLAR (2020), (ABDI, 2020a) e ABDI (2020b).

Busca-se cumprir o quarto e último objetivo específico no Capítulo 5, no qual é discutido, em detalhes, o caso específico do Brasil. Para que as investigações acerca da transição entre paradigmas forneçam *insights* sólidos, essas devem articular, detalhadamente, a complexidade irreduzível do processo. Para tanto, adota-se uma metodologia exploratória, através do uso de uma abordagem aberta e qualitativa de estudo de caso. Em primeiro lugar, a metodologia de estudo de caso é apropriada para responder perguntas de pesquisa do tipo “como” (YIN, 2017), que é o caso desta dissertação. Ademais, essa é a metodologia apropriada para investigar um fenômeno contemporâneo em seu contexto específico, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente evidentes, e assim, por esse motivo, sobre qual há mais variáveis de interesse do que apontam os dados (YIN, 2017). Argumenta-se que esse é o caso explorado neste estudo: trata-se de um fenômeno contemporâneo, no qual os atores – instituições, órgãos, formuladores de políticas etc. – não podem ser dissociados de seu contexto – configuração institucional e política específica do país, bem como a natureza dos desafios e das janelas de oportunidades em aberto – no qual o papel dos diversos atores coevolui de acordo com o contexto e é influenciado por uma multiplicidade de variáveis.

O estudo de caso realizado nesta dissertação foi construído sobre as bases apresentadas no Capítulo 2, 3 e 4, que guiaram a coleta de dados de diversas fontes – e.g. IEA (2020c), ANEEL (2020), EPE (2020), BNDES (2020), e artigos publicados na área – e

---

sua posterior análise. A discussão, neste estudo, envolve tanto o contexto, em termos de principais instituições governamentais e de políticas macroeconômicas, quanto a trajetória de políticas de inovação em energias renováveis – com maior foco em energia eólica e solar fotovoltaica – realizadas no Brasil. Aborda-se, portanto, questões envolvendo o marco institucional e regulatório, o desenho de mecanismos e incentivos, os instrumentos de políticas utilizados – desde políticas pelo lado da oferta, e.g. investimento público e incentivos para P&D, até políticas pelo lado da demanda, e.g. formação de mercados e comercialização de novas tecnologias –, o financiamento dos investimentos etc. Das análises realizadas sobre essas políticas, apresentam-se algumas recomendações de políticas para o setor, que demandam, obrigatoriamente, um resgate do papel ativo do Estado na realização de políticas de inovação para promover o desenvolvimento econômico no Brasil.

## 2 INOVAÇÃO, DESENVOLVIMENTO E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS

O capitalismo é caracterizado por um processo evolucionário. A origem desse caráter evolucionário, o impulso fundamental que transforma o capitalismo “de dentro para fora”, criando incessantemente o novo e destruindo incessantemente o velho, são as inovações: novos produtos, novos métodos de produção e comercialização, novos mercados, e novas formas de organização industrial (SCHUMPETER, 2017). Essas inovações não ocorrem apenas de maneira incremental, mas também radical e descontínua. A economia capitalista não é estacionária, nem se expande de forma contínua, pelo contrário:

É revolucionada incessantemente *por dentro*, por novas iniciativas [...] Todas as estruturas existentes e todas as condições de negócio estão sempre em processo de mudança. Toda situação é subvertida antes que tenha tempo de se estabilizar. Na sociedade capitalista, o progresso econômico é sinônimo de turbulência (SCHUMPETER, 2017, p. 67).

Em Schumpeter (1997), definem-se as inovações como a introdução comercial de “novas combinações”, implicando que o novo não são, necessariamente, os elementos que as compõem, mas a forma esses elementos são associados. Entendido dessa forma, o processo inovativo é cumulativo e *path dependent*, isto é: da mesma forma que a inovação de ontem influencia a de hoje, a inovação realizada hoje contribui para definir as trajetórias inovativas e de desenvolvimento econômico no futuro. Tem-se, portanto, a defesa de uma perspectiva histórica na condução das análises das inovações, das condições subjacentes e das políticas de inovação. Schumpeter (1997), ainda, diferencia as “invenções”, que representam o espaço do que é tecnologicamente possível, das “inovações”, que, como subgrupo da anterior, representa o espaço do que é, também, economicamente lucrativo e socialmente aceitável. É no espaço da inovação, na convergência dos contextos tecnológicos, econômicos e socio-institucionais, afirma Perez (2010), que o estudo da mudança tecnológica deve ocorrer.

O ciclo schumpeteriano é marcado por dois períodos: um período de prosperidade, no qual as inovações dos empreendedores inovadores são imitadas por um “enxame” de empreendedores não inovadores, gerando uma onda de investimento; e um período posterior, de recessão, no qual as inovações tecnológicas introduzidas são absorvidas pelo mercado, a taxa de crescimento diminui, assim como o investimento (SCHUMPETER, 1997). Entretanto, Schumpeter (1997) toma a tecnologia como exógena, buscando apenas discutir o papel das inovações no crescimento econômico e no caráter cíclico do sistema capitalista; por sua vez, é a escola de pensamento neo-schumpeteriana que se aprofunda nas regularidades, evoluções, características e dinâmicas da inovação, das mudanças tecnológicas individuais às revoluções (PEREZ, 2010). Como coloca Perez (2010, p. 199), “*Although innovation is constant in the market economy, it is not always continuous*”. Para capturar tanto as regularidades quanto as discontinuidades do avanço tecnológico, os economistas neo-schumpeterianos introduziram os conceitos de “paradigmas tecnológicos”, “trajetórias

tecnológicas”, “revoluções tecnológicas”, “paradigmas tecno-econômicos” e “grandes surtos de desenvolvimento”.

Assim, neste capítulo o intuito é discutir a abordagem teórico-analítica neoschumpeteriana, que trata o capitalismo como um processo evolucionário e em constante mudança, tanto incremental quanto radical, no qual as inovações têm papel central, e a história é uma dimensão importante para a análise. Na seção 2.1, são discutidos os conceitos de paradigmas e trajetórias tecnológicas, especialmente com relação às implicações sobre o caráter *path dependent* das inovações e o decorrente efeito de *lock-in*. Na seção 2.2, avança-se sobre os conceitos de paradigma tecno-econômico, revoluções tecnológicas e grandes surtos de desenvolvimento, bem como as turbulências socioinstitucionais envolvidas nesses processos, com ênfase na discussão sobre as janelas de oportunidade que se abrem nos momentos iniciais de mudança de paradigma e as implicações desse fenômeno sobre as estratégias de desenvolvimento dos países atrasados. Na seção 2.3, são abordadas as questões relacionadas às energias renováveis. Primeiro, argumenta-se que a economia moderna está “aprisionada” em sua forte dependência de combustíveis fósseis – o chamado *carbon lock-in* –; segundo, argumenta-se que as energias renováveis podem se tornar o insumo-chave de uma próxima revolução tecnológica, de caráter “verde”, o que coloca o setor como uma potencial janela de oportunidade em aberto (por algum tempo) para países em desenvolvimento. Na seção 2.4, apresenta-se uma síntese conclusiva do capítulo.

## 2.1 PARADIGMAS TECNOLÓGICOS E EFEITO *LOCK-IN*

### 2.1.1 Paradigmas e trajetórias tecnológicas

A mudança tecnológica é melhor entendida através de uma abordagem evolucionária. Uma analogia com os processos evolucionários na biologia, entretanto, não é perfeita: o avanço tecnológico depende dos objetivos determinados pelos humanos e do corpo de conhecimento científico à disposição, o que significa que os esforços inovativos não são cegos ou aleatórios, como é a mutação biológica. Entretanto, a intencionalidade dos processos de inovação não garante que os objetivos são alcançados: a experimentação, a tentativa e erro, e a seleção *ex post* entre tecnologias concorrentes desempenham papéis fundamentais (DOSI; NELSON, 2013).

A inovação tecnológica envolve a busca por soluções de problemas (DOSI, 1988). Entendido dessa forma, o processo inovativo nunca é um processo aleatório, mas segue determinados padrões. Para explorar os padrões de mudança tecnológica, Dosi (1982) traça um paralelo entre ciência e tecnologia, em termos de definições e procedimentos, e busca, na epistemologia, uma analogia:

*In broad analogy with the Kuhnian definition of a “scientific paradigm”, we shall define a “technological paradigm” as “model” and a “pattern” of solution*

*of selected technological problems based on selected principles derived from natural sciences and on selected material technologies (DOSI, 1982, p. 152).*

O “paradigma tecnológico” define as necessidades que devem ser satisfeitas e os problemas que são, tecnologicamente, relevantes, bem como um conjunto de heurísticas e procedimentos, que definem o padrão de pesquisa necessária para a descoberta e criação de soluções inovativas (DOSI, 1988). Além disso, ressalta-se que um paradigma define tanto as direções da mudança tecnológica a serem selecionadas e perseguidas – critério positivo – quanto as direções a serem negligenciadas e ignoradas – critério negativo –, com um poderoso efeito de exclusão: os esforços se concentram em limitadas direções, dificultando a percepção de outras oportunidades tecnológicas (DOSI, 1982).

A seleção *ex ante* entre múltiplos diferentes paradigmas depende de fatores óbvios, como a viabilidade comercial e técnica e a lucratividade potencial; entretanto, a incerteza fundamental sobre o desempenho tecnológico e econômico de diferentes paradigmas alternativos impede que uma classificação objetiva seja realizada *ex ante* (DOSI, 1982). Além disso, a seleção depende também de fatores institucionais, dos quais Dosi (1982) enfatiza as “forças públicas”: e.g. os programas militar e espacial estadunidenses desempenharam papel importante na definição dos objetivos tecnológicos, além de financiarem P&D e garantirem mercado através de compras públicas, nos setores de semicondutores e computadores nas duas décadas seguintes à Segunda Guerra Mundial.

De todo modo, essa perspectiva se afasta da visão neoclássica de mudança tecnológica meramente reativa definida pelo mercado, ou *demand-pull*, e define o papel do mercado como mecanismo selecionador *ex post*, à la ambiente de seleção de Darwin. Os sinais de mercado funcionam dentro dos limites do paradigma tecnológico, isto é, com limitada influência sobre a direção do progresso tecnológico e maior influência sobre a taxa de mudança. Também se afasta do modelo linear e unidirecional da inovação, ou *technology-push*, representada pela relação “ciência-tecnologia-produção” na qual o primeiro proporciona oportunidades exógenas, e chama atenção para a complexa estrutura de *feedbacks* entre o ambiente econômico e as direções da mudança tecnológica (DOSI, 1982; DOSI, 1988).

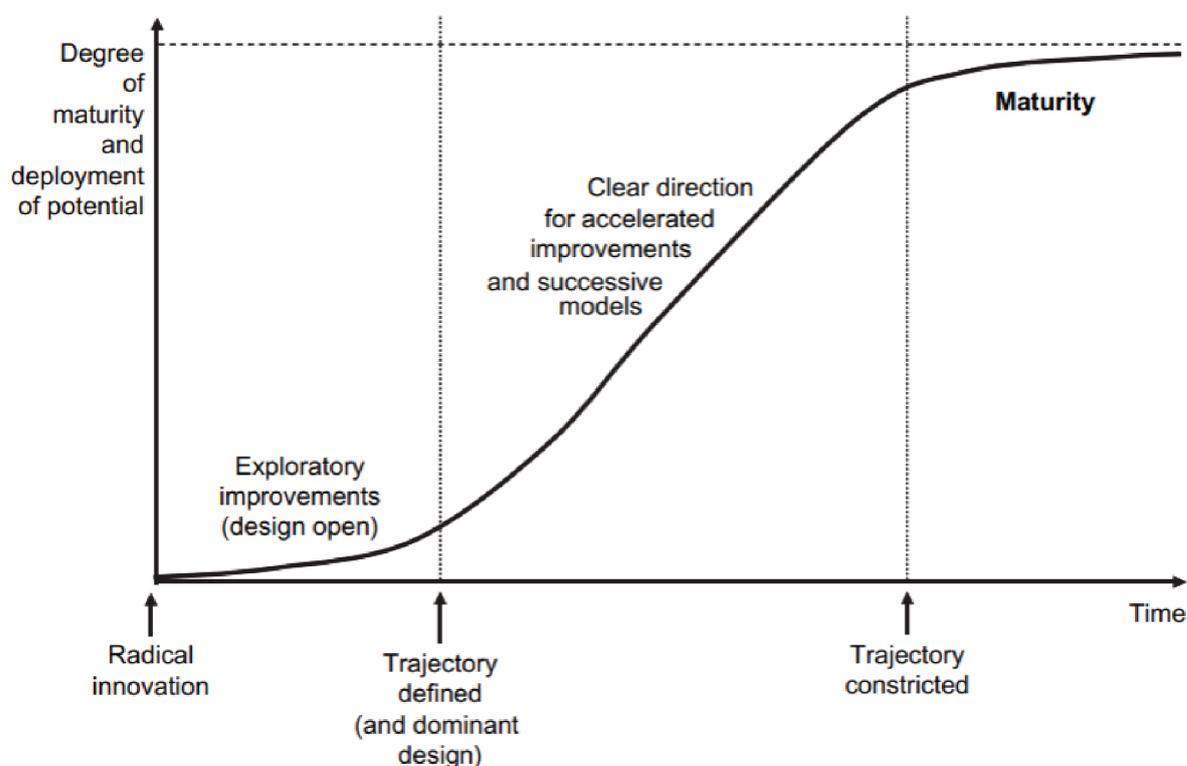
Os elementos essenciais de um paradigma tecnológico são: a) processos orientados à solução de problemas específicos relevantes, aliados aos artefatos necessários no lado do *input*; b) noções nítidas sobre os atributos desejados dos artefatos do lado do *output*; c) um corpo de conhecimento específico, compartilhado entre os profissionais do campo. Essas características dão foco ao avanço tecnológico, canalizando os esforços inovativos ao longo de “trajetórias tecnológicas” (DOSI; NELSON, 2013).

Definem-se como trajetórias tecnológicas os processos “normais” de solução de problemas dentro de um paradigma tecnológico estabelecido, ou seja, os múltiplos caminhos de progresso possíveis dentro dos limites impostos pelos *trade-offs* econômicos e tecnológicos de um determinado paradigma (DOSI, 1982; DOSI, 1988). Esse progresso “normal” está

ligado às inovações incrementais, e ressalta a importância do papel delas na trajetória de crescimento de cada tecnologia, que, em algum ponto do tempo, foi uma inovação radical. Ou seja, ao passo que um paradigma define os problemas enfrentados pelos usuários e os requisitos tecnológicos, as diversas trajetórias potenciais representam o progressivo refinamento e aprimoramento por parte da oferta (DOSI; NELSON, 2013). As trajetórias representam ordem na mudança tecnológica, mas não eliminam a permanente geração de variedade característica dos processos de inovação; no mesmo sentido, as trajetórias funcionam como representações que reduzem a incerteza, mas não eliminam a incerteza fundamental da inovação (DOSI; NELSON, 2013).

Uma trajetória tecnológica, originada de uma inovação radical, introduzida ainda em versões primitivas, é determinada pelas inovações incrementais subsequentes, seguindo o ritmo de mudança de uma curva logística (Figura 2.1). Essas inovações são mais lentas nas fases iniciais de experimentação, depois, se intensificam e se aceleram uma vez que é estabelecido um *design* dominante e uma direção pelas quais as melhorias subsequentes vão seguir, e voltam a ser lentas no ponto em que a trajetória alcança altos níveis de maturidade, o investimento em inovação passa a ter retornos decrescentes e o espaço de oportunidade para inovações incrementais se reduz (PEREZ, 2010). Isso implica que, não apenas as inovações não são aleatórias, como também não ocorrem em ritmo contínuo.

Figura 2.1 – Trajetória de uma tecnologia individual



Fonte: Perez (2010).

Por outro lado, esforços “extraordinários”, relacionados com mudanças tecnológicas

em direções totalmente novas, podem surgir de novas oportunidades tecnológicas abertas por descobertas científicas ou por dificuldades tecnológicas e/ou econômicas de seguir uma trajetória tecnológica previamente estabelecida. Esse progresso tecnológico “extraordinário”, por sua vez, está ligado às inovações radicais e às mudanças de um paradigma para outro, e sugere que o estabelecimento de novas trajetórias tecnológicas pode estar por trás dos ciclos de longo prazo do capitalismo. Entretanto, quanto mais poderoso for um paradigma tecnológico, mais difícil é a mudança para um paradigma alternativo. Isso acontece porque, sempre que ocorre uma mudança entre paradigmas, as atividades de solução de problemas precisam ser reiniciadas. A acumulação de competências em uma determinada trajetória, ao mesmo tempo que são importantes fontes de competitividade, também podem se tornar fontes de rigidez ao serem defrontadas com trajetórias alternativas (DOSI, 1982).

### 2.1.2 *Path dependence e lock-in* tecnológico

Ao longo das trajetórias, pode-se verificar a cumulatividade da mudança tecnológica, propriedade segundo a qual a tecnologia avança sobre a pré-existente e acumulam-se capacidades necessárias para solucionar problemas (DOSI, 1982; DOSI, 1988). Mais formalmente, pode-se capturar a cumulatividade em termos de probabilidade de sucesso futuro, condicional às realizações passadas do processo estocástico (DOSI; NELSON, 2013). Esse caráter cumulativo do conhecimento tecnológico é responsável pelo caráter relativamente ordenado dos padrões observados de mudança tecnológica, capturando o componente incremental do processo inovativo. A cumulatividade do conhecimento tecnológico implica ainda que, após o estabelecimento de uma trajetória, o progresso seja mais fácil nessa direção, em detrimento de direções alternativas, isto é, faz com que trajetórias específicas estabelecidas apresentem retornos crescentes, dinâmicos e não-lineares, implicando forte irreversibilidade do progresso tecnológico e *path dependence* (DOSI, 1988).

Os retornos crescentes podem ser classificados em quatro categorias: a) economias de escala: os significativos custos afundados dos investimentos nos estágios iniciais são distribuídos em uma escala de produção maior, diminuindo o custo unitário e fazendo com que as firmas não tenham fortes incentivos a investir em outras trajetórias; b) efeitos de aprendizado: melhorias nos produtos e/ou redução de seus custos ocorrem com a acumulação de conhecimento através da produção e experiência de mercado; c) expectativas auto-reforçadoras: uma maior adoção de uma determinada tecnologia diminui a incerteza percebida tanto pelos consumidores quanto pelos produtores, e aumenta a confiança no desempenho e persistência da tecnologia adotada correntemente; d) efeitos de rede: as vantagens que os agentes recebem ao adotar uma tecnologia podem depender da adoção dessa mesma tecnologia por parte de outros agentes, ou seja, verificam-se retornos crescentes quando há vantagens de agir de maneira similar a outros agentes (ARTHUR, 1994).

Nas fases iniciais da história de uma tecnologia, constatam-se diversas variações

ou, até mesmo, paradigmas concorrentes entre si. Nesse processo, com o passar do tempo, uma dessas variantes torna-se a dominante enquanto as outras vão sendo abandonadas e um paradigma tecnológico é estabelecido. Na interpretação tradicional, a tecnologia vencedora é sempre a superior, sendo os processos de experimentação, tentativa e erro necessários para evidenciar tal superioridade; por outro lado, numa interpretação baseada em retornos crescentes e *path dependencies*, entende-se que a tecnologia vencedora não precisa ser, necessariamente, a superior, mas apenas a variante que recebeu, ao acaso, maiores vantagens iniciais, desencadeando um processo “bola de neve” (DOSI; NELSON, 2013).

Uma abordagem mais formal desse fenômeno foi apresentada por Arthur (1989). As tecnologias modernas e complexas podem apresentar retornos crescentes: quanto mais elas são adotadas, mais se acumula experiência e, por conseguinte, mais são melhoradas. Quando isso é verdadeiro, argumenta Arthur (1989), insignificantes eventos aleatórios<sup>1</sup>, que concedam vantagens iniciais para a adoção de uma determinada tecnologia, magnificam-se ao longo do tempo através de *feedbacks* positivos (ARTHUR, 1990). Uma determinada tecnologia beneficiada pode, então, passar por maiores melhorias frente às tecnologias concorrentes, por consequência, pode se tornar ainda mais atrativa para uma maior parcela de adotantes potenciais; recursivamente, esse processo pode, eventualmente, fazer com que esta domine o mercado, e as tecnologias concorrentes sejam *locked-out* (ARTHUR, 1989). Crítico para esse resultado é o fato de que o sistema de produção complexo e tecnologicamente inter-relacionado, no qual se insere determinada tecnologia e suas concorrentes, não é desenhado por ninguém: dado os eventos históricos aleatórios que beneficiam uma tecnologia frente às outras, a subsequente escolha descentralizada é capaz de reforçar o *lock-in* (DAVID, 1985).

Ao incluir a possibilidade de que pequenos eventos históricos aleatórios, que aconteçam durante a adoção de uma tecnologia, se acumulem ao longo do tempo sob retornos crescentes, o modelo de Arthur (1989) apresenta quatro propriedades: a) *imprevisibilidade*: os equilíbrios ou resultados possíveis são múltiplos e o conhecimento das preferências dos consumidores e das possibilidades tecnológicas não é suficiente para que se preveja o resultado de mercado; b) *ineficiência potencial*: a tecnologia aleatoriamente beneficiada nos estágios iniciais pode não ser a de maior potencial no longo prazo, implicando que não há garantia de que, no sistema de *laissez-faire*, a tecnologia superior seja a selecionada; c) *inflexibilidade* ou *lock-in*: a tecnologia dominante que emerge desse processo torna-se progressivamente mais *locked-in* no tempo, podendo ser abandonada apenas mediante altos custos; d) *não-ergodicidade* ou *path-dependence*: os pequenos eventos não são esquecidos com o passar do tempo, podendo se tornarem persistentes e determinarem o resultado final.

---

<sup>1</sup> Dentre os exemplos de eventos desse tipo Arthur (1989) cita os sucessos inesperados em um protótipo, a extravagância dos primeiros desenvolvedores e circunstâncias políticas.

Essas propriedades possuem importantes implicações. No modelo, tem-se a emergência de um processo *path dependent*, no qual eventos históricos aleatórios não podem ser ignorados ou negligenciados na análise. Em circunstâncias desse tipo, a dinâmica do processo de adoção de uma determinada tecnologia possui caráter essencialmente histórico e é capaz de explicar facilmente fenômenos do mundo real, e.g. a adoção generalizada e o *lock-in* do notadamente ineficiente padrão QWERTY<sup>2</sup> para teclados (DAVID, 1985). Relacionado a isso, deve-se tomar cuidado ao tentar conectar a adoção generalizada de uma tecnologia a alguma característica de qualidade inata da vencedora sobre as outras concorrentes (ARTHUR, 1989), sendo esse resultado parcialmente, também, por eventos históricos aleatórios, ocorridos nos primeiros estágios do desenvolvimento tecnológico. Assim, não se pode explicar o padrão tecnológico observado apenas pelo determinismo econômico, sem referência à história (ARTHUR, 1990).

Evidentemente, por ser impossível construir um contrafactual, é difícil mensurar a frequência ou a importância do *path dependency*; de qualquer maneira, a interpretação evolucionária da mudança tecnológica rejeita a visão de que o resultado obtido é, necessariamente, o ótimo, ou seja, que a mudança é um processo inevitável do “bom” para o “melhor” (DOSI; NELSON, 2013).

## 2.2 REVOLUÇÕES TECNOLÓGICAS E JANELAS DE OPORTUNIDADE

### 2.2.1 Revoluções tecnológicas, paradigmas tecno-econômicos e grandes surtos de desenvolvimento

Um arcabouço teórico útil para discutir a mudança tecnológica, bem como o processo de destruição criadora gerado por ela, é o das revoluções tecnológicas, como apresentado em Perez (1985), Perez (2001), Perez (2002), Perez (2010), Freeman e Perez (1988). Duas características são centrais para a definição de uma revolução tecnológica. Primeiro, as revoluções tecnológicas são um conjunto inter-relacionado de importantes inovações radicais, tanto de produto quanto de processo, que formam uma grande constelação de tecnologias interdependentes (PEREZ, 2010). A interação, coerência e sinergia dos sistemas tecnológicos dentro de uma revolução tecnológica implicam que esses sistemas geram externalidades e mercados uns para os outros, influenciando a direção das inovações subsequentes (PEREZ, 2010). Essa característica vai ao encontro da ideia de que as inovações ocorrem em aglomerados ou *clusters* (SCHUMPETER, 1997), e distingue um conjunto qualquer de sistemas tecnológicos de uma revolução tecnológica. Mathews (2013a) argumenta que a perspectiva de revoluções tecnológicas permanece à margem da

<sup>2</sup> O nome refere-se as primeiras seis letras da primeira linha do teclado. Esse padrão de teclados foi desenhado para resolver problemas específicos existentes nas primeiras máquinas de escrever – inexistentes nos teclados modernos – e, apesar de não ser o teclado mais eficiente atualmente – um usuário digitando em inglês no teclado Dvorak move seus dedos por uma distância 42% menor, em relação ao teclado QWERTY –, permanece dominante por conta de vantagens iniciais que recebeu.

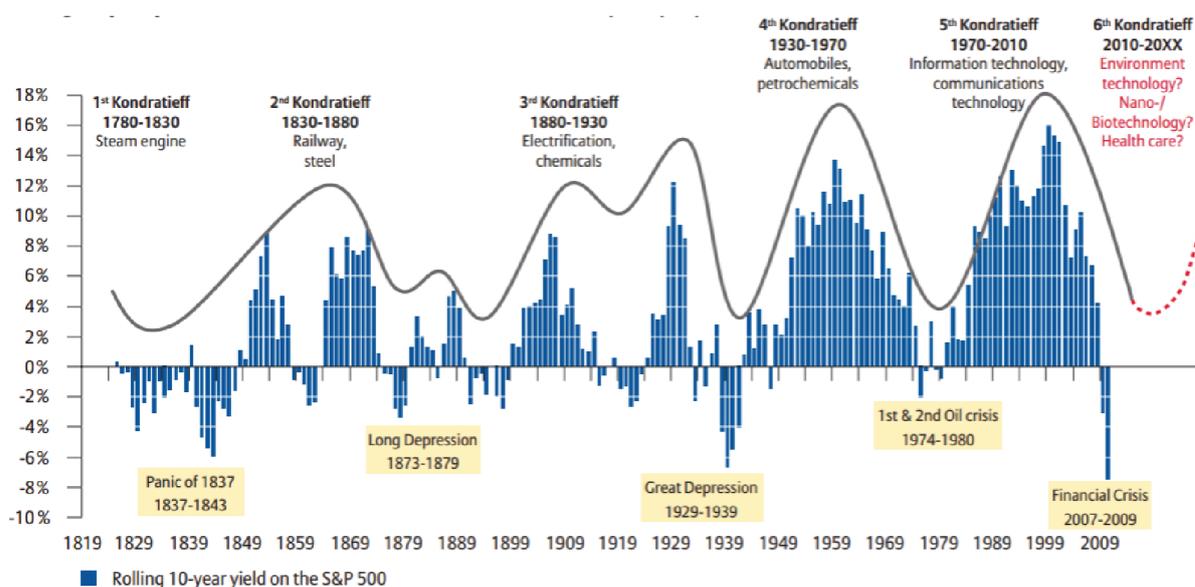
teoria econômica neoclássica, pois contradiz a suposição de que a tecnologia é exógena e aleatória, sem a qual as funções de produção, o equilíbrio e outros conceitos neoclássicos caem por terra.

A segunda característica consiste em que as revoluções tecnológicas são mudanças nos sistemas tecnológicos que, por serem altamente pervasivas, não apenas introduzem importantes produtos, serviços e indústrias totalmente novos, como também possuem potencial de redefinir e afetar, direta ou indiretamente, todos – ou quase todos – os outros setores da economia (FREEMAN; PEREZ, 1988; PEREZ, 2002). Uma revolução dá origem a um processo de multiplicação de inovações e sistemas tecnológicos, a montante e a jusante dos seus sistemas centrais, abrindo vastas oportunidades lucrativas para a expansão e o crescimento (PEREZ, 2001). É essa característica que justifica a utilização do termo “revolução”.

A título de exemplo, resalta-se o caso da atual revolução das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), a qual teve início como um sistema tecnológico ligado aos semicondutores integrados e microprocessadores – com uso inicial restrito a jogos, calculadoras, miniaturização e digitalização de instrumentos civis e militares –, e foi seguida por uma série de inovações radicais – minicomputadores, computadores pessoais, *software*, *Internet* etc. –, que se interconectaram e continuaram se expandindo juntas, através de poderosos *feedbacks* positivos, tanto nas tecnologias quanto nos mercados (PEREZ, 2010).

Esse padrão fica bastante claro nos índices do mercado de ações, conforme ilustrado na Figura 2.2, onde se pode verificar cinco revoluções, desde a Revolução Industrial até o início de uma sexta.

Figura 2.2 – Ciclos de Kondratieff evidenciada pelo rendimento de 10 anos na S&P 500 (%) – 1814-2009



Fonte: ALLIANZ GLOBAL INVESTORS (2010).

O aproveitamento do máximo potencial de criação de riqueza de cada revolução tecnológica foi possibilitado, em cada período de tempo, pelo estabelecimento de uma estrutura socioinstitucional adequada (PEREZ, 2002). A revolução tecnológica é uma condição necessária para a ocorrência de um período prolongado de crescimento econômico, porém não é condição suficiente, dado que é necessário, também, uma estrutura socioinstitucional compatível com as novas tecnologias. Cada revolução tecnológica conduziu uma profunda transformação do conjunto de tecnologias utilizadas, tanto pela simples substituição quanto pela modernização do equipamento e dos processos existentes. Além disso, cada uma dessas revoluções envolveu, ainda, uma profunda transformação nas pessoas, nas organizações e nas habilidades:

*[...] each of these revolutions is accompanied by a set of ‘best-practice’ principles, in the form of a techno-economic paradigm, which breaks the existing organizational habits in technology, the economy, management and social institutions (PEREZ, 2002, p. 7).*

O conceito de “paradigma tecno-econômico”, introduzido pela primeira vez em Perez (1985), representa as melhores práticas na utilização das novas tecnologias, nos setores novos e na modernização dos antigos, da maneira mais efetiva. É o conjunto de princípios mais bem-sucedidos e lucrativos, em termos de tecnologias, métodos, estrutura organizacional e modelos de negócios, que representam um “senso comum” na tomada de decisão de investimento e inovação (PEREZ, 2010), ou seja, é um viés que direciona as inovações tecnológicas e organizacionais (PEREZ, 1985). Em outras palavras, é a articulação de modelos tecnológicos e organizacionais que tiram o máximo do potencial de uma revolução tecnológica e guiam sua difusão.

Como exemplo, Perez (1985) elenca características relacionadas com o paradigma tecno-econômico baseado em microeletrônicos em contraste com as características do paradigma do petróleo: a) intensidade de informação *versus* intensidade de energia e materiais: essa característica, provavelmente a responsável pelas mudanças mais profundas, foi possibilitada pela mudança da estrutura de custo relativo que tornou a manipulação de dados, através de microeletrônicos e comunicação digital, cada vez mais barata; b) produção flexível *versus* produção em massa: com o novo paradigma, alta produtividade pode ser alcançada com economias de escopo em mercados segmentados, através da produção de um conjunto diversificado de bens em quantidade reduzida, ao contrário da produção em altas quantidades de um bem homogêneo para mercados de massa; c) novos conceitos de eficiência organizacional: para que as firmas tirem o máximo proveito do potencial de diversificação e flexibilidade, aberto pelo paradigma das TIC, ressaltando-se princípios organizacionais baseados em unidades flexíveis, interativas e relativamente autônomas, vinculadas em sistemas de coordenação adaptáveis e de administração estratégica e dinâmica.

O paradigma tecnológico é definido em Dosi (1982), Dosi (1988), Dosi e Nelson (2013) em um sentido micro – e.g. o paradigma tecnológico do motor à combustão –; já o paradigma tecno-econômico é definido em Perez (1985), Perez (2001), Perez (2002), Perez (2010), Freeman e Perez (1988) em um sentido mais macro, como uma constelação de paradigmas tecnológicos – e.g. paradigma tecno-econômico do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa. Além disso, Perez (1985) propõe o conceito de forma mais abrangente – alcançando fatores não tecnológicos, como instituições econômicas e sociais –, como um “meta-paradigma”, representando os princípios essenciais compartilhados pelas trajetórias individuais de uma revolução tecnológica. É um “paradigma”, no sentido *kuhniiano*, pois define um modelo de práticas inovativas “normais”, tecnológicas e organizacionais, proporcionando sucesso para aqueles que seguirem os princípios incorporados nas indústrias centrais da revolução tecnológica (PEREZ, 2002).

Os paradigmas “tecnológicos” e “tecno-econômicos” são conceitos que não se contradizem, mas que, de certa forma, se complementam: os fenômenos macro, como revoluções tecnológicas e paradigmas tecno-econômicos, são construídos sobre os micro-fundamentos da mudança tecnológica (PEREZ, 2010). Inclusive, Perez (2010) explica, em uma nota de rodapé, que o termo paradigma tecno-econômico foi introduzido em Perez (1985) em substituição ao anterior “*technological style*”, de forma a conectar-se ao conceito de paradigma tecnológico de Dosi (1982). Isso significa dizer que as implicações apresentadas na seção anterior, com relação aos paradigmas tecnológicos, a saber, *path dependence* e efeito de *lock-in* tecnológico, estão também presentes nos paradigmas tecno-econômicos. Provavelmente, de forma ainda mais intensa, devido aos *feedbacks* positivos existentes entre as trajetórias individuais intimamente inter-conectadas de uma revolução tecnológica. Ademais, o efeito de *lock-in* tecnológico pode ser significativamente reforçado por conta de fatores sociais e institucionais.

É através da influência sobre o paradigma tecno-econômico que uma revolução tecnológica exerce sua capacidade de transformar outros setores, multiplicando o impacto das novas tecnologias por toda a economia. Além de promover o crescimento por longos períodos, com as novas indústrias, uma revolução tecnológica também é capaz de guiar uma reorganização nas indústrias pré-existentes, impulsionando o aumento de produtividade e aumentando o potencial de criação de riqueza (PEREZ, 2010). Um novo paradigma tecno-econômico surge em um mundo ainda dominado pelo paradigma antigo e começa a apresentar sua vantagem comparativa em apenas um setor, ou em alguns deles (FREEMAN; PEREZ, 1988). Eventualmente, as transformações proporcionadas pelas revoluções alcançam toda a economia, de forma com que as antigas indústrias revitalizadas passam a se comportar como as novas, em termos de dinamismo, produtividade e lucratividade, através da abertura de oportunidades de inovação e da provisão de novas tecnologias, infraestruturas e princípios organizacionais (PEREZ, 2001; PEREZ, 2010).

As melhores práticas, ou paradigmas tecno-econômicos, evoluem através do uso

de novas tecnologias, da superação de obstáculos e da procura por melhores processos e rotinas. Um paradigma é, gradualmente, internalizado pelos agentes, concluindo por se tornar uma lógica compartilhada, ou “senso-comum”, enraizada na estrutura institucional, facilitando as inovações compatíveis e dificultando as incompatíveis (PEREZ, 2002). Esse processo caracteriza-se como auto-reforçador: por um lado, um paradigma tecno-econômico funciona como sinalizador das melhores direções para os investimentos e as inovações; por outro, a maior adoção de novas tecnologias e a maior propagação em uma determinada direção confirmam, na prática, a sabedoria dos princípios compartilhados, fortalecendo ainda mais o paradigma (PEREZ, 2010).

Um paradigma tecno-econômico é construído em três áreas simultâneas. A primeira dá-se através de vantagens na estrutura de custo relativo. Entre as novas indústrias que surgem numa revolução tecnológica, ressalta-se a tendência de surgir um insumo de baixo custo e altamente pervasivo, “*often a source of energy, sometimes a crucial material, plus one or more new infrastructures*” (PEREZ, 2010, p. 191). Em cada revolução tecnológica, há sempre um insumo-chave, ou um conjunto de insumos-chave associados, que possuem: a) percepção clara de custo relativo baixo e em rápido declínio; b) oferta virtualmente ilimitada e disponibilidade por longos períodos; c) aplicabilidade abrangente e potencial claro na sua utilização em diversos produtos ou processos ao longo de toda a economia, diretamente ou através de outras inovações (FREEMAN; PEREZ, 1988). A existência de novos insumos-chave, segundo Freeman e Perez (1988), aumenta as oportunidades de investimento, tanto nas indústrias que produzem e distribuem tal insumo quanto nas que o utilizam, gerando potencial para grandes aumentos de produtividade e lucratividade. No momento em que escrevia, Perez (1985) argumentou que essas características podiam ser percebidas nos microeletrônicos.

A segunda área manifesta-se através dos espaços percebidos de oportunidades lucrativas. No cerne das revoluções tecnológicas estão princípios científicos básicos e tecnologias genéricas que abrem um vasto espaço de novas possibilidades, até então inviáveis, tanto no progressivo desenvolvimento das novas tecnologias quanto na utilização destas, de maneira vantajosa, nas indústrias existentes (PEREZ, 2010).

Por fim, a terceira área revela-se através de novos critérios e princípios organizacionais. A prática com novas tecnologias e novas condições de mercado contribui para o surgimento de novos modelos de organização, mais eficazes e eficientes no aproveitamento do potencial de lucros das novas tecnologias (PEREZ, 2010). Sugere-se, portanto, que:

*[...] for society to veer strongly in the direction of a new set of technologies, a highly visible ‘attractor’ needs to appear, symbolizing the whole new potential and capable of sparking the technological and business imagination of a cluster of pioneers. This attractor is not only a technical breakthrough. What makes it so powerful is that it is also cheap or that it makes it clear that business based on the associated innovations will be cost-competitive (PEREZ, 2002, p. 11).*

Ao longo das diversas revoluções tecnológicas registradas na história, as indústrias

produtoras dos insumos-chave, baratos e altamente pervasivos, ou “*motive branches*”, que podem ser identificadas, são: força hidráulica, no primeiro paradigma tecno-econômico; carvão, no segundo; aço – e energia elétrica (MATHEWS, 2018) –, no terceiro; petróleo e outros petroquímicos, no quarto; e semicondutores, no quinto (PEREZ, 1985; PEREZ, 2010). Contudo, Perez (1985) ressalta que nenhum desses insumos era exatamente “novo”, no seu sentido técnico, em seus respectivos períodos; o elemento novo, introduzido em cada revolução tecnológica, que os tornou “insumos-chave”, foi uma radical redução nos seus custos relativos, resultantes de rupturas tecnológicas e/ou organizacionais. Por exemplo, a eletrônica existe desde o início do século XX e os transistores, semicondutores e computadores já eram tecnologias importantes na década de 1960, embora, foi somente em 1971, com o microprocessador, que o novo potencial da microeletrônica barata se tornou visível (PEREZ, 2002). Esse período de “gestação” de uma revolução tecnológica estende-se por períodos indefinidos até o ponto de *big-bang*, e a oferta do insumo-chave cresce rapidamente antes que o novo paradigma se estabeleça como dominante (FREEMAN; PEREZ, 1988). Essas rupturas são mais prováveis de ocorrerem, de serem exploradas e aplicadas, quando as tecnologias, relacionadas com o insumo-chave corrente, tenham exaurido seus potenciais para aumento de produtividade (PEREZ, 1985).

Além das “*motive branches*”, identificam-se, ainda, duas categorias de indústrias de cada revolução tecnológica, classificadas de acordo com seu papel na condução da mudança. Primeiro, têm-se aquelas indústrias que são as principais usuárias dos insumos-chave e que carregam a “palavra” sobre as novas oportunidades, formando uma constelação com alta sinergia e intensos efeitos de *feedbacks*, chamadas de “*carrier branches*”: maquinário têxtil, no primeiro paradigma; motores (de ferro) a vapor, no segundo; navios (de aço) a vapor, no terceiro; automóveis (com motor à combustão interna) e eletrodomésticos, no quarto; e computadores, *softwares* e celulares, no quinto (PEREZ, 2002; PEREZ, 2010). Segundo, têm-se as infraestruturas, que expandem os limites do mercado, aprofundando a penetração para todas as indústrias: canais, no primeiro paradigma; ferrovias nacionais, no segundo; ferrovias transcontinentais e rotas de navios a vapor, no terceiro; estradas e eletricidade, no quarto; e a *Internet*, no quinto (PEREZ, 2010).

Um “grande surto de desenvolvimento” (*great surge of development*) é definido como o processo de instalação e implementação de uma revolução tecnológica e do seu paradigma tecno-econômico associado, ou seja, de propagação da revolução e seu paradigma por toda a economia, promovendo profundas mudanças estruturais em diversos âmbitos da economia e da sociedade – e.g. produção, distribuição, comunicação e consumo (PEREZ, 2002; PEREZ, 2010). Apesar de ter sido fonte de inspiração (PEREZ, 1985), mais tarde Perez (2010) ressalta que esse conceito representa uma ruptura ao conceito de “ondas longas” de Schumpeter (1997) e Kondratieff (1935), isto é, enquanto esses dois últimos autores se detiveram em explicar as subidas e descidas do crescimento econômico e de outras variáveis agregadas, o conceito de grandes surtos se voltou para a explicação de como as revoluções

tecnológicas evoluem e se difundem e quais são seus impactos transformadores na economia e na sociedade. Os grandes surtos não são ciclos econômicos, mas um fenômeno sistêmico, no qual fatores sociais e institucionais desempenham importantes papéis (PEREZ, 2002).

O fenômeno da mudança tecnológica é cíclico, com revoluções tecnológicas, paradigmas tecno-econômicos e grandes surtos de desenvolvimento sucessivos. Independente de quão poderoso é um paradigma tecno-econômico, seu potencial, eventualmente, será exaurido (PEREZ, 2002). O grande surto de desenvolvimento, o ciclo de vida das revoluções tecnológicas e seus paradigmas, segue a trajetória de uma curva logística – análoga à das inovações individuais, Figura 2.1 –, ao longo de mais ou menos meio século<sup>3</sup>, com uma fase de rápido e pronunciado crescimento, e uma fase de maturidade e estagnação (PEREZ, 2001).

Quando se aproxima da fronteira de melhores práticas e as aplicações potenciais tenham sido, em grande parte, aproveitadas, o processo de propagação do paradigma tecno-econômico se enfraquece, e as forças subjacentes ao surto de desenvolvimento mínguam. Nesse ponto, os limites do crescimento, a queda nos lucros, e o menor aumento na produtividade afetam, gradualmente, um setor atrás do outro. O processo de descoberta e redescoberta de novos elementos tecnológicos, contudo, dá início a um processo de abandono do modelo exaurido e de propagação inicial de um modelo emergente (PEREZ, 1985). Em outras palavras:

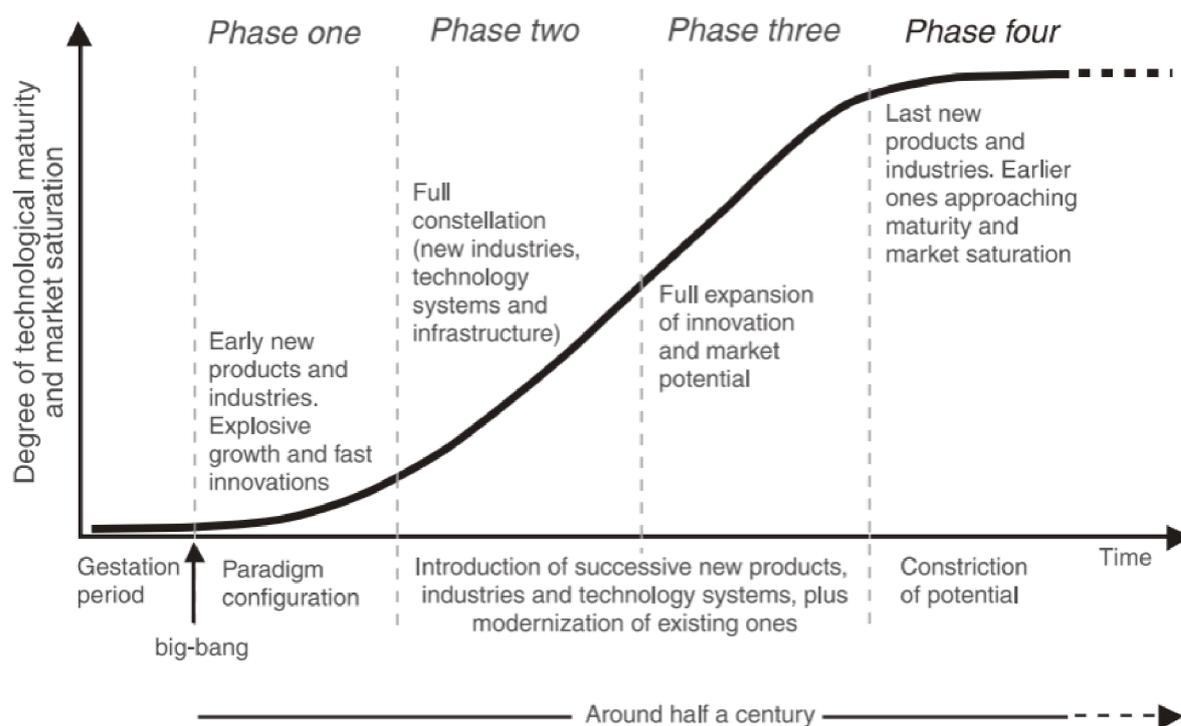
*When the potential of a paradigm begins to reach limits, when the space opened by a paradigm becomes constricted, productivity, growth and profits are seriously threatened. Thus the need and the effective demand appear for new solutions, for radical innovations, for stepping out of the well-trodden paths (PEREZ, 2002, p. 30).*

Na Figura 2.3, apresenta-se uma versão estilizada, em quatro fases, do ciclo de vida de uma revolução tecnológica. A Fase 1, com início no *big-bang*, constitui um período de crescimento explosivo e rápidas inovações nas novas indústrias, revelando os princípios que definem o “senso comum” e guiam a propagação da revolução tecnológica; a Fase 2 é marcada por uma rápida difusão, dando origem a novas indústrias, sistemas tecnológicos e infraestruturas; a Fase 3 também é marcada pelo rápido crescimento, alimentado pela implementação completa do paradigma por toda a estrutura produtiva; a Fase 4, por fim, ocorre quando a revolução tecnológica chega a sua maturidade, e o dinamismo aproxima-se do ponto de exaustão, com a saturação dos mercados e os retornos decrescentes da inovação tecnológica (PEREZ, 2002).

Essas fases podem ser, ainda, classificadas em dois períodos, de mais ou menos trinta anos cada um: o primeiro, denominado período de instalação, marca a irrupção de novas tecnologias em uma economia em fase de maturidade, desestabilizando o antigo e difundindo formas novas, e superiores, de “se fazer as coisas”; o segundo, caracterizado

<sup>3</sup> Levando essa periodização em consideração e colocando o início do paradigma das TIC no ano de 1971, isso nos coloca nas portas de uma nova revolução tecnológica.

Figura 2.3 – Ciclo de vida de uma revolução tecnológica



Fonte: Perez (2002).

como período de implementação, marca a renovação e reformulação de toda a economia através do poder modernizador do novo paradigma, possibilitando o aproveitamento do potencial máximo de geração de riqueza. Entre esses dois períodos, observa-se um “*turning point*”, no qual são realizadas as mudanças regulatórias, necessárias para facilitar e moldar o período de implementação posterior – fortemente influenciado pela política, pela ideologia e pelo jogo de poderes –, possibilitando uma “era de ouro” e o completo aproveitamento do potencial da revolução tecnológica (PEREZ, 2002).

Entretanto, vale destacar que a trajetória de uma revolução tecnológica não é tão suave e contínua como exposto na sua versão estilizada apresentada na Figura 2.3. O período de instalação de um novo paradigma é marcado por uma batalha contra o poder enraizado na estrutura produtiva, no ambiente sociocultural e nas instituições, sendo esse embate, eventualmente, vencido pelo novo paradigma que, então, se difunde por toda a economia (PEREZ, 2002). É esse complexo processo de propagação de uma revolução tecnológica pela economia e sociedade, segundo Perez (2002), que torna o desenvolvimento um processo descontínuo.

## 2.2.2 Das revoluções tecnológicas às revoluções institucionais

A emergência de uma nova revolução tecnológica traz um conjunto de novas oportunidades, num momento em que as sociedades estão, ainda, bastante presas à estrutura

institucional do paradigma tecno-econômico anterior. Após décadas de desenvolvimento sob um paradigma, pode-se dizer que tanto as pessoas quanto a sociedade como um todo estão “super adaptadas” (*over-adapted*) à lógica do paradigma estabelecido (PEREZ, 2002). Contudo, no momento de irrupção de uma revolução:

*Suddenly, in relation to the new technologies, the old habits and regulations become obstacles, the old services and infrastructures are found wanting, the old organizations and institutions are inadequate. A new context must be created; a new ‘common sense’ must emerge and propagate* (PEREZ, 2002, p. 42).

Como a estrutura socio-institucional, criada para lidar com o crescimento baseado em um conjunto de tecnologias, é, de maneira geral, inadequada para lidar com o crescimento baseado num novo conjunto de tecnologias, têm-se que, nos estágios de instalação de novas indústrias, a esfera socio-institucional é incompatível com a esfera tecno-econômica. Isso é reforçado pela diferença no ritmo de construção de um novo paradigma tecno-econômico, existente entre essas esferas: por um lado, as forças competitivas, as pressões por sobrevivência e a busca por lucros fazem com que a difusão das mudanças seja mais rápida na economia; por outro, a forte inércia, resultante do enraizamento das rotinas, da ideologia e dos interesses estabelecidos, faz com que a difusão seja retardada na sociedade e nas instituições. Como os fatores organizacionais e institucionais que configuram uma sociedade demandam mais tempo para serem transformados, é provável que a incompatibilidade entre os requisitos de uma emergente revolução tecnológica e o ambiente socioinstitucional vigente atrapalhe sua difusão e a percepção de seus benefícios potenciais. Essa diferença no ritmo de mudança explica o período de turbulência que se segue após o *big-bang* de uma revolução tecnológica e, por consequência, defasagem temporal até o aproveitamento completo do novo potencial (PEREZ, 2002).

Um paradigma tecno-econômico representa tanto um propulsor necessário para a difusão de uma revolução, quanto uma força retardadora, quando novas oportunidades tecnológicas surgem. Por um lado, um paradigma tecno-econômico favorece a assimilação e difusão de uma revolução tecnológica, tomando proveito do potencial máximo de criação de riqueza contido num grande surto de desenvolvimento; por outro, quando esse potencial se exaure e uma nova revolução tecnológica emerge, o enraizamento dos hábitos e das instituições podem funcionar como uma força inercial que se coloca no caminho do novo, tornando-se o principal obstáculo à difusão da próxima revolução (PEREZ, 2010). Argumenta-se que a tecnologia evolui por revoluções, justamente por conta da persistência de um paradigma tecno-econômico específico, que induz uma profunda adaptação social as suas características, criando mecanismos de inclusão-exclusão, que evitam o afastamento radical das trajetórias até que o potencial do paradigma seja exaurido (PEREZ, 2002).

Numa emergente revolução tecnológica, têm-se que o aproveitamento do potencial máximo de produção de riqueza das novas oportunidades demanda uma significativa recomposição institucional, através de intensos conflitos sociais, políticos e ideológicos (PEREZ,

2002). Uma revolução tecnológica pode ser descrita como um processo de “destruição criadora” não apenas das tecnologias e indústrias, mas também das instituições e das políticas (PEREZ, 2001). Isso ocorre, pois uma revolução não traz apenas novas e promissoras oportunidades; traz, também, ameaças às maneiras estabelecidas de se fazer as coisas. Os antigos modelos organizacionais são profundamente transformados pela abertura de um conjunto de novas oportunidades e pelos requerimentos para o seu aproveitamento: “*Thus each technological revolution inevitably induces a paradigm shift*” (PEREZ, 2002, p. 15).

Acomodar cada nova revolução tecnológica envolve profundas mudanças em diferentes níveis: a) no primeiro nível, a difusão das novas tecnologias requer o estabelecimento de infraestruturas específicas, fornecedores especializados, canais de distribuição etc.; b) no nível cultural, a adaptação à nova lógica envolve um processo de aprendizado por parte dos indivíduos – e.g. engenheiros, administradores e consumidores – sobre a produção, o uso dos novos produtos e das tecnologias, bem como o entendimento sobre a direção “normal” das inovações subsequentes e a aquisição dos princípios organizacionais incorporados no novo paradigma; e c) no nível institucional, há o estabelecimento de um conjunto de instituições facilitadoras, que envolve regras e regulamentos, treinamento e educação especializados, normas, órgãos de supervisão, inovações financeiras etc. (PEREZ, 2002).

O processo de aprendizado e adaptação à nova dinâmica, entretanto, é custoso. A transição entre paradigmas não ocorre de maneira suave, especialmente por conta do padrão de comportamento social e da estrutura institucional, conformados segundo a dinâmica tecnológica da revolução anterior; pelo contrário, essa transição é resultado de comprometimento e grandes esforços inovativos e experimentais e está sujeita à confrontação interna devido à oposição de interesses estabelecidos (PEREZ, 1985). Os efeitos sociais iniciais de uma revolução tecnológica são caóticos e contraditórios, e sua difusão encontra poderosa resistência das pessoas e das instituições (PEREZ, 2002).

Os estágios iniciais de difusão de uma revolução tecnológica são marcados por polarização tanto dentro da economia quanto entre a nova economia e a antiga estrutura social. O período de instalação é marcado pela intensa coexistência de dois paradigmas, um ocupando cada vez mais espaços, e outro resistindo à mudança e ao seu declínio. As firmas estabelecidas são os principais agentes de um paradigma tecno-econômico dominante e, num momento de exaustão do potencial de um paradigma, são elas as mais prováveis a se tornarem forças conservadoras, isto é: ainda que inovem, seus elevados custos afundados, relacionados aos pesados investimentos em tecnologias maduras, fazem com que evitem uma mudança verdadeiramente revolucionária, que torne seus equipamentos e práticas obsoletos (PEREZ, 2002). Isso, entretanto, é paradoxal: “[...] *ironically, since their productivity, market and profit growth rates are probably stagnating, their main hope for revitalization lies in radical change*” (PEREZ, 2002, p. 35).

Quando uma nova revolução tecnológica emerge, as forças de mercado não são suficientes para direcionar o avanço tecnológico no sentido do novo paradigma, obstruindo os

efeitos modernizadores da revolução. Essa resistência pode prolongar o período de transição entre paradigma; contudo, no médio prazo, o estabelecimento de uma nova tecnologia, genuinamente superior, com maior produtividade e potencial claro de crescimento, é um resultado praticamente inevitável, especialmente quando as oportunidades relacionadas ao paradigma anterior estão próximas da exaustão (PEREZ, 2002).

As linhas de tensão não se limitam ao embate entre as novas e antigas indústrias, pois esse embate existe também: nos métodos utilizados, entre as firmas que se modernizaram e as que permanecem ligadas às antigas maneiras de se fazer as coisas; regionalmente, entre as localidades onde se concentram as novas e antigas indústrias; nas capacidades, entre os indivíduos treinados para participar nas novas tecnologias e os que possuem habilidades progressivamente obsoletas; no mercado de trabalho, entre os que trabalham em firmas modernas e vivem em regiões dinâmicas e os que são ameaçados pelo desemprego e vivem em regiões estagnantes; estruturalmente, entre as novas indústrias e o antigo sistema regulador; e internacionalmente, entre os países que entram na dinâmica das novas tecnologias e os que ficam para trás (PEREZ, 2002).

O estabelecimento de um paradigma tecno-econômico que represente uma “combinação ótima” em relação a uma emergente revolução tecnológica ocorre de maneira desigual, em diferentes contextos nacionais, políticos e culturais, implicando, por sua vez, que esse processo pode influenciar, significativamente, o padrão internacional de liderança e difusão tecnológicas (FREEMAN; PEREZ, 1988). A capacidade de um país de realizar mudanças estruturais na direção mais vantajosa – tecnológicas, econômicas, organizacionais, institucionais etc. – pode ser crucial para conseguir aproveitar e explorar o potencial aberto por uma revolução tecnológica, inclusive como maneira de alcançar, incrementar e preservar a condição de desenvolvimento (PEREZ, 2002). Em todas as revoluções tecnológicas do passado, afirma Perez (2002), o Estado liderou o processo de mudança institucional, permitindo que paradigmas antigos fossem substituídos por paradigmas novos e que todo o potencial da revolução fosse aproveitado. Nessa perspectiva, *“the state has a crucial role to play, in terms of creating a new vision that will coordinate cognitive efforts of different (public and private) agents and direct their action to areas beyond the existing paradigm”* (MAZZUCATO, 2014a, p. 15).

### 2.2.3 *Moving target* e janelas de oportunidade

Ao longo da história, países que realizaram esforços com vistas a promover o desenvolvimento econômico apresentaram os mais variados graus de sucesso: desde os bem-sucedidos, como Japão e Coreia do Sul, até os menos bem sucedidos, como os países da África e da América do Sul. A razão para essa diferença nos resultados não pode ser, satisfatoriamente, explicada pelas simples diferenças entre políticas específicas e condições particulares de cada país. Em sua essência, essa diferença está conectada com a natureza das “janelas de oportunidades” e com a capacidade, intuitiva ou consciente, de aproveita-

mento dessas janelas (PEREZ, 2001). Diversos exemplos de esforços bem-sucedidos podem ser usados para ilustrar a existência de janelas de oportunidade para o desenvolvimento de países atrasados. Por outro lado, “*their scarcity highlights how ‘non-automatic’ and exceptional such processes of effective technological catching up are*” (PEREZ; SOETE, 1988, p. 463). O ponto chave desse argumento é que esses importantes exemplos bem-sucedidos não devem ser seguidos como uma “receita de bolo”, mas como lições sobre as dinâmicas específicas, que tornaram o desenvolvimento possível (PEREZ, 2001).

Em especial, ressalta-se que as sucessivas e descontínuas revoluções tecnológicas implicam que os países em desenvolvimento se defrontam com uma fronteira tecnológica em constante movimento (*moving target*), mudando de direção mais ou menos a cada meio século (PEREZ, 2001). Sob essa ótica, pode-se afirmar que: “[...] *history is full of examples of how successful overtaking has been primarily based on running in a new direction*” (PEREZ; SOETE, 1988, p. 460).

Ao se analisar a história, deve-se distinguir as singularidades das recorrências, isto é, existem padrões de mudança técnica que se repetem em cada revolução tecnológica, porém cada uma dessas revoluções possui características que as tornam únicas e que não podem fugir da análise (PEREZ, 2001). Identificar fenômenos recorrentes, entretanto, não é o mesmo que simplificar a história ou cair em alguma espécie de determinismo tecnológico, reduzindo a complexidade e a imprevisibilidade do processo inovativo. Essa identificação, portanto, serve para atingir dois objetivos:

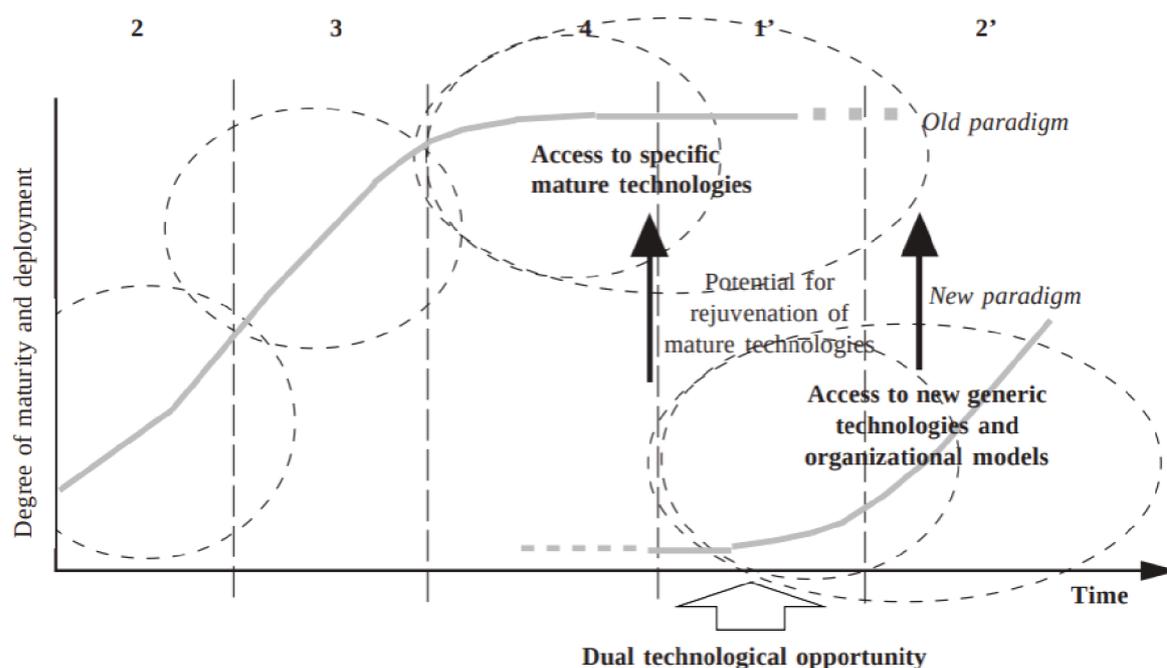
*To help recognize the dynamic and changing nature of capitalism in order to avoid extrapolating any particular period – be it good or bad – as ‘the end of history’ or as the final crisis of capitalism or as the arrival of unstoppable progress or as any ‘new’ and permanent nature of the system, from then on. [...] To help see ahead to the next phase of the sequence, in order to design timely actions to make the best of the impending opportunities* (PEREZ, 2002, p. 7).

Novas oportunidades de desenvolvimento surgem e se modificam com as sucessivas revoluções tecnológicas. A transição entre paradigmas tecno-econômicos representa um período no qual se torna possível uma reestruturação da posição relativa dos países, em que: por um lado, abrem-se possibilidades para que países tomem a liderança (*forging ahead*) ou se emparelhem (*catching up*) com os países avançados, na trajetória do desenvolvimento; por outro, esse período é acompanhado da possibilidade de que países que não se engajarem na dinâmica da revolução emergente acabem ficando para trás (*falling behind*) (PEREZ, 2002). Engajar-se na nova dinâmica pode permitir que países em desenvolvimento reduzam o hiato tecnológico e econômico com relação aos países desenvolvidos, ao mesmo tempo em que permite que países já desenvolvidos permaneçam na liderança e não fiquem para trás.

Mais precisamente, ao longo do período de transição entre paradigmas, enquanto as tecnologias maduras e emergentes coexistem, ocorre a abertura de duas oportunidades

tecnológicas simultâneas, nas quais as barreiras à entrada com as quais os países atrasados se defrontam são menores e, por isso, superáveis: uma no acesso a tecnologias maduras específicas, relacionadas ao paradigma antigo; e outra no acesso a novas tecnologias genéricas e novos modelos organizacionais, relacionados ao novo paradigma, conforme retratado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Janelas de oportunidades duais em momentos de transição entre paradigmas



Fonte: Perez (2001).

A primeira oportunidade está relacionada ao fato de que, devido a alta rotinização dos processos de produção, os requisitos de *know-how*, experiência administrativa e qualificação da força de trabalho são baixos; por outro lado, a entrada nessa fase implica significativos investimentos em unidades produtivas e aquisição de tecnologia, o que constitui um importante obstáculo para os países em desenvolvimento (PEREZ, 2001). Essa é uma estratégia relativamente mais segura. Contudo, essa segurança tem duração comprometida pela emergência de uma nova tecnologia, superior e substituta à tecnologia madura (PEREZ; SOETE, 1988). Perez (2001) argumenta que é muito improvável realizar, de maneira bem-sucedida, o *catch-up*, em termos de desenvolvimento, baseado em tecnologias maduras, já que essas tecnologias possuem reduzido potencial para geração de lucros, poucas oportunidades para aumento de produtividade e mercado estagnado. Escolher as tecnologias maduras como ponto de entrada para o processo de desenvolvimento implica claro risco de ficar preso a um padrão de desenvolvimento de baixos salários e baixo crescimento (PEREZ; SOETE, 1988). Nesse sentido, podem possibilitar crescimento econômico por algum tempo, porém suas oportunidades de inovação estão, em grande medida, esgotadas e, por isso, apresentam baixo dinamismo.

A segunda oportunidade, por sua vez, está relacionada a fatores como: a produção não é capital intensivo; os requisitos de *know-how* e experiência são baixos; o conhecimento científico tende a estar em domínio público (e.g. nas universidades); e muitas das habilidades relacionadas às novas tecnologias precisam, ainda, ser elaboradas na prática (PEREZ; SOETE, 1988; PEREZ, 2001). As vantagens de entrar cedo em uma nova indústria incluem menores barreiras de direitos de propriedade intelectual e a ausência de líderes de mercado estabelecidos (LEE; MATHEWS, 2015). A teoria dos retornos crescentes também chama atenção para o *timing* no fomento das iniciativas de pesquisa em novas indústrias, argumentando que faz pouco sentido a entrada em mercado próximo do *lock-in*, no qual há poucas chances de sucesso (ARTHUR, 1990), devendo-se agir e buscar por soluções antes que escolhas tecnológicas fiquem aprisionadas em determinadas trajetórias.

Enquanto, nas fases iniciais de uma nova revolução tecnológica, a apropriabilidade da inovação é menor e o conhecimento científico está publicamente acessível, com o desenvolver do paradigma essas condições mudam e o conhecimento e as habilidades gerados ganham cada vez mais caráter privado e não são comercializados entre concorrentes (PEREZ; SOETE, 1988), significando que a entrada de novos participantes no mercado é, progressivamente, dificultada. O tempo é uma variável importante, e sua irreversibilidade implica que países que não participarem, ativamente, nos estágios iniciais de uma revolução tecnológica, poderão ficar excluídos dos estágios de rápido crescimento. Para que seja determinante para o desenvolvimento, a entrada na dinâmica da nova revolução tecnológica deve ocorrer no momento inicial – ou, no mínimo, o mais cedo possível.

Não obstante, argumenta-se, ainda, que essa oportunidade proporciona maiores benefícios – e.g. alto potencial de lucro, amplo espaço para crescimento do mercado e da produtividade e, até mesmo, investimentos em P&D menores do que os do inovador original – através de tecnologias genéricas e modelos organizacionais, que podem ser aplicados na revitalização de indústrias maduras (PEREZ, 2001). Quando nessa dissertação se fala em “janelas de oportunidade” para o desenvolvimento abertas por mudanças de paradigmas, é a essa oportunidade que se refere: “*A paradigm shift opens the necessary windows of opportunity for forging ahead and catching up, while the front-runners are also learning*” (PEREZ, 2002, p. 21). Contudo, a entrada nos estágios iniciais de uma revolução é envolta de uma elevada incerteza, e não há garantias de sucesso ou sobrevivência; pelo contrário, essa estratégia requer posteriores fluxos de investimentos e esforços tecnológicos orientados à geração de conhecimentos científicos, à medida que os concorrentes também avançam nas novas trajetórias (PEREZ; SOETE, 1988).

As revoluções tecnológicas, envolvendo descontinuidades e mudanças drásticas na direção do progresso tecnológico, se tornam janelas de oportunidade temporárias, através das quais os países em desenvolvimento podem “saltar”, de maneira a promover a revitalização da maior parte das indústrias, ao custo de abandonar o “senso comum” com relação às melhores práticas (PEREZ, 2001). Dentre as mudanças drásticas requeridas

pelas revoluções, têm-se as mudanças nos padrões de investimento, nos modelos organizacionais, nos mapas mentais dos agentes e nas instituições que regulam os processos sociais e econômicos; e mais ainda, podem envolver progresso em direções totalmente novas, isto é: o aprendizado do novo pode requerer o desaprendizado do velho; a acumulação pode requerer desacumulação; a capacidade instalada pode precisar vir a ser desinstalada; e o crescimento em determinados caminhos pode levar a becos sem saída (PEREZ, 2002).

Para os “recém-chegados” (*newcomers*), entretanto, essas mudanças podem representar certa vantagem, que pode, ainda, ser reforçada por iniciativas realizadas em tempo: países que não tenham tido sucesso com o paradigma anterior podem redirecionar seus esforços de aprendizado às novas tecnologias; enquanto os países líderes precisam, antes, “desaprender” o velho para, então, adotar o novo (PEREZ, 2001). Nesse sentido, existem razões para se esperar que uma nova tecnologia se difunda mais lentamente em lugares onde há pesados investimentos em tecnologias maduras, elevada experiência em fazer as coisas “do jeito antigo” e contínuos esforços de pesquisa direcionados às melhorias dessas tecnologias (aumentando a sua vida econômica e retardando a adoção do novo) (PEREZ; SOETE, 1988). O acúmulo de grandes vantagens em tecnologias antigas e suplantadas implica crescentes custos de se desprender das experiências e externalidades do tipo “errado”, e explica: “*why these periods of paradigm change have historically allowed some countries to catch up and even surpass the previous leaders* (PEREZ; SOETE, 1988, p. 477). Para os países em desenvolvimento, portanto, existe a vantagem de não estarem significativamente *locked-in* em uma tecnologia existente, de produtividade alta e lucratividade certa, mas que se opõe ao novo (LEE; MATHEWS, 2015).

O rápido crescimento, necessário para quebrar o círculo vicioso da condição de subdesenvolvimento, deve estar baseado no dinamismo de novas tecnologias inter-relacionadas, na capacidade de realizar sucessivas melhorias num conjunto grande de tecnologias, e na geração de externalidades para um conjunto ainda maior de atividades relacionadas: “*So early entry into new technology systems is the crucial ingredient for the process of catching up*” (PEREZ; SOETE, 1988, p. 477). O aproveitamento das oportunidades de realizar o *catching up* tecnológico, entretanto, depende de diversos custos de entrada:

*Locational and infrastructural advantages do not fall from heaven, nor does a particular country's endowment in scientific and technical personnel and skills. They result from the previous history of development, plus natural resources, and social, cultural and political factors. And, depending on the nature of the new paradigm, these can be excellent, very good, bad or hopelessly inadequate in any particular country. Furthermore, taking advantage of new opportunities and favourable conditions requires the capacity to recognise them, the competence and imagination to design an adequate strategy, and the social condition and political will to carry it through. [...] And this demands a complete reassessment of each country's conditions in the light of the new opportunities* (PEREZ; SOETE, 1988, p. 477–478).

Enfim, toda essa discussão sobre as revoluções tecnológicas e as sucessivas janelas de oportunidades nos trazem para a questão da política de inovação, que será tratada

adiante, no Capítulo 3.

## 2.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS: DESAFIOS E OPORTUNIDADES

### 2.3.1 *Carbon lock-in*

Conforme abordado na primeira seção deste capítulo, o avanço tecnológico não é aleatório, mas segue por trajetórias tecnológicas, avançando 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 no qual se verificam retornos crescentes, *path dependence* e irreversibilidade do progresso tecnológico. 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.

Um importante exemplo desse efeito pode ser visto 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, apesar de ter sido considerado “*the least promising option, being the most noxious, noisy, complicated and dangerous alternative*” (UNRUH, 2000, p. 841). Uma vez estabelecidos, 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 *locking-in* o motor à combustão interna como principal fonte de propulsão (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 de “*lock-in* tecnológico”. 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.

Retomando o exemplo dos padrões de propulsão dos automóveis, observa-se que, mais de um século atrás, os automóveis elétricos eram tão comuns quanto os movidos a combustíveis fósseis. Contudo, os processo 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 – praticamente inexistente no

início do século XX – 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. Entretanto, depois de um século de progresso tecnológico nessa trajetória, o padrão de automóvel com motor de combustão interna – baseada em combustíveis fósseis – possui um quase monopólio do mercado e uma infraestrutura associada incomparável. Assim, 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.

Nesse sentido, pode-se argumentar que os fenômenos de retornos crescentes conduzindo a um estado de *lock-in* não se aplicam somente às tecnologias individuais, mas também a grandes sistemas tecnológicos, e.g. sistema de geração de eletricidade e de transporte (FOXON, 2002). Quando uma trajetória tecnológica é bastante poderosa, como os sistemas energéticos baseados em combustíveis fósseis (UNRUH, 2000), a transição para trajetórias alternativas é ainda mais 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 de “*lock-in* institucional” (SETO *et al.*, 2016). Unruh (2000) cunha, então, o termo “complexo tecno-institucional” (*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. Poderosos atores políticos, sociais e econômicos atuam, deliberada e coordenadamente, de forma a reforçar as trajetórias tecnológicas estabelecidas que favorecem seus interesses próprios, através de regras, normas e restrições (SETO *et al.*, 2016), buscando bloquear a difusão de novas tecnologias através de sua influência sobre a estrutura institucional e política.

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: ele representa dezenas de trilhões de US\$ 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, no qual os fatores institucionais e tecnológicos se reforçam mutuamente (UNRUH, 2000; UNRUH, 2002; FOXON, 2002). Essa 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.

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 (UNRUH, 2000). Entretanto, apesar de o *carbon lock-in* restringir a expansão de mercado de tecnologias alternativas, entende-se que ele apenas atrasa o que é entendido como uma transição inevitável (UNRUH; CARRILLO-HERMOSILLA, 2006).

Apesar do fato de autores, como Unruh (2000), Unruh (2002), Foxon (2002), Seto *et al.* (2016), não fazerem menção direta ao conceito de paradigma tecno-econômico, ainda assim verificam-se importantes contribuições para entender os fatores institucionais subjacentes ao paradigma tecno-econômico do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa, bem como das mudanças necessárias – tecno-econômicas e institucionais – para estabelecer um paradigma baseado nas energias de fontes renováveis:

*I take carbon lock-in as a central feature of the oil-based fourth techno-economic paradigm and its extension into the fifth paradigm based on IT/ICT, and the breaking of carbon lock-in via creative destruction to be the key challenge for the emergence of a new era based on renewable energies (MATHEWS, 2013a, p. 11).*

Nesse sentido, verifica-se que uma transição para uma economia verde efetiva demanda também uma mudança no paradigma tecno-econômico, dado que as energias renováveis não são completamente baseadas nos princípios organizacionais, ainda dominantes, do paradigma do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa, em termos de produção e consumo de energia – e.g. produção descentralizada de energia solar *versus* produção centralizada das usinas termelétricas baseadas petróleo e carvão.

Por outro lado, apesar do paradigma tecno-econômico atual (TIC) ter representado uma ruptura com relação ao paradigma anterior, em termos de intensividade energética e de materiais do modo de produção em massa, os insumos-chave do quarto paradigma – petróleo e derivados – continuam, ainda, sendo as principais fontes de combustível. Mais do que isso, na produção de eletricidade, o modelo organizacional predominante atualmente remonta ao terceiro paradigma tecno-econômico, no qual o baixo custo do aço para a produção de grandes equipamentos propiciou o estabelecimento de redes altamente centralizadas, reforçado, posteriormente, nessa direção, pela produção em massa e pelo

baixo custo do petróleo, características do quarto paradigma, que fecharam o espaço para outras fontes de energia (PEREZ, 1985). 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:

*Even in the introduction of solar technology, experimental stations have covered acres of land with solar collectors for central redistribution. This rather awkward form of application has been used in spite of the widespread agreement that it is more natural for a technology that collects an all-pervasive source of energy to install the generating equipment at the points of use (PEREZ, 1985, p. 28).*

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, ou seja, onde não ocorreu completa instalação das indústrias intensivas em carbono, podendo-se argumentar que esta é uma situação característica dos países em desenvolvimento. 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 de argumentação, Mathews e Reinert (2014) citam o Brasil, juntamente com a China e a Índia, como países onde se espera que o *carbon lock-in* seja menos restritivo e que, por esse motivo, pode-se esperar que esses países tenham maior sucesso na revolução tecnológica relacionada com as energias renováveis. Esses argumentos vão ao encontro dos conceitos de revolução tecnológica e paradigma tecno-econômico: novas tecnologias permitem o *leap-frogging*, “pulando” etapas tecnológicas, em alguns países que não carregam a inércia da estrutura industrial e institucional do paradigma anterior, permitindo que um grande surto de desenvolvimento reestruture as posições relativas dos países (PEREZ, 1985). Embora essa hipótese ofereça uma oportunidade atrativa para políticas, é incerto se os países em desenvolvimento conseguirão explorar, efetivamente, essas vantagens.

### 2.3.2 Janelas de oportunidades

Perez (2013a) argumenta que é importante antecipar as mudanças e identificar tendências promissoras, ainda que atualmente fracas; e, assim, é fundamental estudá-las logo que surjam. Ainda segundo Perez (2013a), a economia e o meio ambiente necessitam de inovações verdes, pois, além do potencial tecnológico, existem, também, inúmeras oportunidades para melhorar a qualidade de vida da camada mais pobre da sociedade de maneira “amigável” ao meio ambiente, inclusive através de inovações relacionadas às

energias renováveis<sup>4</sup>. Ademais, existe um enorme potencial para criação de riqueza no setor de energias renováveis e outros setores relacionados (PEREZ, 2013b).

Além disso, conforme argumentam Mazzucato e Perez (2015), o crescimento verde, dentro do qual se inserem as energias renováveis, pode se tornar a próxima grande oportunidade tecnológica e de mercado. Para Busch *et al.* (2018), como um investimento em infraestrutura, as tecnologias relacionadas às energias renováveis constituem oportunidades para o crescimento e possuem alto potencial gerador de benefícios econômicos e sociais, além de auxiliarem na mitigação da mudança climática. Um argumento similar é apresentado por Mathews e Reinert (2014): como o setor das energias renováveis envolve mudança tecnológica, manufatura, curva de aprendizado e retornos crescentes, essas fontes podem ser vistas como uma escolha estratégica de desenvolvimento, enquanto a proteção ambiental e a segurança energética são cobenefícios desejáveis de seu avanço. No caso brasileiro:

*[...] any attempt to address global environmental challenges, and climate change in particular, will require Brazil to play a leading role. This challenge is also an opportunity for Brazil. The strategic exploitation of biomes and natural resources could be used as a springboard for smart (innovation-led), inclusive, and sustainable development (MAZZUCATO; PENNA, 2016, p. 73).*

A estrutura analítica das revoluções tecnológicas, dos paradigmas tecno-econômicos e dos grandes surtos de desenvolvimento mostra-se útil para avaliar esses casos. Cada revolução é constituída de um importante insumo-chave. Frequentemente, surge uma nova fonte de energia (e.g. petróleo ou carvão) ou um novo material (e.g. plásticos ou aço), como novas tecnologias, que redefinem as indústrias e infraestruturas, constituindo fatores que exercem seu poder transformador através da sua combinação com um paradigma tecno-econômico adequado. Cada paradigma é baseado em conjuntos inter-relacionados de inovações tecnológicas, organizacionais e institucionais, que guiam grandes surtos de desenvolvimento – significativos aumentos de produtividade, mudanças estruturais na produção e consumo, crescimento econômico de longo-prazo –, bem como importantes impactos políticos e culturais. Ressalta-se, nesse sentido, o papel das tecnologias energéticas nos grandes surtos de desenvolvimento do passado. Enquanto os quatro primeiros surtos foram marcados pela exploração de novas fontes de energia – força hidráulica, no primeiro; energia a vapor, baseada em carvão, no segundo; eletricidade, no terceiro; e petróleo e derivados, no quarto (PEREZ, 2002) –, isso não ocorreu no paradigma das TIC, ao menos não em sua fase de instalação.

Uma explicação possível para isso é que o desenvolvimento recente das energias renováveis foi possibilitado pela implementação das TIC. Nessa linha de argumentação, a implementação de uma matriz energética baseada em fontes renováveis pode ser vista

<sup>4</sup> Por exemplo, segundo dados do Censo Demográfico do IBGE (2010), há no Brasil 728.512 domicílios que não possuem energia elétrica de nenhuma fonte, concentrados na região Nordeste (46,5%) e Norte (34,5%).

como um surto secundário do quinto paradigma. Do ciclo apresentado na Figura 2.3, isso significa que nos encontramos, atualmente, no *turning point* do quinto grande surto de desenvolvimento, e que sua implementação completa só será obtida quando o potencial das TIC for combinado com o crescimento verde como direção para profundas inovações, transformando a produção e os estilos de vida e dando início a uma “era de ouro”, inevitavelmente global e necessariamente sustentável. Para tanto, tomando a história como guia, a atuação do Estado e as políticas públicas são cruciais, fazendo-se necessária uma reestruturação institucional, através do estabelecimento de um marco regulatório estritamente ambiental, nos níveis nacional e internacional, e de incentivos claros na direção verde, bem como de investimento em pesquisa pública e atuação direta e “empreendedora” do Estado (“*tilting the playing field*”), criando mercados e sinergias no âmbito das tecnologias verdes, que devem ser implementadas nas próximas décadas, especialmente nas inovações de risco mais elevado (PEREZ, 2013b; PEREZ, 2016; PEREZ, 2019).

Outra explicação pode ser obtida em Mathews (2013a), que utiliza o conceito de paradigma tecno-econômico para argumentar que um emergente sexto paradigma, baseado em energias renováveis, está em sua fase de gestação – ou nos estágios iniciais de instalação:

*The current surge in renewable energy and cleantech investments and capacity additions is real and is having real sociotechno-economic effects – particularly in China where its adoption is most intense. It is the harbinger of a sixth TEP, with REs as driving factor, where we see the new RE-driven TEP emerging from its gestation phase and entering the installation phase, where finance capital is more daring than productive capital (MATHEWS, 2013a, p. 19).*

A periodização dos sucessivos paradigmas tecno-econômicos nos coloca num momento de declínio do quinto paradigma, no qual os investimentos em TIC e nas indústrias de conhecimento, embora continuem crescendo, não se espera que conduzam o mundo para novos níveis de prosperidade; novos insumos-chave são necessários para esse fim (MATHEWS, 2018). O argumento central de Mathews (2013a) é de que o complexo tecnológico das energias renováveis – capacitado pelas TIC (MATHEWS, 2018) – constitui um conjunto de insumos-chave de um sexto paradigma tecno-econômico. Partindo dessa ideia, portanto, as energias renováveis podem se tornar um importante componente de geração de riqueza, num próximo grande surto de desenvolvimento.

Com relação às características de um insumo-chave (FREEMAN; PEREZ, 1988), argumenta-se que as energias renováveis satisfazem os três critérios estabelecidos. Em primeiro lugar, pode-se argumentar que, pela própria natureza “renovável”, a oferta desses tipos de fonte de energia, em especial eólica e solar, é virtualmente ilimitada (MATHEWS, 2018).

Em segundo lugar, apesar de os custos relativos não serem claramente menores em diversas fontes de energias renováveis, custos relativos rapidamente declinantes, derivados da curva de aprendizado, podem ser verificados nos casos da energia eólica e, sobretudo, energia solar (MATHEWS, 2013a; MATHEWS, 2013b). Por outro lado, os custos rela-

cionados aos combustíveis fósseis e à energia nuclear estão aumentando, tendência que se espera se manter, à medida que os desafios de garantir a oferta aumentam, devido ao estoque limitado dessas fontes, e à intensificação da demanda por energia (MATHEWS, 2013a). Entende-se que os preços podem influenciar, em grande medida, a escolha entre diferentes fontes de energia, reforçando a importância dos custos relativos entre elas. Historicamente, muitas das fontes de energia renováveis possuem custos relativos não competitivos, especialmente por não terem se beneficiado dos retornos crescentes, como suas concorrentes sujas (FOXON, 2002) e, conseqüentemente, muitas dessas tecnologias podem estar longe de atingir a maturidade comercial para competir com as alternativas estabelecidas (LEE; MATHEWS, 2015). Contudo, no que concerne aos custos relativos na geração de eletricidade, verifica-se forte tendência de queda na última década, sobretudo entre a energia solar, tanto fotovoltaica quanto heliotérmica (IRENA, 2020c).

Atualmente, as energias geradas a partir de fontes solar fotovoltaica e eólica *onshore* (turbinas instaladas em terra) se encontram na parte inferior da faixa de custo dos combustíveis fósseis, permitindo que essas tecnologias concorram frente a frente com os combustíveis fósseis, mesmo na ausência de apoios financeiros (IRENA, 2020c). Nesse quesito de competitividade, pode-se dizer que essas fontes atingiram o *grid parity* – ponto em que seu custo nivelado de energia elétrica (LCOE<sup>5</sup>) é igual ou menor que o custo dos combustíveis fósseis. Esse ponto, segundo Mathews (2013a), pode marcar o fim da fase de gestação e o início da fase de instalação, na qual se pode antecipar que uma bolha especulativa conduza um período de investimento industrial, sustentado em energia renovável e demais tecnologias limpas. Espera-se, assim, que as sucessivas quedas continuem, no curto prazo e até 2030 e além, impulsionadas por melhorias contínuas na tecnologia, por custos de fabricação reduzidos, maiores economias de escala, concorrência nas cadeias de suprimentos e pressões competitivas (IRENA, 2020c).

Em terceiro lugar, a aplicabilidade abrangente e o potencial claro na utilização das tecnologias das energias renováveis podem ser observados através do ritmo avançado da geração de oportunidades de negócios, tanto em tecnologias para a produção de energia de fontes renováveis (e.g. turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos) e toda a cadeia de fornecedores envolvidos, quanto em novas áreas, como transmissão de energia (e.g. *smart-grid*<sup>6</sup>), transporte e infraestrutura associada (e.g. veículos elétricos e sistemas de recarga), edifícios e cidades verdes etc. (MATHEWS, 2013a; MATHEWS, 2013b). O desenvolvimento de infraestrutura específica para as energias renováveis criam oportunidades, empreendedoras e financeiras, fazendo parte de estratégias de “crescimento verde” (MATHEWS, 2013a). As energias renováveis, portanto, têm potencial de serem partes

<sup>5</sup> O LCOE de uma determinada tecnologia é a razão entre os custos e a geração de eletricidade, ao longo de toda a vida útil do sistema, descontados em um ano comum usando uma taxa de desconto que reflete o custo médio do capital, e que excluem qualquer suporte financeiro.

<sup>6</sup> Definida de forma abrangente, *smart-grid* é a aplicação de TICs para aumentar a eficiência e efetividade da geração, transmissão, distribuição e uso de eletricidade.

importantes de um novo grande surto de crescimento, sendo capazes de gerar benefícios econômicos, como verificado em surtos passados, tendo a inovação como principal motor da dinâmica e do desenvolvimento econômicos (BUSCH *et al.*, 2018).

Por conta da queda nos custos, associada com a curva de experiência na manufatura, os insumos-chave da emergente revolução tecnológica podem ter efeitos generalizados, levando a energia elétrica renovável para mercados cada vez maiores e aumentando a segurança energética (MATHEWS, 2018). Mathews (2018) identifica como *motive branches* as atividades envolvidas com a produção de dispositivos para geração de energia renovável – e.g. turbinas eólicas e módulos solares fotovoltaicos –, dispositivos de armazenamento de energia – e.g. baterias de íon-lítio – e dispositivos de rede elétrica – e.g. inversores –; por sua vez, os *carrier branches* identificados incluem os sistemas de veículos elétricos, também sujeitos à curva de experiência característica das atividades manufatureiras.

A transição não é somente a substituição de um produto por outro – e.g. energia elétrica gerada pelo carvão por energia elétrica eólica e solar. Trata-se, de fato, da transição de um sistema baseado em combustíveis fósseis por outro baseado em energia renovável, sendo que, como uma transição entre paradigmas tecno-econômicos, deve-se levar em conta não apenas os preços, mas também as tecnologias, a infraestrutura, o financiamento, as instituições, os modelos organizacionais e as políticas públicas. Os efeitos da destruição criadora da transição energética renovável já podem ser vistos nas indústrias estabelecidas – indústria do carvão, petróleo e gás natural, bem como na indústria automobilística, por conta de empresas como a *Tesla* (MATHEWS, 2018).

A contínua queda no custo das energias solar fotovoltaica e eólica *onshore*, complementada por declínios no custo de tecnologias de armazenamento de bateria, melhorias nas operações de distribuição e um conjunto emergente de tecnologias de eletrificação nos usos finais, pode fazer com que a geração de eletricidade renovável de baixo custo sustente uma transformação do setor de energia até 2050, descarbonizando o setor elétrico ao mesmo tempo em que aumenta a eletrificação (IRENA, 2019b). Combinado com o desenvolvimento das energias renováveis, a eletrificação significa que o impacto das políticas em energias renováveis pode ser sentido ao longo de um grande segmento da economia. A porcentagem de eletrificação no total do consumo de energia final foi, em 2018, de apenas 19,4% (IEA, 2020a), o que significa haver uma grande margem potencial para expansão.

Os princípios organizacionais de um emergente sexto paradigma tecno-econômico devem envolver: paradigma energético dominante baseado em energias renováveis, a partir de múltiplas fontes; intensidade energética reduzida e eficiência aprimorada (energética e de recursos); aplicação de TI em tecnologia de distribuição de energia elétrica – e.g. *smart-grids* –, que são desenhados para acomodar a maior proporção de fontes renováveis na geração de energia e dar maior resiliência às redes; modelo de geração de energia descentralizada, possibilitado por aplicações como *smart-grids*, que podem diminuir o poder dos grandes oligopólios; comércio internacional competitivo de energia elétrica

renovável; e financiamento ecologicamente direcionado (MATHEWS, 2013a; MATHEWS, 2013b).

De todo modo, o emergente sexto paradigma tecno-econômico não conflita com o quinto, das TIC, sendo visto como uma continuação e realização deste. Contudo, está em fundamental conflito com o ainda estabelecido e obstrutivo quarto paradigma, baseado em combustíveis fósseis e na geração e distribuição centralizada de energia. É este último, ainda bastante estabelecido, que funciona como obstáculo para o estabelecimento das energias renováveis. Deve-se ressaltar essa qualificação como importante, pois: “*reinforces the case that the emergent 6th TEP may be recognized in the ‘secondary surge’ at the turn of the 5th TEP [...] and therefore as an extension and continuation of the 5th TEP, not as its opponent*” (MATHEWS, 2013a, p. 19). O interessante nisso é que as implicações políticas são, essencialmente, as mesmas, tanto na perspectiva de uma mudança para um sexto paradigma, quanto na perspectiva de um surto secundário no *turning point* do quinto paradigma (MATHEWS, 2013a). Argumenta-se, nesta dissertação, que ambas as perspectivas envolvem a direção do processo de inovação na direção verde e demandam políticas de inovação *mission-oriented*.

Para a argumentação sobre janelas de oportunidade, as implicações são também similares. Por um lado, ao colocar as energias renováveis como insumo-chave de um emergente sexto paradigma, possibilita-se a aplicação direta da argumentação de Perez e Soete (1988). Por outro, ao colocar as energias renováveis como um dos componentes-chave da implementação completa do quinto paradigma na direção verde, a própria Perez (2014, p. 16) afirma: “*The direct leap to [...] alternative energies [...] are instances of technological leapfrogging*” em países em desenvolvimento. Perez (2016, p. 201) adiciona ainda que “[...] *the greatest window of opportunity of the present day is the possibility of overcoming the contextual legacy of the previous paradigm; in this case, the environmental degradation and resource scarcity brought about by the age of oil and mass production*”. Perez (2014, p. 17) utiliza o termo “*paradigm shift*” para se referir a esse fenômeno, e afirma que, ao passo que os países desenvolvidos precisam renovar e abandonar velhos hábitos, os países em desenvolvimento se defrontam com a opção de copiar o século XX ou moverem-se diretamente para o século XXI. Desse modo, pode-se entender que esse fenômeno representa uma janela de oportunidade para o *catching up* e *forging ahead*, dado que os países avançados também estão aprendendo, dando possibilidade a que alguns países se emparelhem a líderes anteriores, e até mesmo os superem.

Nesse mesmo sentido, Schot e Steinmueller (2018) argumentam que tanto o Sul Global quanto o Norte Global estão em posição para experimentar e contribuir para a transição sustentável: não se deve supor, com isso, que as inovações transformadoras surgirão, necessariamente, dos países desenvolvidos, como é tradicional se fazer, nem que o papel dos países em desenvolvimento será o de absorver, passivamente, as tecnologias oriundas dos países avançados. Entretanto, ao chamar a atenção para a importância da

colaboração tecnológica entre Norte-Sul no desenvolvimento e implantação de soluções, Mowery *et al.* (2010) citam China e Índia como importantes parceiros, mas não o Brasil. A liderança da China, em investimentos, capacidade instalada, aumento de capacidade, e empresas no *top 10* – especialmente solar fotovoltaica, eólica e *smart-grid* – pode ser vista como um indicativo adicional de que uma mudança fundamental das características do paradigma tecno-econômico, nos sistemas energéticos globais, está ocorrendo (MATHEWS, 2013a). A China pode ser o primeiro país a quebrar o *carbon lock-in*, através da construção de uma indústria de energia renovável doméstica, promovida pela atuação empreendedora do Estado (MATHEWS, 2018).

Apesar da razoabilidade dessa argumentação “otimista”, existem obstáculos importantes, que dificultam o processo de evitar o *carbon lock-in* através do *leapfrogging* tecnológico. Segundo Unruh e Carrillo-Hermosilla (2006), tomando como base evidências de *leapfrogging* no setor de telecomunicações, os investimentos e a rápida adoção das tecnologias em países em desenvolvimento ocorrem somente após décadas de substanciais desenvolvimentos, refinamentos e comercialização em países líderes tecnológicos, que são, em geral, os já desenvolvidos.

Seguindo essa linha, os países em desenvolvimento dependem, fortemente, de empresas multinacionais e da transferência tecnológica, para construir sua infraestrutura energética e de transporte, isto é, não possuem capacidade para desenvolvimento tecnológico autônomo e permanecem tecnologicamente dependentes. Esses países estão, portanto, sujeitos à perpetuação do *carbon lock-in*, via: a) capacidades tecnológicas das empresas multinacionais, que são centradas no fornecimento de tecnologias padronizadas, baseadas em carbono; b) preferências das organizações financiadoras, especialmente a preferência por projetos com maiores taxas de retorno esperadas – em geral, projetos baseados em carbono – por parte de atores privados; e c) políticas de desenvolvimento do país receptor dos investimentos, que enviesam a escolha por sistemas energéticos baseados em carbono, por serem soluções baratas e comprovadas para lidar com a demanda por energia para uma industrialização rápida. O *carbon lock-in* pode ter, assim, a tendência de se tornar globalizado, no sentido de que os países em desenvolvimento poderiam acabar se tornando “cópias de carbono” dos países desenvolvidos (UNRUH; CARRILLO-HERMOSILLA, 2006).

## 2.4 SÍNTESE CONCLUSIVA

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos relacionados com a inovação na literatura neo-schumpeteriana, de forma a discutir questões relacionadas ao *lock-in* e às janelas de oportunidade em momentos de transição entre paradigmas. De maneira geral, buscou-se elaborar o argumento de que o chamado *carbon lock-in*, isto é, a forte dependência de sistemas energéticos baseados em combustíveis fósseis, é uma característica central do paradigma tecno-econômico do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa, que se perpetuou sobre o atual paradigma das Tecnologias de Informação e

Comunicação (TIC). A percepção de que o *carbon lock-in* pode ser relativamente menos restritivo em países em desenvolvimento, aliada com a ideia de que a transição entre paradigmas tecno-econômicos abre uma janela de oportunidade para realizar o *catching up* ou o *forging ahead*, coloca os países em desenvolvimento em posição favorável para aproveitar o grande surto de desenvolvimento que as energias renováveis têm potencial de gerar, dado que os países avançados também estão aprendendo.

As energias renováveis – aliadas às TIC – podem ser entendidas como um conjunto de insumos-chave de um emergente paradigma tecno-econômico, satisfazendo os critérios de custos relativos baixos e declinantes, oferta virtualmente ilimitada e aplicabilidade abrangente. Nessa perspectiva, podem-se alinhar os objetivos ambientais com os objetivos sociais e econômicos, além de objetivos de segurança energética para alimentar o motor do desenvolvimento. O aproveitamento dessa janela de oportunidade, entretanto, não é automático, ele depende de iniciativas e ações direcionadas do Estado, desde o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas com as fontes renováveis de energia até o desestabelecimento do *lock-in* das indústrias intensivas em carbono, isto é, políticas de ciência, tecnologia e inovação, direcionadas para a efetiva transição energética renovável.

### 3 TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E AS POLÍTICAS DE INOVAÇÃO

O *carbon lock-in*, conforme definido no Capítulo 2, impõe um grande desafio aos formuladores de políticas na mobilização de políticas de inovação que promovam as transformações desejadas pela sociedade. Tratar de políticas de inovação no setor de energias renováveis exige levar em conta os desafios de, por um lado, desestabelecer e superar o *carbon lock-in* e, por outro, implementar uma nova matriz energética, ambientalmente amigável e socialmente desejável. Isso, por sua vez, demanda políticas adequadas:

*Because the dynamics of lock-in work against transition and transformation, institutional break-out will depend on policies appropriate to the stage of the transition, from helping new knowledge and technologies develop, to helping infant industries grow in niche markets, to facilitating the emergence of larger markets, to promoting competitive pressures that reduce prices, to establishing regulations and tax policies on mature industries (SETO et al., 2016, p. 436).*

As políticas para transição energética renovável são, especialmente, importantes em países em desenvolvimento, podendo ser encaradas como uma potencial janela de oportunidade para economias atrasadas, como o Brasil. O aproveitamento dessas janelas, entretanto, não é automático. A endogeneização de uma janela de oportunidade é o processo por meio do qual os *latecomers*, deliberadamente, traduzem oportunidades (ou ameaças) globais previsíveis em um sistema de seleção, que privilegia certas trajetórias tecnológicas; exemplo disso é um país que toma a mudança climática global como justificativa para implementar medidas industriais fortes no setor de energias renováveis, a fim de se tornar líder nessas indústrias no futuro (YAP; TRUFFER, 2019). O aproveitamento dessa janela envolve a formação de uma indústria nova, com tecnologia e princípios organizacionais distintos do modelo de geração de energia atual. Insistir numa estratégia baseada num paradigma maduro pode, inclusive, reforçar os efeitos de *lock-in* frente às mudanças de paradigmas tecno-econômicos, minando a paradoxal vantagem do atraso tecnológico dos países em desenvolvimento. A perspectiva de janelas de oportunidades possui importantes implicações políticas:

*The formulation of successful strategies therefore calls for a careful evaluation of the conditions and accumulated capacities of the country, region, enterprise or network in question, in order to take advantage of the next window of opportunity (not the window which is already closing), while at the same time recognizing, adopting and adapting the potential and features of the relevant paradigm (PEREZ, 2001, p. 124).*

O que se segue a essa afirmação, é o argumento de Perez (2001) por uma reformulação das políticas de ciência e tecnologia – ou, como se denomina nesta dissertação, políticas de inovação –, onde o componente tecnológico passa a ser visto como central para as políticas de desenvolvimento. De acordo com a hipótese de grandes surtos, num momento de transição, a estratégia de desenvolvimento deve estar voltada para o enfrentamento de desafios e aproveitamento de oportunidades atuais, e não do passado. Novas

áreas de conhecimento “*would have to be institutionally addressed and placed at the core, not at the side, of development thinking*” (PEREZ, 1985, p. 15). Entretanto, os países desenvolvidos podem ficar presos a políticas antiquadas, por conta da inércia criada pelos sucessos dessas políticas no passado; os países em desenvolvimento, por sua vez, podem, igualmente, perder as oportunidades abertas pela transição, por conta da inércia criada pelos fracassos do passado (PEREZ, 1985).

Em especial, argumenta-se que o debate “mercado *versus* Estado” não é adequado para lidar com o aproveitamento das janelas de oportunidade, e que é necessário um Estado “forte” para lidar com a magnitude e complexidade do processo: “*The central national State can exercise its leadership by inducing the convergent actions of the various social actors towards a commonly agreed general direction of change*” (PEREZ, 2001, p. 126). Ressalta-se, assim, o papel do Estado na criação e no aumento das vantagens relativas e na superação das desvantagens, através de uma reavaliação das possibilidades reais e da construção de políticas adequadas (PEREZ, 1985). Entende-se, nesta dissertação, que essa posição é, posteriormente, aprofundada e embasada pelos estudos relacionados às políticas de inovação *mission-oriented* e ao “Estado Empreendedor” (MAZZUCATO, 2014b).

Na teoria neo-schumpeteriana, portanto, rejeita-se a ideia de uma trajetória de desenvolvimento ótima, determinada por um mercado perfeito. Pelo contrário, entende-se que a escolha entre trajetórias é, necessariamente, normativa, e um determinado resultado econômico e social desejado pode ser atingido através da criação e formação de mercados (BUSCH *et al.*, 2018). A indústria verde – dentre as quais, as energias renováveis – ainda se encontra em seus estágios iniciais e é caracterizada por elevada incerteza tecnológica e de mercado, a qual afasta o capital privado e dificulta o desenvolvimento dessa indústria através, unicamente, de forças de mercado (MAZZUCATO, 2014b). A convergência e articulação de esforços, necessárias para conduzir a sinergias entre fornecedores e mercados, de maneira a aumentar a viabilidade econômica e a lucratividade das tecnologias verdes, podem ser induzidas por meio do estabelecimento de uma clara direção comum: as forças de mercado não são capazes de alcançar esse resultado, mas um Estado ativo é (PEREZ, 2013a). Ressalta-se, assim, o papel central do Estado na identificação de setores-chave, que permitam realizar a transição para um emergente paradigma tecno-econômico de caráter verde, isto é, baseado em energias renováveis, bem como na condução de políticas de inovação nessa direção. Se, por um lado, os esforços tecnológicos para a transição energética renovável envolvem maiores incertezas, tecnológicas e de mercado, por outro, têm potencial de permitir o *catch-up* e, até mesmo, o *forge ahead*, nos países em desenvolvimento.

Com base nessas implicações sobre as políticas de desenvolvimento, neste capítulo aborda-se a atuação do Estado através de políticas de inovação *mission-oriented* para promoção da transição energética, desafio imposto a todo e qualquer país, e que pode representar esforços e iniciativas para o aproveitamento das oportunidades em aberto, nos países em desenvolvimento. Na seção 3.1, são discutidas as principais justificativas

utilizadas para legitimar a condução de políticas de inovação, com ênfase nas políticas *mission-oriented* e no estabelecimento dos problemas ambientais como importantes missões, capazes de guiar os processos de busca por soluções e inovações na direção verde. Na seção 3.2, são abordados, teoricamente e em detalhes, cinco princípios essenciais para que as políticas de inovação *mission-oriented* sejam bem sucedidas, segundo a literatura da área. Na seção 3.3, discute-se o problema de como avaliar o impacto dinâmico na criação de mercados das políticas de inovação *mission-oriented*. E, na seção 3.4, apresenta-se uma síntese conclusiva do capítulo.

### 3.1 JUSTIFICATIVAS PARA POLÍTICAS DE INOVAÇÃO E A DIREÇÃO VERDE

A justificativa padrão para intervenção do Estado na economia, em especial nas atividades inovativas, é derivada das “falhas de mercado”. Nessa perspectiva, de maneira geral, o Estado não deve “direcionar” a economia ou tentar “escolher vencedores”, mas se concentrar em facilitar a iniciativa privada e otimizar a *performance* do mercado, maximizando a taxa de progresso (MAZZUCATO, 2014a). Essa perspectiva, entretanto, dá ênfase também às “falhas governamentais”, que se manifestam quando a atuação do Estado não consegue aumentar o nível de eficiência, mesmo em situações em que a falha de mercado é clara, o que cria um viés de inação e de manutenção do *status quo* (KATTEL *et al.*, 2018).

No contexto das inovações tecnológicas, uma importante falha de mercado decorre da característica de bem público de certos tipos de conhecimento científico. Essa característica faz com que os incentivos de mercado não sejam suficientes para que o setor privado produza o nível socialmente desejado de conhecimento científico, devido a problemas como o de *free-riding* (WEBER; ROHRACHER, 2012; SCHOT; STEINMUELLER, 2018). Nessa perspectiva, supõe-se que o conhecimento científico seja como a informação: genericamente aplicável, de fácil uso e reprodução (ARROW, 1962), isto é, é não exclusivo e não rival e, por isso, o investidor original não pode apropriar-se completamente do conhecimento gerado. Exemplos incluem mercados privados subfinanciando produtos com altos efeitos de *spillover* (e.g. pesquisa básica) ou projetos de infraestrutura socialmente desejáveis, que apresentam externalidades positivas; em particular, a P&D gera conhecimentos que não podem ser completamente apropriados pelo investidor, ou seja, o investidor não consegue internalizar os benefícios que compensariam os custos, conduzindo ao subinvestimento (MAZZUCATO, 2014a). Seguindo essa linha de argumentação, a justificativa para a atuação do Estado limita-se à provisão de descobertas científicas ou invenções, através do financiamento generoso de investimentos em pesquisa básica, enquanto a pesquisa aplicada, necessária para comercializar as descobertas científicas, isto é, para transformar as invenções em inovações, fica à cargo do setor privado (SCHOT; STEINMUELLER, 2018).

Outra falha de mercado nesse contexto é a assimetria de informação. A seleção

adversa de, potencialmente, bons tomadores de empréstimo, decorrente dessa falha, pode causar ineficiências, e.g. a insuficiência de financiamento para pequenas e médias empresas e para P&D e inovação, ambos arriscados e incertos. Nessas situações, o investimento público em pequenas e médias empresas e em inovação, por meio de empréstimos, *equities* ou subvenções, seria justificado para promover a diversificação, o crescimento e o desenvolvimento econômicos (MAZZUCATO, 2014a).

As externalidades negativas, outra falha de mercado, fazem, ainda, com que os preços de mercado sejam enviesados (MAZZUCATO, 2014b), e.g. os preços de mercado não refletem as externalidades ambientais. Isso significa que os preços de mercado das tecnologias sujas, em especial dos combustíveis fósseis, não refletem todos os custos sociais das emissões de gases estufa, implicando que os produtores e consumidores não recebem do mercado um incentivo baseado em custos, que os estimule a mudar para tecnologias verdes (KEMP; NEVER, 2017). Os preços incorretos implicam que a demanda privada por tecnologias verdes, geradas através de investimentos públicos, por exemplo, serão igualmente suprimidas. Isto é, políticas focadas apenas no lado da oferta podem não ser suficientes para que sejam alcançados os objetivos de frear ou reverter a mudança climática, sendo necessárias políticas que busquem corrigir essa falha de mercado, e.g. imposto de carbono e *cap and trade* (MOWERY *et al.*, 2010).

Com relação aos preços incorretos, entretanto, Mazzucato e Perez (2015, p. 15) argumentam que “*No amount of price signals would have created the Internet, just as today a carbon tax or an emissions market would be crucial but not sufficient to get clean tech going*”; e, similarmente, Mathews e Reinert (2014, p. 20) afirmam que “*We are doubtful that railroads were successful because of taxes imposed on canals, or that word processors triumphed because of taxes on typewriters.*” São os investimentos – inicialmente realizados pelo Estado e seguido, depois, pelos atores privados –, não os preços relativos, que guiam a transição entre paradigmas tecno-econômicos (MATHEWS, 2018).

No caso específico da mudança climática, medidas como o imposto de carbono criam um mercado mais favorável para tecnologias verdes, porém não tratam do *carbon lock-in* da indústria fóssil, nem do financiamento insuficiente para tecnologias que se encontram no “Vale da Morte” (BUSCH *et al.*, 2018), fase entre a invenção e a inovação, que impõe um grande desafio à sobrevivência de muitas tecnologias novas no mercado (EDLER; FAGERBERG, 2017). Kline e Rosenberg (1986) explicam que as melhorias subsequentes em uma inovação podem ser, em termos econômicos, muito mais importantes do que a invenção em sua forma original: drásticas mudanças incrementais nas tecnologias, ao longo da sua trajetória, transformam sua significância. Mowery *et al.* (2010) exemplificam o fenômeno comparando os *mainframes* de 1950 com os computadores modernos do século XXI; Fagerberg (2018a) ressalta que os primeiros módulos solares, datados de 1950, tinham custo relativo muito elevado nos estágios iniciais, enquanto atualmente constituem uma alternativa viável. Essa característica da inovação implica que, mesmo quando os preços

estão corretos, a adoção de tecnologias verdes pode ser dificultada em seus estágios iniciais. A precificação correta deve ser vista como complementar, mas não substituta – necessária, mas não suficiente –, para uma política de inovação mais abrangente (FAGERBERG, 2018a)<sup>1</sup>.

Criticando as graves limitações do modelo linear de inovação, implicada pela perspectiva de falhas de mercado, a abordagem de sistema de inovação reformulou o modelo de inovação como um processo interativo, dinâmico e sistêmico. Essas reformulações basearam-se em que: a) o conhecimento científico é entendido não mais como um bem público global, e reconhece-se que existem elementos que dificultam sua transferência, como os conhecimentos tácitos (LAM, 1998; LUNDVALL; JOHNSON, 2016) e os diferentes graus de apropriabilidade privada entre as tecnologias (DOSI, 1988); b) capacidades de absorção, que requerem habilidades prévias com pesquisa e aplicação de conhecimento relacionado, são necessárias para reconhecer, assimilar e aplicar comercialmente informações e conhecimento externos (COHEN; LEVINTHAL, 1990); e c) a mudança técnica é entendida como processo cumulativo e *path dependent* (DOSI, 1982; ARTHUR, 1989).

Em seu foco nacional, o conceito de sistema de inovação é utilizado para identificar diferenças entre países, nas configurações de organizações relacionadas com a geração e utilização do conhecimento científico. Os diferentes arranjos institucionais incluem os sistemas de pesquisa e treinamento universitário e P&D industrial, as instituições financeiras, as habilidades administrativas, a infraestrutura pública e as políticas monetárias, fiscais e comerciais nacionais (FOXON; PEARSON, 2008). Em particular, admite-se que algumas configurações de sistema nacional de inovação (SNI) podem ser mais efetivas do que outras, o que explica as diferenças em termos de desempenho ou competitividade entre os países (LUNDVALL, 2016). Essa perspectiva implica que alguns países podem sofrer de “falhas sistêmicas” – de infraestrutura, institucional, de interação e de capacidades (WEBER; ROHRACHER, 2012) –, justificando a atuação do setor público com vista a resolvê-las (SCHOT; STEINMUELLER, 2018).

Essa justificativa destaca a participação do Estado na construção de um SNI adequado para preservar ou aumentar o nível de competitividade das firmas nacionais e promover crescimento econômico, com políticas focadas mais nos processos de aprendizado interativo, de acumulação de capacidades de absorção e adaptação, e de cooperação entre os diversos atores do sistema (nacional, regional e setorial) e menos na pesquisa básica (SCHOT; STEINMUELLER, 2018). Apesar de fornecer um modelo de inovação mais rico do que o modelo linear, entende-se que essas implicações políticas são limitadas.

Na prática, não está claro se a atuação do Estado para consertar falhas de mercado ou falhas sistêmicas – nos dois casos, de caráter horizontal, no sentido que buscam objetivos genéricos de “mais inovação” e deixam a direção a cargo do mercado – conduzirá ao

<sup>1</sup> Entende-se as “políticas de inovação” de uma maneira ampla, incluindo também as políticas que não possuem esse rótulo mas que ainda assim influenciem o progresso tecnológico (FAGERBERG, 2018b).

desenvolvimento econômico e ao *catching up*; além disso, essas justificativas assumem que estimular a inovação é algo sempre positivo e não discutem o fato de que a inovação sempre implica escolha de uma direção (SCHOT; STEINMUELLER, 2018). Nesse sentido, Schot e Steinmueller (2018) argumentam que essas justificativas não abrangem a necessidade de se endereçar problemas sociais – e.g. desigualdade e pobreza – e ambientais – e.g. mudança climática –, dado que isso requer atenção para a direcionalidade do progresso tecnológico. Não incorporar a direcionalidade limita as discussões relacionadas com o tipo e a estrutura de organizações públicas que conduzem as políticas, e com a avaliação dessas políticas (MAZZUCATO, 2014a). Ainda que importantes *insights* possam ser derivados dessas perspectivas, elas se mostram inadequadas para proporcionar orientação para transições entre paradigmas. É fundamental converter esses “problemas” em “desafios” e “oportunidades” para políticas de inovação, de forma a promover, de fato, o progresso social.

Fagerberg (2018b) argumenta que, ao invés de enfatizar as falhas a serem corrigidas, se mude o foco para o que o Estado pode ativamente alcançar. Não que essas falhas não existam – ou que não sejam essenciais para as políticas públicas –, mas entende-se que a literatura tende a negligenciar a significativa importância do papel ativo e empreendedor do Estado na formação e criação de mercados e sistemas, e na promoção do crescimento liderado pela inovação (*innovation-led*) (MAZZUCATO, 2014a; MAZZUCATO, 2014b). Enfatiza-se, assim, a “direção” das inovações através de políticas que incluam explicitamente direções tecnológicas, e não apenas como reação passiva às falhas de mercado e de políticas generalistas, mas como escolha ativa de alcançar certos objetivos (MAZZUCATO, 2016): e.g. os programas públicos, realizados visando objetivos aplicados específicos, como foi o caso dos projetos estadunidenses Manhattan e Apollo (FORAY *et al.*, 2012). Essas e diversas outras experiências *mission-oriented* foram bem sucedidas não apenas em alcançar suas missões principais, mas também em gerar uma grande variedade de inovações radicais, que beneficiaram o crescimento econômico por décadas: “*Behind the investments that led to key ‘technological revolutions’ and ‘general-purpose technologies’ was the active hand of the state*” (MAZZUCATO, 2014a, p. 11).

A perspectiva das políticas *mission-oriented*, portanto, muda o foco para uma atuação do Estado através da criação e formação de mercados, em detrimento de apenas consertar suas falhas (MAZZUCATO, 2014b; MAZZUCATO, 2016). Essa perspectiva é construída sobre o trabalho de Polanyi (2001), segundo o qual os mercados são enraizados em instituições sociais e políticas, isto é, as políticas públicas atuam na própria criação dos mercados, tornando sem sentido a oposição entre Estado e mercado (MAZZUCATO, 2014a).

Há, inclusive, uma mudança no vocabulário: abandonam-se termos como “consertar”, “facilitar”, “gastar” e “regular”, que criam uma narrativa de um Estado inerte e passivo; e adota-se uma narrativa pela qual o Estado, ambiciosamente, procura direções

com alto risco para pesquisar e investir, ao invés de terceirizar e evitar incertezas. A razão para essa mudança é a percepção de que muitas das inovações radicais, que promoveram o dinamismo do sistema capitalista – e.g. ferrovias, a Internet, a nanotecnologia, todas as tecnologias-chave para o *iPhone* e, enfatiza-se, muitas tecnologias relacionadas com energias renováveis, como turbinas eólicas e células solares fotovoltaicas –, historicamente, tiveram investimentos empreendedores do Estado, em toda a cadeia de inovação (da pesquisa básica à aplicada), financiamento em seus estágios iniciais para firmas inovadoras e políticas de compras públicas, que permitiram ganhos de escala (MAZZUCATO, 2014b; KATTEL *et al.*, 2018). O argumento de Mazzucato (2014b) é o que de a mão visível do Estado promoveu inovações as quais, deixadas a cargo dos mecanismos mercado somente, não teriam ocorrido. Supera-se, dessa forma, a ideia de que a inovação e o dinamismo ocorrem apenas dentro das firmas privadas (MAZZUCATO, 2014a).

Essa é uma visão que coloca o Estado como agente empreendedor no sistema de inovação (MAZZUCATO, 2014b), isto é, como agente que toma decisões de assumir riscos intrínsecos à atividade inovativa e à criação de novos mercados. O Estado empreendedor, ao focar no desenvolvimento tecnológico na fronteira do conhecimento e em potenciais novos paradigmas – mais incerto, porém com maior efeito potencial –, difere-se do Estado desenvolvimentista, que busca o avanço tecnológico dentro de um paradigma já estabelecido no centro capitalista (EBNER, 2009). Entende-se que a visão do Estado empreendedor encontra-se em consonância com a ideia de aproveitar a janela de oportunidade aberta por um novo paradigma tecno-econômico, apresentada anteriormente, no Capítulo 2.

Os investimentos em inovação são apostas sobre o futuro, assim sendo muitas dessas resultam, inevitavelmente, em fracassos. Novas possibilidades ainda desconhecidas e não-testadas tornam necessário um grande esforço de experimentação para identificar direções e novas indústrias líderes; isso implica possibilidade de becos sem saída, má alocação e perda de boa parte dos investimentos (PEREZ, 2013b). E mais, ainda, essas são apostas que sofrem de uma incerteza fundamental irreduzível, de tipo *knightiano* (KNIGHT, 2012), significando que não se pode calcular, *a priori*, suas probabilidades de sucesso ou de fracasso (MAZZUCATO, 2013). Dosi (1988) distingue dois tipos de incerteza: a primeira é a noção de incerteza familiar na teoria econômica e está relacionada com a informação imperfeita sobre uma lista conhecida de resultados possíveis; na segunda, a própria lista de eventos possíveis é desconhecida. O processo inovativo, tanto em seu processo “normal” quanto no “extraordinário”, sofre do segundo tipo de incerteza. Entretanto, ressalta Mazzucato (2013), a inovação não resulta de pura sorte, pelo contrário: seu sucesso pode ser determinado pelo comprometimento estratégico de longo prazo.

Nas fases iniciais de uma tecnologia, essa incerteza fundamental com relação ao seu desenvolvimento e utilização em larga escala é bastante elevada, tendendo a afastar, até mesmo, o capital de risco privado (MAZZUCATO; PEREZ, 2015). No financiamento, em específico, o papel do Estado é atuar em áreas em que o próprio capital privado não atua,

fornecendo capital paciente e dando suporte à transição, de maneira consistente, ao longo de todo o processo: no desenvolvimento do conhecimento científico, na aplicação prática, na demonstração e na comercialização (MAZZUCATO; PENNA, 2015; MAZZUCATO; PEREZ, 2015). Essa é, em essência, uma justificativa *keynesiana*: “*The important thing for government is not to do things which individuals are doing already, and to do them a little better or a little worse; but to do those things which at present are not done at all*” (KEYNES, 2010, p. 291).

O investimento privado em inovação não depende de custos, mas da percepção de claras oportunidades tecnológicas e de mercado (MAZZUCATO, 2014a). Para Pavitt (1984), as oportunidades tecnológicas são um dos principais motores do investimento em inovação. Essas oportunidades estão, direta e fortemente, correlacionadas com investimentos públicos, em áreas de alta intensidade de capital e elevado risco; a promoção dessas oportunidades, portanto, constitui uma forte justificativa para que o Estado realize esse tipo de investimentos (MAZZUCATO, 2014a; MAZZUCATO; PEREZ, 2015). Na prática, a promoção dessas oportunidades envolve a realização, por parte do Estado, de P&D de alto risco e a formulação de um ambiente tributário, regulatório, de preços, de demanda etc., que favoreçam a viabilidade econômica e a lucratividade de novas tecnologias que colaborem para a superação de problemas comuns (MAZZUCATO; PEREZ, 2015). Desse ponto de vista, o Estado é entendido como um parceiro-chave para o setor privado: é, em geral, um parceiro que está disposto a assumir riscos, os quais as firmas privadas evitam; promove revoluções tecnológicas e cria mercados que não teriam ocorrido de outra forma e, no processo, contribuem para aumentar a audácia do setor privado (MAZZUCATO, 2014b).

Atualmente, quando a guerra ou a corrida espacial não servem mais como objetivos para políticas *mission-oriented*, essa abordagem toma novas formas. É crescente a percepção, por parte dos formuladores de políticas, de que os grandes problemas sociais – e.g. transição energética renovável – requerem inovações radicais e mudanças de trajetórias em múltiplos setores (KATTEL *et al.*, 2018). O endereçamento dos problemas ambientais, em específico, requer significativos esforços inovativos, na superação do *carbon lock-in* das indústrias fósseis e do *lock-out* das tecnologias verdes (FOXON, 2002). Para Lee e Mathews (2015), a inovação tecnológica é o caminho menos controverso para combater a insustentabilidade do atual paradigma, fortemente baseado em combustíveis fósseis, quando comparado com soluções eticamente complicadas, como redução do crescimento populacional e decrescimento econômico – este último, especialmente delicado nos países em desenvolvimento. A intervenção do Estado, através de políticas de inovação verdes, portanto, pode ser crucial na mobilização de redes, envolvendo institutos de pesquisa, universidades, agências governamentais, bancos de investimento e empresas privadas, para a promoção e a aceleração da mudança estrutural, necessária para realizar a transição para uma economia renovável e de baixo carbono.

O problema atual da mudança climática, entretanto, apresenta características distintas dos “antigos” projetos *mission-oriented*, e.g. Manhattan e Apollo (FORAY *et al.*, 2012). Por exemplo, os projetos Manhattan e Apollo foram realizados pelo governo estadunidense para atingir uma solução tecnológica específica, a qual tinha o próprio governo como único demandante e não dependia da adoção generalizada para seu sucesso; por outro lado, para lidar com o problema ambiental, diversas soluções tecnológicas heterogêneas devem ser desenvolvidas e implantadas generalizadamente, por todo o mundo (MOWERY *et al.*, 2010). Com esse entendimento, aponta-se para a necessidade de se definir missões em termos de problemas a serem resolvidos, em detrimento de políticas de promoção de soluções tecnológicas em específico; além de sugerir um maior foco em políticas “dolorosas” de demanda, do que apenas políticas focadas no desenvolvimento de soluções pelo lado da oferta (BUSCH *et al.*, 2018). As políticas do setor de tecnologia da informação<sup>2</sup>, nos EUA, podem representar modelos mais relevantes para guiar as políticas de combate à mudança climática (MOWERY *et al.*, 2010; MOWERY, 2011).

### 3.2 PRINCÍPIOS ESSENCIAIS DAS POLÍTICAS *MISSION-ORIENTED*

A justificativa teórica para políticas públicas de inovação, que têm como objetivo a promoção de inovações verdes, é forte. Sendo essas políticas uma importante função do Estado, o debate não deve ser focado em se elas devem ou não existir, mas sim em como conduzi-las de maneira melhor (RODRIK, 2014)<sup>3</sup>. O problema não é se o Estado deve ou não escolher uma direção; o que deve é aprender com as escolhas passadas e permitir que a direção escolhida seja ampla o suficiente para promover a experimentação, descoberta e aprendizado (MAZZUCATO, 2014a).

É bastante razoável argumentar que a inovação tecnológica pode desempenhar papel importante na transição energética renovável; o desafio é providenciar bons modelos de políticas públicas que, efetivamente, promovam inovações para esse propósito (MOWERY *et al.*, 2010; FAGERBERG, 2018a; FAGERBERG, 2018b). Nesse sentido, com base na literatura recente, foram elencados cinco princípios essenciais para guiar a condução de políticas de inovação *mission-oriented*.

#### 3.2.1 Definir uma missão a ser cumprida

Em primeiro lugar, destaca-se a necessidade de estabelecer um objetivo claro, de longo prazo, envolvendo um grande desafio a ser solucionado através de inovações radicais e de alto impacto. A definição de missões envolve a escolha estratégica da direção concreta em que se busca transformar a sociedade, através da identificação de grandes

<sup>2</sup> Semicondutores, *hardware* e *software* de computadores.

<sup>3</sup> Seguindo Fagerberg (2018b), entende-se aqui que a “política industrial verde” descrita por Rodrik (2014) pode ser denominada como política de inovação verde, sem subverter o sentido proposto pelo autor.

problemas sociais, que demandam o desenvolvimento de soluções tecnológicas em diversos setores (MAZZUCATO, 2018), de forma a fornecer direção para a inovação e afetar as decisões de investimento (KEMP; NEVER, 2017). A construção de uma missão deve ocorrer de maneira aberta, transparente e que esteja de acordo com as oportunidades que se encontram em aberto, de forma a funcionar como um mecanismo de coordenação entre os atores de diferentes níveis da sociedade (formuladores de políticas públicas de todos os níveis, firmas privadas, público em geral etc.) para proporcionar sinergia e evitar antagonismo, bem como de forma a evitar que seja vítima de, por exemplo, mudanças de governo (FAGERBERG, 2018b). Além disso, uma política de inovação *mission-oriented* deve ser estável ao longo do tempo, de forma a diminuir o impacto de fatores como a incerteza e a inconsistência nas políticas e na disponibilidade de financiamento (BUSCH *et al.*, 2018).

Cumprir “missões” requer relações dinâmicas entre os diferentes atores do sistema, públicos e privados, e criação de novas tecnologias e setores, o que implica que o Estado seja capaz de implementar a política de inovação através da coordenação dos interesses, por meio do poder de convocação e intermediação estatal e pelo uso de instrumentos direcionados de política (MAZZUCATO, 2018). Entretanto, a forma como se dão essas interações entre o Estado e a indústria importa, e é preciso evitar que interesses particulares determinem um mal direcionamento das intervenções (BUSCH *et al.*, 2018). Similarmente, Rodrik (2014) argumenta que a transparência e a prestação de contas são essenciais para evitar que interesses estabelecidos obstruam a emergência de inovadores mais produtivos. Para Kemp e Never (2017), a seleção das opções e dos instrumentos de apoio devem ser escolhidas com cuidado e, de preferência, com o auxílio de especialistas independentes.

Ao mesmo tempo que se deve evitar o risco de *rent seeking* por parte de interesses particulares, deve-se entender que a abordagem *mission-oriented* possui inerente risco de promover projetos que resultem em fracassos, dado o caráter incerto da inovação. Também por esse motivo, argumenta-se que as missões a serem buscadas devem ter em vista o bem social e serem, democraticamente, estabelecidas, enquanto as instituições governamentais que as implementem devem prestar contas e serem responsáveis, de forma que a missão possua elevado apoio popular (BUSCH *et al.*, 2018).

Apesar de que os investimentos devem ter direcionalidade, deve-se tomar cuidado com políticas que “escolham campeões”. A incapacidade de escolher vencedores, devido à óbvia falta de onisciência dos formuladores de políticas, é comumente usada como argumento para deixar as decisões sobre a trajetória tecnológica para o mercado (FAGERBERG, 2018a). Entretanto, não há evidência de que o investimento privado seja mais capaz em separar os vencedores dos perdedores, antes do fato, do que o investimento público (LIU; LIANG, 2013). Essa preocupação ignora que escolhas sempre foram feitas, e que essas escolhas deram origem a novos setores, desde a *Internet* e a biotecnologia até os desenvolvimentos recentes em nanotecnologia e tecnologias verdes (MAZZUCATO,

2014a).

O estabelecimento de objetivos sustentáveis de longo prazo reduzem as incertezas e criam um ambiente positivo para o investimento em processos e tecnologias sustentáveis (FOXON; PEARSON, 2008). Para Fagerberg (2018b), a grande aceitação do objetivo de longo prazo de transformar a economia para incorporar o conceito de sustentabilidade representa uma “oportunidade de ouro” para os formuladores de políticas definirem uma direção clara para a trajetória tecnológica, influenciando as expectativas das firmas e, assim, diminuindo as incertezas com relação ao futuro. Com relação ao longo caminho a ser trilhado para superar a dependência de combustíveis fósseis e demais práticas nocivas ao meio ambiente, essa é uma missão ambiciosa e mergulhada em riscos e fortes incertezas envolvidas no processo de mudança tecnológica. Sem o comprometimento com a criação, manutenção e financiamento de uma estrutura de políticas de longo prazo – que, por si só, já é um grande desafio –, é provável que as tecnologias limpas se tornem uma oportunidade perdida para muitos países (MAZZUCATO, 2015).

Um grave problema a ser enfrentado é o interesse estabelecido das indústrias baseadas em combustíveis fósseis, que obstruem a transição para um paradigma baseado em energias renováveis. Por exemplo, a reconfiguração do modelo estabelecido de geração de energia centralizado e em larga escala, por um modelo descentralizado e com maior participação de renováveis, ameaça a posição de firmas dominantes (WEBER; ROHRACHER, 2012); essas firmas, por sua vez, podem se tornar importantes forças de resistência à mudança. Quando se trata de políticas de inovação para transição sustentável, Kivimaa e Kern (2016) argumentam que, do conceito de “destruição criadora” (SCHUMPETER, 2017), existe grande ênfase na parte “criadora” do novo e pouca na “destruição” (ou retirada de apoio) do velho. Dada a urgência imposta pela questão climática, Kivimaa e Kern (2016) chamam atenção para uma participação do Estado não apenas na geração de inovações na direção desejada, mas também ativamente na desestabilização dos sistemas estabelecidos, como forma de acelerar o ritmo da transição. Entretanto, o fato de que as soluções tecnológicas para combater a mudança climática envolvem a substituição de parte das tecnologias existentes implica que existem importantes consequências distributivas, o que complica o componente “político” dessas políticas (MOWERY *et al.*, 2010).

De qualquer forma, vale destacar que uma política de inovação que busque promover a transição para uma economia verde deve ser direcionada, e não genérica, isto é: deve focar na desestabilização do *lock-in* de tecnologias sujas, tanto tecnológico quanto político e institucional, indo além da simples internalização de externalidades e da correção dos preços (BOWEN; HEPBURN, 2014). Como o rápido declínio dessas indústrias pode se mostrar politicamente inviável, devido aos danos sociais e econômicos que podem provocar, argumenta-se que deve ocorrer um declínio gradual (*sunset policy*), em que o capital é preservado durante a transição; e, assim, uma perspectiva de longo prazo na formulação das políticas pode ser útil para enfrentar o desafio de desestabelecer setores industriais

indesejados (BUSCH *et al.*, 2018).

### 3.2.2 Promover um portfólio de soluções tecnológicas

Como as ações do Estado criam e formam mercados, argumenta-se que as iniciativas governamentais podem ser direcionadas à transição energética renovável, aumentando as expectativas dessa direção através da institucionalização de objetivos e recompensando os atores que colaborarem para alcançá-los (BUSCH *et al.*, 2018). Inclusive, boa parte do que se entende como revolução das energias renováveis, que pode ser observada hoje, é resultado de um longo processo de desenvolvimento e difusão tecnológicos, beneficiado por investimentos governamentais guiados para a criação de oportunidades, que incentivaram, no setor, a criação de firmas privadas e promoveram seu crescimento (MAZZUCATO, 2014b).

Fagerberg (2018a) alerta que, pela primeira vez na história, há um consenso, entre os países, quanto ao objetivo de eliminar a emissão de gases do efeito estufa, assim como quanto a um comprometimento de recursos para atingi-lo; e é nesse cenário, que os formuladores de políticas se defrontam com uma direção do desenvolvimento tecnológico do futuro já em grande medida estabelecido, sendo o desafio adotar essa agenda em contexto nacional e compatibilizá-la com outros objetivos. Fagerberg (2018b) argumenta, ainda, que seguir a trajetória criada pela revolução tecnológica das energias renováveis irá requerer inovações, radicais e em grande quantidade, em áreas como armazenamento e distribuição de energia, eficiência energética, eletrificação dos transportes etc. Portanto, uma missão que busque a transição para um paradigma baseado em energias renováveis deve ser interdisciplinar e intersetorial.

Como as tecnologias novas representam novas oportunidades, além de possibilitar a superação da dependência de combustíveis fósseis, a revolução das energias renováveis também possibilitam o aumento da produtividade e a criação de novos empregos (FAGERBERG, 2018b). Mais do que um jogo de soma zero, Fagerberg (2018b) argumenta que as inovações verdes também podem reduzir custos, tornando possível o alinhamento de objetivos de mitigação de práticas nocivas ao meio ambiente, com benefícios sociais e econômicos. No argumento central desta dissertação, adiciona-se que, em contexto de países em desenvolvimento, as energias renováveis podem representar também uma janela de oportunidade em aberto, e que o objetivo de alcançar uma economia de baixo carbono pode ser compatibilizado com objetivos de aumento de competitividade e desenvolvimento econômico.

Numa situação de retornos crescentes, segundo Arthur (1994), uma autoridade central pode influenciar a adoção e experimentação em caminhos tecnológicos promissores, porém menos populares (*“tilting” the market*). Entretanto, como os retornos futuros de uma tecnologia são difíceis de serem determinados – citando como exemplo a própria energia solar –, o Estado pode se ver em uma situação na qual encontraria diversas opções

para apostar (*multi-armed bandit problem*), e na qual o sucesso nas fases iniciais de um caminho pode levar ao abandono dos outros – mantendo a possibilidade de *lock-in* em trajetórias sub-ótimas (ARTHUR, 1994). O *trade-off* existente entre a eficiência no curto prazo e a promoção de inovação no longo prazo pode levar os formuladores de políticas a apoiar apenas as tecnologias mais próximas de serem comercialmente viáveis (FOXON; PEARSON, 2008).

Uma política de inovação efetiva deve enfatizar a experimentação e exploração, particularmente nos estágios iniciais de uma tecnologia, permitindo que diferentes abordagens para a solução do problema selecionado coevoluam e concorram entre si (EDLER; FAGERBERG, 2017; FAGERBERG, 2017; MOWERY *et al.*, 2010). Ao elencar fatores institucionais importantes na procura de novas trajetórias, Dosi (1982, p. 160) argumenta que qualquer intervenção deve permitir que “*a hundred flowers to blossom and a hundred schools to compete*”. Por outro lado, a intervenção deve reconhecer que muitas dessas tentativas se mostrarão, inevitavelmente, fracassos, implicando um fardo de ser o “primeiro a chegar”.

O ponto central das políticas de inovação não é prescrever tecnologias específicas e colocar o Estado para microgerenciar o processo “de cima para baixo”, mas sim fornecer instruções de mudança em torno das quais múltiplas soluções “de baixo para cima” podem, então, ser experimentadas. Os instrumentos de política servem para definir “corredores” onde o desenvolvimento é aceitável, isto é, dentro dos quais as forças *bottom-up* de inovação, produção e consumo podem operar (WEBER; ROHRACHER, 2012). Os atores privados precisam de “espaço” para experimentar diferentes alternativas, ao mesmo tempo que os objetivos estratégicos estejam claros; dessa forma, o Estado deve ser capaz de estabelecer um equilíbrio adequado entre definir objetivos claros e permitir flexibilidade (FOXON; PEARSON, 2008). Deste modo, a direcionalidade necessária para lidar com a transição tem menos a ver com uma tecnologia específica – e.g. células solares policristalinas –, mas te, sim, a ver com sua contribuição para mudar fundamentalmente as estruturas setoriais – e.g. setor elétrico baseado em fontes renováveis –, estimulando e priorizando atividades inovativas que contribuam para uma desejada direção do desenvolvimento tecnológico (YAP; TRUFFER, 2019). Em outras palavras:

*A key success of past innovation policies has been to set a clear direction for problems to be solved (e.g. going to the moon and back in one generation) that then required cross-sectoral investments and multiple bottom-up solutions, of which some inevitably fail. Too much top-down can stifle innovation and too much bottom-up can make it dispersive with little impact. Missions should thus be broad enough to engage the public and attract cross-sectoral investment; and remain focused enough to involve industry and achieve measurable success. By setting the direction for a solution, missions do not specify how to achieve success. Rather, they stimulate the development of a range of different solutions to achieve the objective (KATTEL *et al.*, 2018, p. 6).*

O Estado precisa, portanto, ser capaz de apoiar um “portfólio” de soluções tecno-

lógicas, aliando, de um lado, o espaço para eventuais fracassos e, de outro, a prontidão para cessar o apoio a projetos que falhem em alcançar objetivos estabelecidos, ou que se mostrem menos promissores do que inicialmente esperado (FOXON; PEARSON, 2008; BUSCH *et al.*, 2018), ou, como coloca Rodrik (2014, p. 485), “*carrots must be matched by sticks*”. Conduzir políticas de inovação verdes de maneira aberta e explícita pode tornar mais fácil o reconhecimento dos fracassos e a tomada de crédito pelos sucessos, assegurando a honestidade e a legitimidade da política (RODRIK, 2014).

É importante, entretanto, que um experimento não seja abortado prematuramente, isto é, antes que conclusões robustas sejam obtidas (EDLER; FAGERBERG, 2017; FAGERBERG, 2017). Essa observação é importante, particularmente, para tecnologias energéticas: o registro histórico mostra que todas essas tecnologias precisaram e receberam apoio a longo-prazo por parte do Estado e, dessa forma, passaram por longos períodos de desenvolvimento para se tornarem capacitados a competir com a tecnologia estabelecida (MAZZUCATO, 2014b). Tecnologias verdes, com frequência, não são capazes de serem imediatamente lucrativas, da mesma forma que muitas das TIC não eram na gênese do atual paradigma (PEREZ, 2013a). Isso implica que o suporte do Estado às tecnologias verdes deve ser mantido até que a vantagem do custo afundado das tecnologias sujas estabelecidas seja superada (MAZZUCATO, 2015), sendo que, em muitos casos, esse custo afundado tem séculos de duração (UNRUH, 2000).

### 3.2.3 Conduzir as políticas de forma holística

Dada a complexidade do processo inovativo e dos sistemas de inovação, é necessário que se utilizem de diversos instrumentos de política com objetivo de proporcionar direção às inovações, o que requer capacidade de coordenar, horizontalmente, as políticas de inovação com políticas setoriais específicas (e.g. transporte e energia) e com políticas transversais (e.g. macroeconômica e tributária) (WEBER; ROHRACHER, 2012). Um aspecto importante das políticas de inovação *mission-oriented* é que, como o foco é a criação e formação de mercados em detrimento de apenas “consertá-los”, os investimentos públicos devem ser realizados ao longo de toda a cadeia de inovação em detrimento de apenas em pesquisa básica (MAZZUCATO; SEMIENIUK, 2018), aliando instrumentos de oferta com instrumentos de demanda (MAZZUCATO, 2014a; MAZZUCATO, 2014b). Isto é o que Fagerberg (2018b) chama de política “holística”: levar em conta não alguns, mas todos os fatores que influenciam as inovações.

Essa perspectiva ampla de inovação, que inclui todo o processo da criação de novos conhecimentos até a sua difusão, implementação e exploração comercial, é particularmente importante no contexto de transição para uma economia de baixo carbono, na qual as mudanças devem acontecer na prática, e as alternativas devem ter adoção generalizada (MOWERY *et al.*, 2010). Chama-se atenção para as complementariedades entre os processos de desenvolvimento, implementação e contínua melhoria das tecnologias, relacionadas

com energias renováveis frente ao *carbon lock-in*:

*Since alternative-energy technologies are deployed as replacements for existing technologies that initially may be more reliable and/or less costly, and given the importance of information dissemination about the operation, maintenance, and opportunities for incremental improvement of alternative-energy technologies, there is strong justification for public support of early-stage deployment and demonstration of the feasibility and operation of at least some of these technologies (MOWERY et al., 2010, p. 1014).*

Mazzucato (2015) afirma que a transformação do sistema energético exige políticas tanto pelo lado da demanda – influenciando a estrutura e o funcionamento dos mercados – quanto pelo lado da oferta – influenciando o investimento das firmas que tentam crescer ou fazer a transição para setores de tecnologia verde. O primeiro grupo de políticas estabelece uma demanda, ou seja, o Estado estimula as tecnologias de energias renováveis de maneira indireta, via mudanças na demanda dos consumidores, que estimulam o desenvolvimento de inovações; o segundo, por outro lado, apoia, diretamente, o desenvolvimento de tecnologias, complementando e fornecendo “soluções” para as políticas de demanda (MAZZUCATO, 2015). A extensa utilização de instrumentos de demanda mostra-se importante (FAGERBERG, 2018a), em particular na criação de mercados e sinalização do potencial de mercados futuros para as tecnologias, estimulando maiores atividades do setor privado, posto que este possui tendência de só investir quando as oportunidades claras estão à vista (MAZZUCATO, 2014a; MAZZUCATO, 2014b); e.g. o Estado e a administração pública, como grandes investidores, podem utilizar-se de mecanismos de compras públicas *innovation-oriented* para estimular, pelo lado da demanda, o avanço de novas soluções (WEBER; ROHRACHER, 2012).

Políticas de demanda incluem regulação ambiental, compras públicas, apoio à demanda privada e outras políticas, que afetem os padrões de consumo de energia – e.g. *Renewable Portfolio Standards* (RPS), metas de emissão de gases do efeito estufa e intensidade energética, imposto de carbono que afetem as preferências do consumidor (MAZZUCATO, 2015) –, leilões de energia (MAZZUCATO; PENNA, 2016) e *net metering*. Políticas de oferta são focadas em como a energia é gerada e distribuída, e influenciam o desenvolvimento de inovação em tecnologias, e.g. créditos tributários, subsídios, empréstimos, subvenções ou outros benefícios monetários para tecnologias específicas, esquemas favoráveis de preços, como *feed-in tariffs*, contratos de P&D e financiamento para descoberta e desenvolvimento de inovações (MAZZUCATO, 2015).

Nas fases iniciais de uma revolução tecnológica, enxerga-se como importante instrumento para os formuladores de políticas, a criação e o suporte de um nicho de mercado para promover o desenvolvimento de uma inovação, com propósito específico, aumentando sua viabilidade econômica através de melhorias de desempenho e redução de custos através do aprendizado e das economias de escala (FAGERBERG, 2018a; FAGERBERG, 2018b). Mathews e Reinert (2014) dão ênfase à expansão de mercado como a opção preferida de

política por conta dos retornos crescentes, que dão origem a um processo de causalção circular e cumulativo de expansão de riqueza. Através de políticas como estabelecimentos de padrões para compras públicas e *feed-in tariffs*, [Busch et al. \(2018\)](#) argumentam que o Estado pode estabelecer mercados de nicho para as energias renováveis, assim como facilitar a sua ampliação para mercados de massa.

O cenário de políticas no âmbito das energias renováveis é bastante variado, no qual tanto as políticas de oferta e demanda se mostram importantes. No final de 2019, havia 172 países, estados ou províncias com metas de energias renováveis nacionais estabelecidas, o que inclui 61 países cujo objetivo era atingir uma matriz de geração de eletricidade 100% renovável, e 1 país – Noruega – com o ambicioso objetivo de ter a energia total final 100% renovável. Também em 2019, pelo menos 135 países ofereceram algum tipo de incentivo financeiro para estimular, pelo lado da oferta, o investimento na produção e instalação de tecnologias renováveis. Relacionado à produção descentralizada de energia elétrica, foi utilizado em nível nacional, em 70 países, o *net metering*, mecanismo que remunera a geração líquida de eletricidade, introduzida na rede, por produtores nos níveis residencial e comercial ([REN21, 2020](#)).

Ademais, apesar de ainda ser uma política de grande relevância no mundo – sendo aplicada em 113 países, estados ou províncias, ao final de 2019 –, a política de oferta de *feed-in tariffs* vem sendo substituída, em muitos países, por uma política de demanda, baseada em leilões – cumulativamente, 109 países, estados ou províncias realizam leilões, contra 98, em 2018. Atualmente, o esquema de *feed-in tariffs* em grande escala é limitado a países com mercados emergentes de energia renovável e aplicado para apoiar tecnologias menos estabelecidas ou com custos de desenvolvimento de projetos relativamente altos que, geralmente, não são incluídos em leilões. Ademais, a flexibilidade do esquema de leilões permite, ainda, que os formuladores de políticas desenhem contratos, em que, além de premiar o contrato de menor preço, busquem também atingir diversos outros objetivos nacionais – e.g. requerimento para a utilização de conteúdo nacional para promover a indústria doméstica. Em 2019, 41 diferentes países realizaram 68 leilões – dos quais a maioria focou, exclusivamente, em energia eólica e solar fotovoltaica –, contra 48, em 2018; e apenas 29, em 2017 ([REN21, 2019](#); [REN21, 2020](#)).

### 3.2.4 Investir e estimular o investimento

As políticas relacionadas com os investimentos e financiamento público em inovações, ambas pelo lado da oferta, merecem destaque. Apesar da tendência crescente dos investimentos em energias renováveis, [Mazzucato e Semieniuk \(2018\)](#) argumentam que um importante problema a se destacar na transição para um paradigma energético de baixo carbono é a obtenção de financiamento suficiente para direcionar os investimentos para esses setores. Entende-se que, por conta de gargalos no financiamento das inovações em energias renováveis, não há progresso suficiente na substituição dos combustíveis fósseis

por fontes renováveis de energia (MAZZUCATO; SEMIENIUK, 2017). Segundo Mazzucato e Semieniuk (2017), financiar as inovações em energias renováveis é, especialmente, difícil para atores privados por conta da competição com os estabelecidos combustíveis fósseis. Dado o caráter de busca por retornos de curto prazo do financiamento privado, argumenta-se que um importante papel a ser desempenhado pelo setor público é a provisão de financiamento “paciente” e de longo prazo – isto é, a qualidade do financiamento também importa –, além da disposição de investir em áreas de elevado risco e incerteza (MAZZUCATO, 2018).

Para uma transição energética efetiva, são necessários tanto os investimentos públicos quanto os privados (SEMIENIUK; MAZZUCATO, 2019). O estudo empírico realizado por Mazzucato e Semieniuk (2018) apresenta evidências de que, entre 2006 e 2014, os investimentos públicos em tecnologias relacionadas às energias renováveis apresentaram um significativo crescimento de 230%, enquanto os privados caíram 12%, aumentando a participação do Estado no financiamento do total de investimentos de energias renováveis, além de que os investimentos públicos apresentaram maior apetite por risco, direcionando investimentos para tecnologias e projetos mais arriscados. A análise de Rhodes *et al.* (2014), por sua vez, mostra que o investimento público global em PD&D<sup>4</sup> em energias renováveis e eficiência energética cresceu entre 2000 e 2011, enquanto a maior parte do investimento privado em PD&D concentrou-se em combustíveis fósseis, com modesto crescimento no setor de alto risco e incerteza das energias renováveis. Esses resultados sugerem que o investimento privado tende a reforçar o *carbon lock-in*, gerando melhorias incrementais em trajetórias bem conhecidas e retardando a substituição por tecnologias verdes; enquanto o investimento público busca novas alternativas e pavimenta uma nova, e ainda bastante incerta, trajetória tecnológica no setor energético.

A abordagem *mission-oriented* baseia-se na utilização de desafios ou problemas sociais específicos visando estimular a busca por soluções tecnológicas, em diversos setores (MAZZUCATO, 2018). Através de investimentos estratégicos em toda a cadeia de inovação – de forma direta, e.g. através de bancos de desenvolvimento, e não indiretamente através de incentivos ao investimento privado (SEMIENIUK; MAZZUCATO, 2019) –, o Estado tem capacidade de determinar a direção do crescimento econômico, criando ativamente novos mercados e atuando sobre as expectativas privadas acerca das oportunidades futuras de crescimento (MAZZUCATO, 2018). Dessa forma, argumenta-se por menos políticas de subsídios e mais políticas focadas em recompensar investimentos e inovações, que tenham sucesso em resolver problemas e satisfazer as necessidades estabelecidas.

Mazzucato (2018) argumenta ainda que, ao longo da história, somente após décadas de investimentos públicos, o “capital de risco” privado entrou em muitas indústrias, em pontos nos quais as tecnologias já estavam bem estabelecidas. No caso das energias renováveis, em específico, os resultados compilados em Mazzucato e Semieniuk (2018)

<sup>4</sup> Pesquisa, desenvolvimento e demonstração.

evidenciam que os investimentos (e políticas) públicos possuem impacto positivo nos investimentos privados. Evidências sugerem, ainda, que o efeito multiplicador dos gastos públicos é maior quando o investimento é direcionado, e.g. TIC, nos anos 1980 e 1990, e tecnologias verdes, atualmente (MAZZUCATO, 2014a), posto que esses investimentos têm como objetivo a mudança em múltiplos setores em uma nova e mais produtiva direção, *crowding-in* o investimento do setor privado, inclusive em P&D (KATTEL *et al.*, 2018). Outras evidências, ainda, para o período 2009-2011, sugerem, inclusive, que o maior risco tomado por parte do financiamento privado pode estar, ao menos em parte, relacionado ao estímulo governamental no período (MAZZUCATO; SEMIENIUK, 2018).

Um interessante argumento, baseado na teoria dos retornos crescentes, é apresentado por Mathews e Reinert (2014). As atividades de extração de combustíveis fósseis, assim como toda extração de recursos exauríveis, estão sujeitas a retornos decrescentes, independentemente das inovações tecnológicas no setor; por outro lado, as atividades de captação de energias renováveis envolvem a utilização de dispositivos manufaturados que apresentam retornos crescentes no seu processo de fabricação. Assim como todos os produtos manufaturados, as tecnologias relacionadas com energias renováveis, como os módulos solares fotovoltaicos e turbinas eólicas<sup>5</sup>, estão sujeitas a uma curva de aprendizado, implicando em custos declinantes, ao passo que mais experiência é acumulada. Uma vez que o potencial desses retornos crescentes, presentes nos investimentos em energias renováveis, fique claro – e.g. através da atuação do Estado –, pode-se esperar que o investimento flua das energias fósseis para as renováveis. Esse fenômeno tem potencial de promover a essas tecnologias uma expansão autossustentada e alimentada pelos retornos crescentes, iniciando uma transição energética renovável e superando o *carbon lock-in* (MATHEWS; REINERT, 2014).

Os bancos de desenvolvimento, em particular, são uma fonte de crescente importância no financiamento público estratégico, encaminhando os investimentos para direções específicas, relacionadas com missões tecnológicas e grandes desafios sociais. A própria estrutura institucional dos bancos de desenvolvimento os torna as agências públicas mais apropriadas para lidar com os grandes desafios da atualidade, por diversos motivos: a) o fato de serem instituições bancárias permite a elas avaliar a viabilidade econômica de projetos; b) os bancos de desenvolvimento, tradicionalmente, ofertam financiamento paciente de longo prazo, o que é crucial para tornar novos projetos *mission-oriented* viáveis; c) o vasto portfólio de ferramentas de financiamento que os bancos de desenvolvimento têm à disposição permite que possam combinar os projetos de inovação (incremental ou radical) com o instrumento mais adequado; d) as instituições bancárias também estão bem posicionadas para coordenar as partes interessadas e estabelecer relacionamentos entre diversos atores (governo, empresas e consumidores); e e) por fim, os bancos de desenvolvimento,

<sup>5</sup> Esse argumento pode ser utilizado para favorecer as fontes solar e a eólica em detrimento de biocombustíveis, dado que esse último está ligado à agricultura, que possui retornos decrescentes.

historicamente, executaram um papel de coordenação com outras políticas públicas, o que é crucial para alcançar as novas missões (MAZZUCATO; PENNA, 2015). Ademais, o papel dos bancos de desenvolvimento vai além de simplesmente financiar projetos: esses bancos podem definir condições para acesso ao capital, com objetivo de promover a criação de valor social e econômico para seus países (MAZZUCATO, 2015).

### 3.2.5 Incorporar o aprendizado na governança

Se o Estado é essencial no processo de mudança tecnológica e socioeconômica, então, entender a estrutura apropriada para as organizações públicas é também essencial (MAZZUCATO, 2014a). Portanto, um importante fator na organização do Estado, para conduzir com sucesso as políticas de inovação *mission-oriented*, é o aprendizado institucional, ou seja, o processo de investimento, exploração e descoberta das características que as agências governamentais devem possuir para lidar com a incerteza fundamental, envolvida no processo inovativo – radical e incremental (MAZZUCATO, 2018). É necessário inovações não apenas na economia, mas também na governança (EDLER; FAGERBERG, 2017), através da capacidade de aprendizado na prática da condução de políticas (FAGERBERG, 2018b). Mais do que uma simples lista de instrumentos de políticas, a política de inovação verde deve ser conduzida como um “processo de descoberta”, no qual o Estado aprende onde as limitações e as oportunidades se encontram e busca utilizar esse conhecimento para responder de forma adequada (RODRIK, 2014).

O caráter de longo prazo dos objetivos e as limitações na governança, impostas pela complexidade e incerteza inerente à inovação, tornam necessário o estabelecimento de processos contínuos de monitoramento, antecipação e aprendizado (WEBER; ROHRACHER, 2012). Nesse mesmo sentido, Busch *et al.* (2018) argumentam que as políticas de inovação *mission-oriented* devem ser adaptativas às mudanças nos ambientes sociais e técnicos, incorporando processos contínuos de aprendizado no desenho e na condução de políticas. O estabelecimento de políticas adaptativas, que mantenham opções em aberto e permitam desenvolvimentos paralelos, é necessário para que seja possível lidar com a incerteza (WEBER; ROHRACHER, 2012). A adaptabilidade das políticas é essencial para enfrentar novas circunstâncias de mercado e tecnologias, bem como para resolver novos problemas que surgem na transição (KEMP; NEVER, 2017). O uso do aprendizado adquirido pode ser realizado através de uma abordagem sequencial, que pode tomar forma de aperto gradual de regulação, ou o teste de projetos-piloto antes de uma ampliação em larga escala, sem que haja a perda do senso de direção (KEMP; NEVER, 2017).

Além disso, é crucial explorar formas alternativas pelas quais o Estado assume riscos; não através de uma estratégia conservadora, que minimiza os riscos de escolher projetos perdedores e maximiza a probabilidade de escolher vencedores, mas através da adoção de uma abordagem de portfólio para seus investimentos (RODRIK, 2014). A abordagem de portfólio, ao invés de investimentos em uma única solução, ainda não é comum na

formulação de políticas (WEBER; ROHRACHER, 2012). Nessa abordagem, o sucesso de alguns projetos pode cobrir as perdas de muitos projetos, e o Estado aprende com seus investimentos perdedores, isto é, nessa estrutura institucional, as políticas vencedoras fornecem “recompensas” suficientes para cobrir as perdas, e essas perdas são usadas como casos de aprendizado para melhorar políticas futuras (MAZZUCATO, 2014a). Isso reverte a lógica “parasitária”, aplicada no caso estadunidense recente: houve socialização dos riscos e das perdas – *Solyndra* –, mas não das recompensas ou dos sucessos – *Tesla* (SEMIENIUK; MAZZUCATO, 2019).

### 3.3 COMO AVALIAR POLÍTICAS *MISSION-ORIENTED*?

Se, por um lado, a perspectiva *mission-oriented* para políticas de inovação nos possibilita justificar políticas ambiciosas, que buscam criar e formar novos mercados ao invés de apenas consertar mercados existentes, por outro, ela impõe importantes desafios relacionados a como avaliar os efeitos dessas políticas (KATTEL *et al.*, 2018). Há, portanto, uma pergunta em aberto – e que demanda mais pesquisa – em relação a como avaliar o impacto dinâmico da criação de mercados por parte dos investimentos do Estado, de maneira a superar a análise estática, presente na perspectiva das falhas de mercado, e baseando-se na eficiência dinâmica e em uma concepção mais abrangente de criação de valor público (MAZZUCATO, 2018; KATTEL *et al.*, 2018). A inexistência desses indicadores, frequentemente, conduz a uma atuação que limita os investimentos às fronteiras do paradigma tecno-econômico estabelecido (MAZZUCATO, 2014a). Com relação a essa dificuldade, no caso específico das tecnologias verdes:

Nem sempre é fácil ligar os pontos entre empresas dominantes e suas tecnologias e os esforços de governos ao redor do mundo, mas fica muito claro que *nenhuma* empresa de tecnologia limpa importante surgiu de uma ‘gênese do mercado’, isto é, como se o Estado não tivesse desempenhado papel algum (MAZZUCATO, 2014b, p. 222).

A abordagem de diagnóstico e avaliação de políticas convencional é baseada na teoria das falhas de mercado, envolvendo a identificação das fontes dessas falhas e a utilização de políticas para consertá-las (MAZZUCATO, 2014a). Em geral, as técnicas de avaliação de políticas são baseadas em uma análise *ex ante* de custo-benefício do tipo estática – “todo o mais constante” – preocupada com a eficiência alocativa de recursos fixos em um determinado ponto do tempo; a avaliação, após a intervenção, busca verificar se as estimativas estavam corretas e se a falha de mercado foi resolvida (KATTEL *et al.*, 2018). Essa abordagem justifica a atuação do Estado somente para consertar falhas de mercado, sob a condição de que a intervenção do Estado não resulte em custosas “falhas governamentais”.

As políticas *mission-oriented*, por outro lado, buscam criar e formar novos mercados através de inovações, que envolvem o desenvolvimento de novas tecnologias, mudança da

fronteira tecnológica, aumento da competitividade industrial e mudanças radicais nos preços e na disponibilidade de bens e serviços; dessa forma, envolvem eficiência dinâmica, que é o melhor uso de recursos para possibilitar mudança ao longo do tempo (KATTEL *et al.*, 2018). Quando ferramentas de eficiência alocativa são aplicadas em problemas de eficiência dinâmica – e.g. a descarbonização ao menor custo – suas análises são irrelevantes ou ativamente inúteis, pois representam um exercício estático de avaliação de um processo intrinsecamente dinâmico, sistêmico e envolto em incertezas, e.g. estimações relacionadas com a existência de tecnologias no futuro ou com as características de mercados futuros podem ser impossíveis de ser operacionalizadas (MAZZUCATO, 2014a; KATTEL *et al.*, 2018). A análise de custo-benefício *ex ante* não é adequada para uma política *mission-oriented*, e o homem poderia nunca ter chegado à Lua caso o projeto Apollo tivesse sido avaliado dessa maneira.

O monitoramento e a avaliação de políticas de inovação *mission-oriented* devem levar em consideração aspectos relacionados à eficiência dinâmica: a) incerteza fundamental: deve-se enfatizar, de forma explícita e transparente, as maneiras através das quais se lida com a incerteza, trazendo-a para o centro das considerações; b) *path dependence*: deve-se ser capaz de demonstrar que cada ação (ou inação) é compatível com a direção da mudança que se deseja implementar; c) desproporcionalidade entre causa e efeito: em sistemas complexos e não lineares, um pequeno esforço pode ser capaz de gerar grandes efeitos, o que implica que se deve identificar pontos de maior alavancagem de forma a garantir a custo-efetividade das intervenções; d) emergência: como em sistemas complexos as interações entre os componentes são importantes, deve-se focar no melhor entendimento e avaliação dos efeitos coletivos e sistêmicos; e e) ausência de um ponto de ótimo: a eficiência dinâmica não pode ser otimizada, isso implica que se devem priorizar políticas adaptativas, criando opções e permitindo revisões (KATTEL *et al.*, 2018).

Estruturas analíticas como da economia da complexidade (ARTHUR, 1989; ARTHUR, 1994) e da literatura de paradigmas tecno-econômicos (PEREZ, 1985; PEREZ, 2001; PEREZ, 2010; FREEMAN; PEREZ, 1988) apoiam o entendimento e a busca por eficiência dinâmica e, portanto, podem ser utilizadas para identificar, desenhar e avaliar instrumentos de políticas efetivos para a expansão e mudança das fronteiras tecnológicas e de inovação em contexto de incerteza fundamental (KATTEL *et al.*, 2018). Levando em conta todas essas considerações, Kattel *et al.* (2018) sugerem três instrumentos que podem ser importantes para auxiliar a análise de políticas *mission-oriented*: os marcos intermediários, os efeitos *spillover* e a abordagem de portfólio.

Numa política *mission-oriented*, é importante a definição de objetivos e metas concretas, de forma que seja possível afirmar se a missão foi bem sucedida ou não. Por um lado, missões como levar o homem à Lua têm um fim bastante óbvio, o que torna mais fácil sua avaliação; por outro, os grandes problemas sociais da atualidade possuem fins menos óbvios, o que torna crucial o uso de marcos intermediários, de forma a providenciar

meios de observar o progresso em direção ao objetivo, possibilitando a avaliação contínua e reflexiva para saber se o sistema está se movendo na direção definida, e de permitir decisões adaptativas bem informadas e flexíveis (KATTEL *et al.*, 2018). De acordo com Rodrik (2014), é grande a dificuldade de realizar o monitoramento de objetivos tecnológicos de maneira rigorosa, especialmente por conta de mudanças exógenas observadas no desenvolvimento de mercados e de tecnologias, não previstas no programa. No entanto, o Estado pode implementar, previamente, metas de custos, produtividade etc., como forma de avaliar o desempenho dos projetos contra as expectativas *ex ante*, visto que: por um lado, um baixo desempenho pode resultar no abandono de um projeto ou, por outro, mudanças exógenas e imprevisíveis podem ser utilizadas como argumento para manter apoio a outro (RODRIK, 2014).

Todavia, mesmo quando marcos intermediários ou o próprio objetivo da missão não sejam alcançados, a missão pode, ainda, ser considerada como bem sucedida – pelo menos até certo ponto – se o processo produzir efeitos de *spillover* positivos e pervasivos em toda a economia. Portanto, medidas mais abrangentes de impactos interdisciplinares e intersetoriais devem ser adicionadas, de forma a capturar o potencial da política de criar efeitos em diferentes setores e de alterar o nível de investimento e a trajetória de crescimento econômico (KATTEL *et al.*, 2018).

Em fim, uma missão não é constituída por um projeto único, mas por um portfólio de diversas iniciativas públicas, que encorajem múltiplas soluções, com foco em complementariedades e interações, evitando a duplicidade. Aos participantes da missão deve ser dada flexibilidade para proporem variadas soluções focadas em alcançar os objetivos e marcos intermediários da missão. Desse modo, nutrem a experimentação *bottom-up*, permitindo que ocorra aprendizado através de coleta e análise de lições e dados sobre os experimentos – sob essa ótica, as falhas são aceitas e entendidas como dispositivo de aprendizado. Nesse contexto, as ferramentas e métricas de avaliação devem ser construídas, tendo em mente essa experimentação, bem como os inevitáveis fracassos decorrentes do processo (KATTEL *et al.*, 2018).

Um exemplo disso, ainda, é o caso estadunidense. Na administração do Presidente Obama, o governo realizou dois grandes empréstimos, um para a *Tesla* (veículos elétricos) de US\$ 465 milhões e outro para a *Solyndra* (células solares fotovoltaicas de diseleneto de cobre, índio e gálio) de US\$ 500 milhões; o primeiro é considerado um caso de grande sucesso, enquanto o segundo, que falhou miseravelmente, é utilizado – por economistas e pela mídia – como exemplo de como o Estado é incapaz de escolher vencedores (MAZZUCATO, 2014a). Entretanto, mostra-se inadequado julgar o programa por uma análise de custo-benefício do caso da *Solyndra* – um fracasso devido à queda no preço do silício por conta de nova capacidade de produção chinesa (RODRIK, 2014), isto é, por um evento totalmente exógeno. Sugere-se, por outro lado, que esses investimentos sejam realizados em uma abordagem de portfólio, na qual os inevitáveis fracassos, como a *Solyndra*, possam

ser cobertos pelos eventuais sucessos, como a *Tesla* (MAZZUCATO, 2014a). O Estado, ao invés de temer as falhas, deve acolhê-las, visto que são inevitáveis quando se investe em inovações incertas (MAZZUCATO; PEREZ, 2015).

De forma similar, Rodrik (2014) argumenta de que não se pode avaliar uma política de inovação com base no sucesso (ou fracasso) de um projeto inovativo isolado, dado que o portfólio “ótimo” apresenta projetos com probabilidade de falha maior do que zero. Indo mais além e entendendo que as tecnologias verdes apresentam externalidades positivas, a probabilidade de falha dos projetos que o governo decide realizar pode ser ainda maior, de forma que o portfólio ótimo apresente, até mesmo, retorno total negativo. Dessa forma, um programa governamental que busque encorajar inovações verdes não pode ser avaliado pela *performance* financeira do portfólio como um todo, muito menos pelo sucesso ou fracasso de projetos individuais (RODRIK, 2014).

Tentar evitar a incerteza inerente ao processo inovativo pode resultar na seleção de projetos pouco inovativos para receber suporte – que, por conta do baixo risco, poderiam ter obtido suporte de outras fontes –, fazendo com que a política de inovação seja menos efetiva. Segundo Rodrik (2014), um ponto importante e sutil é o de que, como mesmo sob um programa de incentivo ótimo alguns dos investimentos serão falhos, uma baixa taxa de falha de um programa governamental pode indicar que a política não é generosa ou agressiva o suficiente. O objetivo não deve ser minimizar a probabilidade de ocorrer falhas, mas minimizar o custo das falhas quando essas, invariavelmente, ocorrerem; ou seja, o truque não é escolher vencedores, mas saber identificar os perdedores, e quanto melhor for a capacidade de deixar de lado os perdedores, melhor será a política de inovação (RODRIK, 2014). Como o processo inovativo é incerto, não é razoável investir em um conjunto estreito de tecnologias e, assim, escolher vencedores; mas definir objetivos estratégicos de longo prazo, que permitam que os vencedores emergam dos processos de experimentação (FOXON; PEARSON, 2008).

### 3.4 SÍNTESE CONCLUSIVA

Esse capítulo buscou alertar que o aproveitamento das janelas de oportunidade, abertas pela transição entre paradigmas tecno-econômicos, depende de uma reformulação das políticas de inovação, colocando a ciência e a tecnologia, relacionadas com as novas oportunidades tecnológicas, no centro das políticas de desenvolvimento. Essa visão ressalta a necessidade de um Estado forte, ativo e empreendedor para lidar com a magnitude e a complexidade do processo de transição entre paradigmas, através do que se denomina de políticas de inovação *mission-oriented*, com ampla justificativa teórica. Com base na literatura acerca das políticas de inovação *mission-oriented* e enfatizando problemas ambientais e as energias renováveis, a principal contribuição do capítulo foi a discussão relacionada com os cinco princípios essenciais, que devem guiar a atuação empreendedora do Estado – a saber: definição de uma missão a ser cumprida; promoção de um portfólio de

soluções; condução holística das políticas de inovação; estímulo do investimento privado; e, incorporação do aprendizado na governança. A definição de cada um desses princípios está sintetizada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Quadro síntese dos princípios essenciais das políticas *mission-oriented*

Princípios essenciais	Definição
1. Definir uma missão a ser cumprida	Estabelecimento de objetivos claros, estratégicos e de longo prazo, envolvendo a busca por soluções de grandes problemas sociais, através de inovações radicais de alto impacto, em diversos setores da economia;
2. Promover um portfólio de soluções tecnológicas	Experimentação e exploração de um portfólio de soluções tecnológicas, permitindo que diferentes abordagens coevolam e concorram entre si;
3. Conduzir as políticas de forma holística	Utilização coordenada de diversos instrumentos, tanto de oferta quanto de demanda, ao longo de toda a cadeia de inovação, além da coordenação com políticas setoriais e transversais;
4. Investir e estimular o investimento	Através de investimentos estratégicos, o Estado possui capacidade de determinar a direção do crescimento econômico, impactando positivamente nos investimentos privados, por meio de efeitos multiplicadores e de <i>crowding-in</i> ;
5. Incorporar o aprendizado na governança	Condução das políticas de inovação como um processo de exploração e descoberta, isto é, de experimentação, aprendizado e inovação, na governança e na prática da condução de políticas, de forma a lidar com a incerteza fundamental envolvida no processo inovativo.

Fonte: Elaboração própria.

Avaliar o impacto dinâmico das políticas de inovação, entretanto, é um desafio em aberto: descartam-se como inadequadas as análises *ex ante* de custo-benefício estáticas, baseadas na concepção de falhas de mercado; e chama-se atenção para a importância de instrumentos alternativos de análise – que levem em consideração fatores como a incerteza fundamental, *path dependence*, desproporcionalidade entre causa e efeito, emergência e ausência de um ponto de ótimo –, como marcos intermediários, efeitos *spillover* e abordagem de portfólio.

## 4 ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO MUNDO E BRASIL

Antes de abordar o caso específico do Brasil, no âmbito das políticas de inovação no setor de energia eólica e solar fotovoltaica, deve-se abrir um espaço para discutir as principais características dessas tecnologias, mercados e indústrias, tanto em nível mundial quanto em nível brasileiro, de forma a dar maior embasamento à análise das políticas brasileiras, a ser realizada à frente, no Capítulo 5. É essa discussão que se propõe apresentar neste capítulo, estrutural e conjuntural desta dissertação.

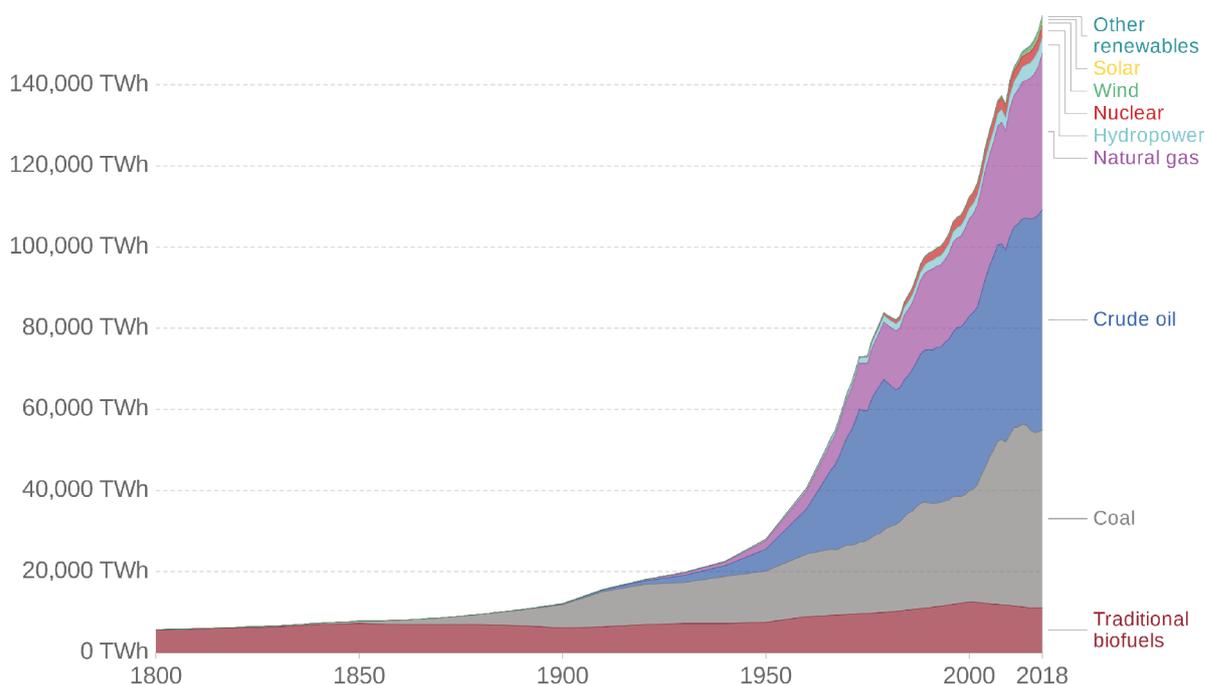
Este capítulo, portanto, é dedicado à caracterização dos setores de energia eólica e solar fotovoltaica no mundo e no Brasil. Na seção 4.1, traça-se um panorama geral da evolução histórica do fenômeno do *carbon lock-in* – e sua relação com os sucessivos paradigmas tecno-econômicos –, e da participação e potencial inexplorado das energias renováveis. Na seção 4.2, são apresentadas as especificidades da energia eólica *onshore* e *offshore*; e, na seção 4.3, por sua vez, o foco é voltado às especificidades da fonte solar fotovoltaica em nível mundial. Em ambas as seções, são analisadas as mesmas categorias fundamentais: primeiro, os aspectos tecnológicos principais e breve histórico de cada tecnologia; segundo, as questões relacionadas com os fluxos de investimentos, capacidade instalada e principais mercados; terceiro, e por fim, as características estruturais da indústria. A seção 4.4 tem seu foco direcionado ao caso brasileiro. Nela, faz-se uma caracterização do sistema energético brasileiro, de forma a explorar as especificidades do *lock-in* no Brasil – tanto relacionado aos combustíveis fósseis quanto às hidrelétricas –, e do papel das energias renováveis no país, sobretudo eólica e solar fotovoltaica, tanto em termos de potencial a ser explorado quanto da evolução dessas fontes e de suas indústrias associadas. Por último, na seção 4.5, apresenta-se uma síntese conclusiva do capítulo.

### 4.1 CARBON LOCK-IN E AS ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MUNDO

Duas informações ficam evidentes na Figura 4.1, que mapeia a mudança de longo prazo no consumo de energia primária, tanto em termos de quantidade quanto em termos de fontes: a) primeiro, verifica-se um monumental crescimento do consumo de energia, começando, especialmente, no período em que vigora o paradigma tecno-econômico do Petróleo, Automóvel e Produção em Massa (entre 1908 e 1971, utilizando a periodização de [Perez \(2002\)](#)), e estendendo-se e intensificando-se sobre o paradigma das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC, de 1971 para cá); b) a histórica elevada dependência de combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural –, conhecido como *carbon lock-in*, chegando a representar cerca de 87% do total de energia primária consumida em 2018 ([RITCHIE; ROSER, 2018](#)).

No período do segundo (1829-75) e terceiro (1875-1908) paradigmas tecno-econômicos, verifica-se o surgimento do carvão mineral como uma importante fonte de

Figura 4.1 – Consumo de energia primária (TWh) – Mundo – 1800-2018



Fonte: Ritchie e Roser (2018). Nota: Sob a denominação *other renewables* (outros renováveis) insere-se todas as fontes renováveis com a exceção da eólica, solar e hidrelétrica, e.g. geotérmica, marinha e biocombustíveis modernos.

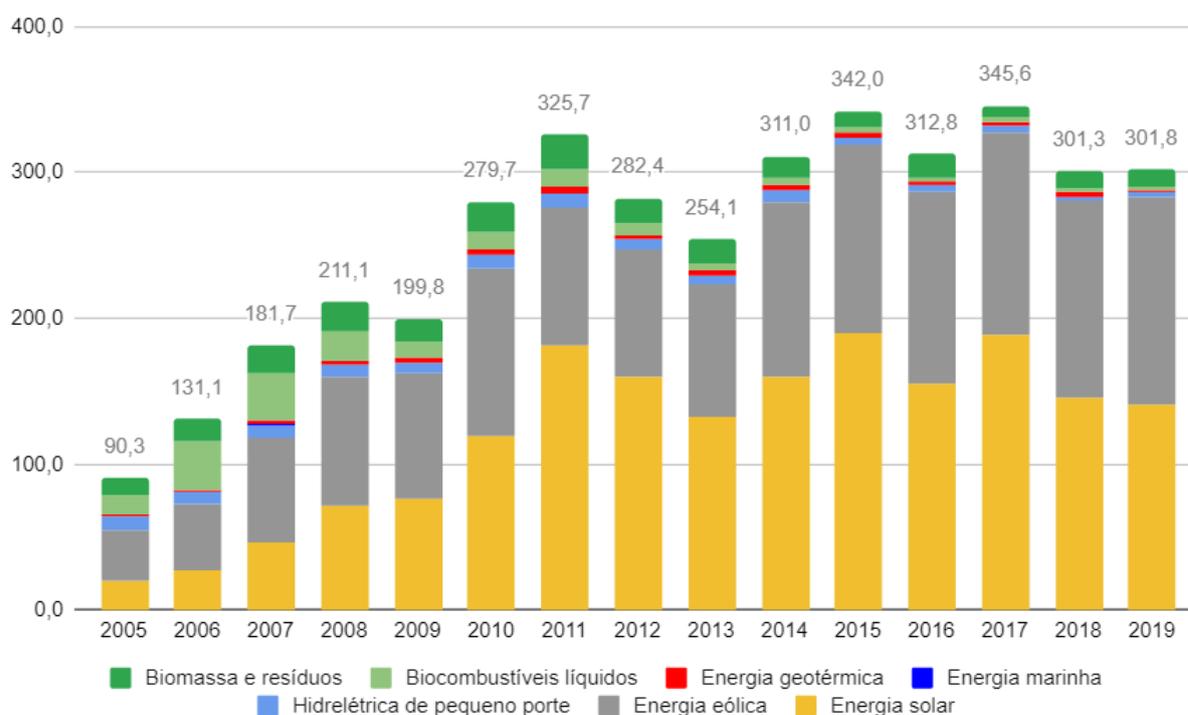
energia, substituindo os biocombustíveis tradicionais; primeiro, como combustível para a geração de vapor e, depois, para a geração de energia elétrica. Com a ascensão do quarto paradigma (1908-1971) e o estabelecimento do motor à combustão interna, foi o petróleo que passou a crescer de maneira exponencial. Mais recentemente, o gás natural vem ganhando elevada importância na matriz de consumo de energia primária. Com base nessa evolução, pode-se argumentar que os avanços tecnológicos e os padrões estabelecidos ao longo da história, ao favorecerem a utilização de combustíveis fósseis para obtenção de energia, definem o estado de *carbon lock-in* no qual se encontra o mundo atualmente. Em 2018, quanto 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% (RITCHIE; ROSER, 2018).

Do lado político e institucional, um importante exemplo de como poderosas instituições, continuamente, apoiam e sustentam as fontes de energia fóssil é a existência de gigantescos subsídios ao consumo, com a recente tendência crescente desses subsídios, alcançando US\$ 427 bilhões globais em 2018, dos quais 182 bilhões só para o petróleo, sublinham a natureza incompleta das reformas de preços, realizadas nos últimos anos (IEA, 2020b). Se for levado em conta 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).

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. No Capítulo 2, já se argumentou que as energias renováveis podem, inclusive, se tornar o conjunto de insumos-chave de um emergente paradigma tecno-econômico. Uma evidência da emergência desse sexto paradigma pode ser observado no crescimento, em termos reais, nos níveis anuais de investimentos globais em energias renováveis, com expressa a Figura 4.2. Em 2019, os investimentos foram de US\$ 301,8 bilhões, mais do que o triplo verificado em 2005 (90,3 bilhões, em US\$ de 2019). Esse surto foi puxado pelas fontes eólica e solar, responsáveis pela quase totalidade dos investimentos – e.g. essas duas fontes representaram, respectivamente, 47,3% e 46,7% dos investimentos em 2019 –, o que reforça a justificativa desta dissertação em investigar, em detalhes, essas duas fontes (IRENA, 2020).

Figura 4.2 – Investimentos globais em energias renováveis por tecnologia (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019

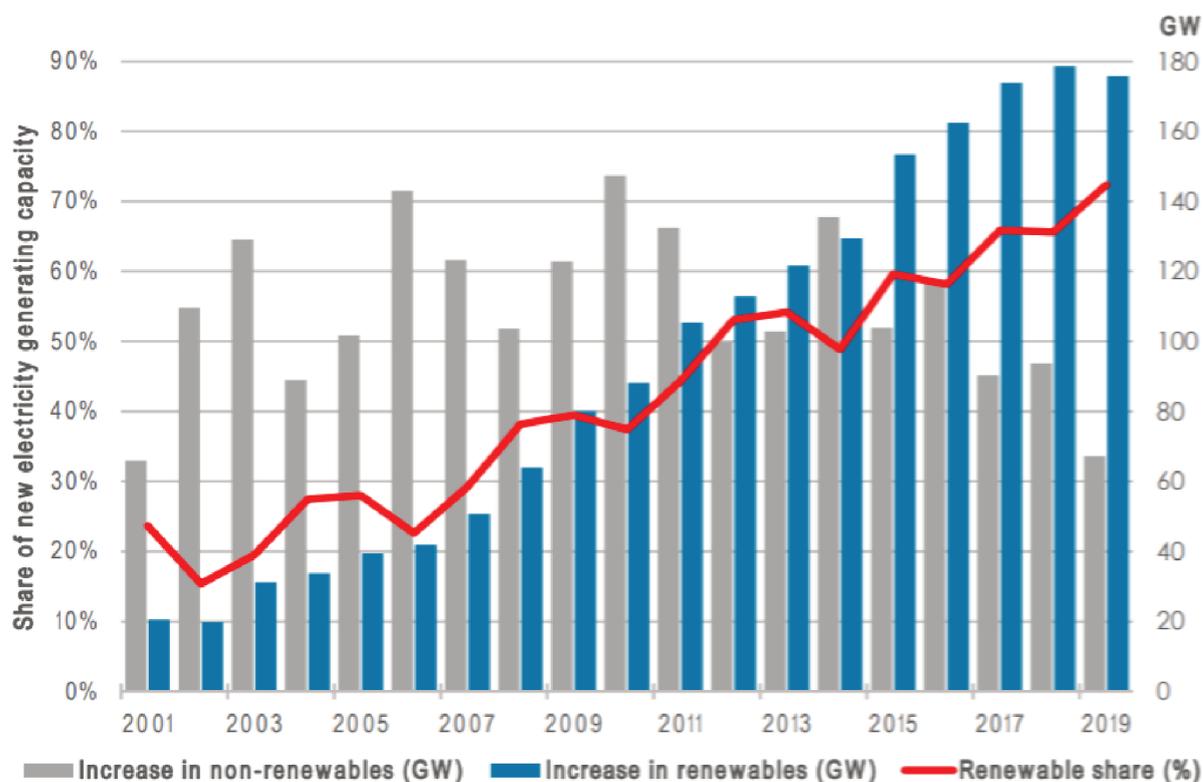


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da IRENA (2020). Nota: valores deflacionados pela média anual do índice CPI-U.

Outra evidência pode ser vista no crescimento de novas capacidades de geração de energia renovável, particularmente quando comparadas com as novas instalações de fontes fósseis, como expressa a Figura 4.3. Nela, verifica-se uma clara tendência de aumento da participação das fontes renováveis nas novas instalações de capacidade de geração elétrica, nas últimas duas décadas (linha vermelha do gráfico), superando as não renováveis pela primeira vez em 2012 e representando mais de 70% da capacidade adicionada em 2019, indicando um processo de transição energética. Na última década, portanto, verifica-se que as fontes renováveis vêm se tornando a escolha padrão para aumentar a oferta de energia

elétrica. Em 2015, a nova capacidade instalada das duas principais fontes renováveis, eólica e solar, supera a de energia hidrelétrica pela primeira vez (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Figura 4.3 – Nova capacidade de geração de eletricidade por tipo (GW, eixo direito) e indicador de transição energética (% , eixo esquerdo) – Mundo – 2001-2019.



Fonte: IRENA (2020a).

Em 2018, da energia final total consumida no mundo, estima-se que as energias renováveis modernas – o que exclui os usos tradicionais da biomassa – foram responsáveis por cerca de 11% (REN21, 2020). No setor de eletricidade, em 2019, as fontes renováveis apresentaram o maior crescimento em capacidade instalada na história – mais de 200 GW foram instalados, dos quais a maior parte foi em energia solar fotovoltaica –, superando, pelo 5º ano consecutivo, as instalações líquidas de energia elétrica fóssil e nuclear combinadas (REN21, 2020). Estima-se que a capacidade instalada de todas as fontes de energia renovável combinadas era suficiente para prover 27,3% da energia elétrica gerada em 2019 (REN21, 2020). Para as fontes eólica e solar fotovoltaica, em específico, apesar do significativo crescimento da sua participação na matriz de geração de energia elétrica nos últimos anos – em 2008, essas fontes combinadas representavam apenas 1,15% da matriz elétrica mundial, em 2018, esse número subiu para 6,84% (IEA, 2020a) –, considerada ainda bastante reduzida.

Os potenciais teórico e técnico das energias renováveis (Tabela 4.1) se mostram, significativamente, maiores do que a demanda total por energia primária em 2015, que foi de 555 EJ/ano (TESKE *et al.*, 2019). Destacam-se, nesse sentido, as energias eólica e,

especialmente, solar: o valor mínimo do potencial dessa última fonte (62.000 EJ/ano) seria suficiente para satisfazer a demanda total por energia primária de 2015, cerca de 112 vezes. Além disso, pode-se verificar, também, que a utilização desses recursos ainda é bastante reduzida, implicando que as margens para melhorias nas tecnologias de conversão e para expansão dessas fontes são bastante elevadas.

Tabela 4.1 – Potencial teórico e técnico de fontes renováveis de energia (EJ/ano) e sua utilização em 2015 (%) – Mundo

Fonte de energia renovável	Potencial teórico	Potencial técnico	Utilização em 2015 (%)
Energia solar	3.900.000	62.000-280.000	1,3
Energia eólica	6.000	1.250-2.250	1,9
Bioenergia	1.548	160-270	51,5
Energia geotérmica	1.400	810-1.545	2,4
Hidroelétrica	147	50-60	13,2
Energia marinha	7.400	3.240-10.500	0,0018

Fonte: [Teske et al. \(2019\)](#). Nota: O potencial teórico identifica o limite superior físico da energia disponível a partir de uma determinada fonte, não levando em consideração as restrições de utilização ou a eficiência das tecnologias de conversão. O potencial técnico leva em conta a eficiência da tecnologia de conversão e restrições adicionais relacionadas à área disponível realisticamente para geração de energia. Dessa forma, esse não é um número definido, mas depende do progresso tecnológico e de inúmeras condições de fronteiras e suposições.

Conforme alertado na Introdução desta dissertação, um sistema energético baseado em fontes renováveis significa que o mundo precisa ser eletrificado, na geração, distribuição e utilização de energia. O caminho a ser percorrido nesse sentido ainda é bastante longo: apesar de se observar um leve crescimento nas últimas décadas, a parcela eletrificada do consumo total de energia final foi de apenas 19,3% em 2018 ([IEA, 2020a](#)). No setor residencial, comercial e em indústrias leves, uma completa transição para soluções baseadas em eletricidade é concebível, por outro lado, em indústrias pesadas, a utilização de eletricidade é limitada e as soluções, muitas vezes, não são economicamente viáveis; ademais, os recentes e rápidos avanços em veículos elétricos podem ser responsáveis pelo aumento do uso de eletricidade no setor de transporte ([GIELEN et al., 2019](#)). Em cada setor de uso final, argumentam [Gielen et al. \(2019\)](#), há aplicações nas quais a eletricidade renovável pode substituir o uso de combustíveis fósseis, frequentemente com significativos ganhos de eficiência, e.g. um veículo elétrico é tipicamente três vezes mais eficiente do que um veículo de combustão interna. [IRENA \(2019a\)](#) estima que, em 2050, a eletricidade pode se tornar o principal vetor de energia, passando de menos de 20% do consumo final total para cerca de 50%. Uma matriz elétrica renovável será essencial para permitir que a eletrificação do futuro reduza os níveis de emissão de gases do efeito estufa ([LOSEKANN;](#)

HALLACK, 2018).

Para que se atinja um sistema energético baseado em energias renováveis, faz-se necessário superar importantes obstáculos tecnológicos – na geração, viabilização e implementação de soluções; e de infraestrutura – na integração das soluções. Enquanto o volume de investimentos em energias renováveis cresceu para a casa dos US\$ 300 bilhões anuais nos últimos anos (Figura 4.2), os gastos com P&D representaram cerca de 3% desse valor, o que é uma porcentagem baixa quando comparada com setores inovativos, como as TIC e a indústria automobilística (GIELEN *et al.*, 2019).

Entende-se, nesta dissertação, que as políticas públicas de inovação são centrais para a superação desses obstáculos, bem como para a realização efetiva da transição energética renovável. A revolução das energias renováveis vista até o momento é resultado de complexos processos de inovação e difusão tecnológicos que se desenrolaram ao longo de várias décadas em escala global, mas que não teriam ocorrido sem o comprometimento de governos, em esfera mundial, em P&D e difusão de tecnologias. Em particular, as tecnologias de turbinas eólicas e de células solares têm, em sua origem, grandes investimentos governamentais, que catalisaram seu desenvolvimento histórico ao redor do mundo, encorajaram o estabelecimento de novas empresas e estimularam seu crescimento através da criação de oportunidades de mercado (MAZZUCATO, 2014b).

## 4.2 ECONOMIA DA ENERGIA EÓLICA

### 4.2.1 Histórico e principais aspectos tecnológicos

A energia eólica – do latim *aeolicus*, em referência ao deus grego dos ventos Éolo – 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, ativamente, 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 em turbinas eólicas 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, 2014b). A partir de 2000, com a aplicação de políticas de promoção da energia eólica por diversos países, o mercado e as tecnologias eólicas se desenvolveram rapidamente.

A energia eólica é o processo pelo qual a energia cinética dos ventos é transformada em energia elétrica, através da movimentação de turbinas. Em linhas gerais, o funcionamento dá-se da seguinte maneira: quando o vento passa por uma turbina eólica, suas pás

capturam a energia cinética do vento e giram, transformando-o em energia mecânica. Essa rotação, então, gira um eixo interno, conectado a uma caixa de transmissão, que aumenta a velocidade de rotação e alimenta um gerador que, por sua vez, produz eletricidade através de eletromagnetismo. Tipicamente, as turbinas eólicas possuem uma torre tubular de, ao menos, 80 metros, que sustentam o nacele – que abriga o eixo horizontal, a caixa de transmissão, o gerador e os controles – e três pás. Pode-se classificar a energia eólica em duas categorias: *onshore*, na qual as turbinas são instaladas sobre o solo, e *offshore*, na qual as turbinas são instaladas no mar. O segmento *offshore* aproveita-se de um vento mais forte e estável, além de evitar longas distâncias na transmissão de eletricidade devido à concentração de grandes cidades ao longo das costas; por outro lado, incorre em custos de construção e manutenção consideravelmente maiores. Vale ressaltar, entretanto, que as tecnologias de turbinas *onshore* e *offshore* são altamente similares, diferenciando-se, significativamente, apenas no desenho de suas fundações (KUMAR *et al.*, 2016).

De maneira geral, há uma tendência em direção a turbinas de maior escala – torres mais altas, pás mais longas e rotores maiores – de forma a reduzir custos através de ganhos de escala e padronização. Essa tendência ancora-se no fato de que a produção de energia aumenta como uma função quadrática da área da superfície varrida pelas pás da turbina. Dessa forma, a capacidade das turbinas eólicas aumentou, significativamente, ao longo do tempo: nos anos 1980 e 1990, a turbina típica possuía capacidade de 50 a 75 kW; em 2019, a capacidade média foi de 2,76 MW<sup>1</sup> – as *onshore* com média de 2,6 MW e as *offshore* de 5,7 MW. A previsão é de que fiquem ainda maiores: em novembro de 2019, foi colocado em funcionamento um protótipo da maior turbina criada até então (12 MW), com pás de 107 metros e capacidade de geração de eletricidade para atender 16.000 residências europeias; outras empresas já visualizam turbinas da próxima geração com capacidade de 20 MW. A maior escala das turbinas é especialmente importante para projetos *offshore*, dado que maiores turbinas significam menos fundações, conversores, cabos, mão-de-obra e outros recursos são necessários para a mesma produção (REN21, 2020).

Ademais, o segmento *offshore* também foi responsável por avanços tecnológicos em turbinas flutuantes, que possuem grande potencial de expansão do segmento em locais onde a energia eólica *offshore* é viável e, economicamente, atrativa, pois permitem instalação de turbinas onde os ventos são mais fortes e consistentes e não onde a topografia do fundo do mar é adequada para a fixação das turbinas. Isso, inclusive, revitalizou o interesse no conceito de turbina eólica de eixo vertical – em contraponto às turbinas típicas de eixo horizontal –, dado que esses modelos possuem baixo centro de gravidade, o que é especialmente adequado para plataformas flutuantes. O avanço do segmento *offshore*, particularmente relacionado com tecnologias de flutuação, atraiu a atenção de grandes empresas de petróleo, como a *Shell*, para o setor (REN21, 2020).

Dentre as vantagens desse tipo de fonte de energia, destacam-se: a menor emissão

---

<sup>1</sup> 1 MW = 1000 kW.

média de gases do efeito estufa entre as tecnologias energéticas durante operação; a baixa necessidade de manutenção; a inesgotabilidade e gratuidade da força dos ventos – um recurso doméstico, isto é, que não demanda importação e não está sujeita a variações no seu preço –; e o baixo consumo de água. Por outro lado, pode-se elencar como desvantagens: o impacto no uso da terra – no caso do segmento *onshore*, dado que os parques eólicos se estendem por grandes áreas livres para aproveitar da melhor forma os ventos –; a poluição visual por conta do impacto estético das grandes turbinas; a poluição sonora, relacionada ao barulho da rotação das pás; e os impactos sobre a fauna – e.g. colisão com aves e morcegos. Ademais, assim como diversas outras energias renováveis, a energia eólica sofre de intermitência – grande variação das velocidades dos ventos ao longo do ano, implicando em desafios relacionados à estabilidade e confiabilidade na integração da energia eólica às redes elétricas (KUMAR *et al.*, 2016).

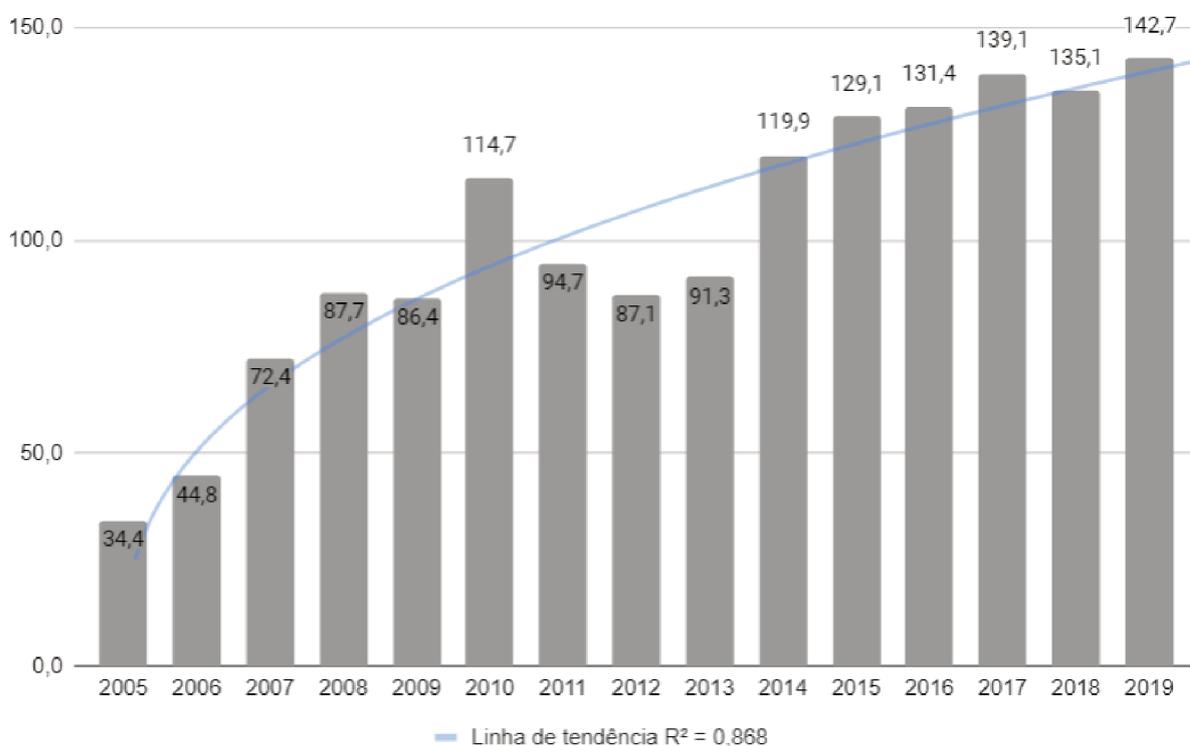
#### 4.2.2 Investimentos e capacidade instalada

Uma forma de verificar o aumento da importância da indústria eólica no setor energético pode ser obtida através da análise do fluxo de investimentos realizados no setor, nos últimos anos. A Figura 4.4 mostra os montantes globais de novos investimentos em energia eólica, realizados desde o ano de 2005 até 2019, em bilhões de US\$ de 2019. No gráfico, o surto de investimentos nos anos recentes fica bastante nítido: em média, o nível de investimentos anuais, no período de 2015-19, foi cerca de quatro vezes maior, em termos reais, em comparação ao nível registrado no ano de 2005. A linha de tendência, traçada no gráfico, demonstra que os novos investimentos estão se expandindo rapidamente, especialmente no início do período em questão.

A capacidade instalada acumulada para geração de energia elétrica também é um importante indicador do elevado crescimento da relevância da energia eólica no mundo. Na Figura 4.5, pode-se verificar o rápido crescimento da geração de energia elétrica eólica global: entre 2000 e 2019, a capacidade instalada cresceu 21% por ano, em média. Isso significa que, nesse período, em média, a capacidade instalada global dobrou a cada 3,5 anos, aproximadamente, até atingir 622 GW em 2019. A análise das adições líquidas, em cada ano, mostra um aumento do ritmo de expansão da capacidade de geração de eletricidade, a partir da fonte eólica, nos anos 2000: entre o ano 2001 e 2010, foram instalados, globalmente, em média, 16 GW por ano; já entre 2011 e 2019, essa média sobiu para para quase 50 GW por ano (IRENA, 2020).

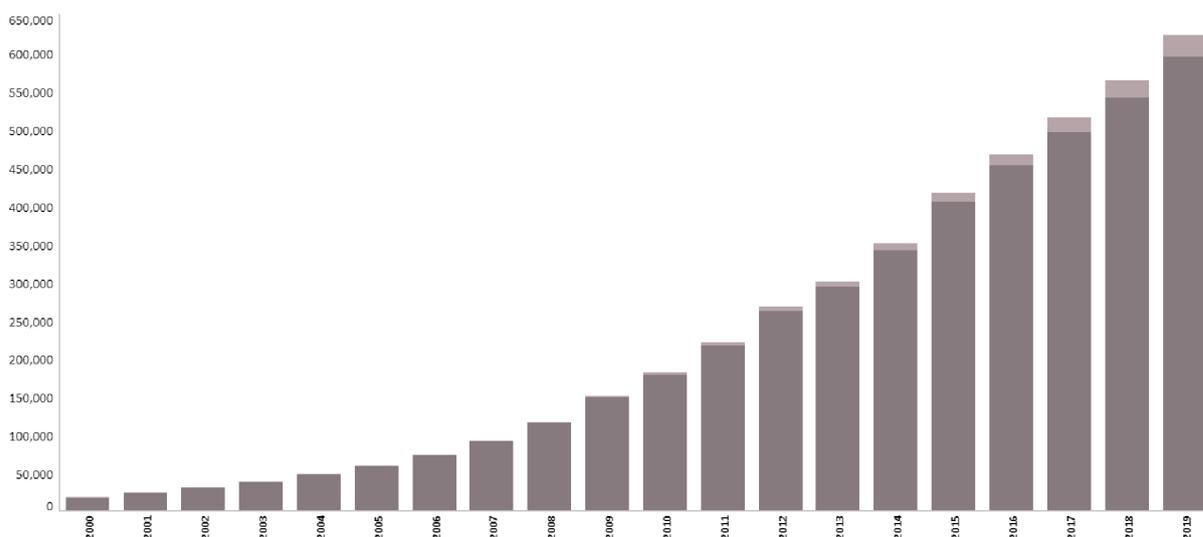
O segmento *onshore* (cinza escuro) domina o mercado e supera, em muito, o segmento *offshore* (cinza claro). Turbinas eólicas funcionando sobre o mar representam menos do que 5% da capacidade instalada total de geração de energia eólica global ao final do ano de 2019; entretanto, pode-se verificar um crescimento da relevância do segmento *offshore* na indústria eólica, cerca de 10% de toda adição de nova capacidade foram de turbinas funcionando em mar, em 2019, contra apenas 5%, em 2015 (REN21, 2020). Apesar

Figura 4.4 – Investimentos globais em energia eólica (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da IRENA (2020). Nota: valores deflacionados pela média anual do índice CPI-U.

Figura 4.5 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica *onshore* (cinza escuro) e *offshore* (cinza claro) (MW) – Mundo – 2000-2019



Fonte: IRENA (2020).

de a energia eólica *offshore* ser uma tecnologia relativamente nova em 2010, de lá para cá, verifica-se um rápido amadurecimento: a capacidade acumulada cresceu nove vezes, de 3

GW, em 2010, para 28 GW, em 2019 (IRENA, 2020c).

Ao desagregarmos a capacidade instalada total de geração de energia eólica entre os 10 principais países, desde os anos 2000, pode-se verificar a evolução, ao longo do tempo, dos maiores mercados para as tecnologias eólicas. Na Tabela 4.2, verifica-se que sete dos maiores mercados em 2000 permanecem no *top 10* em 2019, ainda que tenham ocorrido grandes mudanças na ordem, como: enquanto países como Alemanha, Espanha e Itália perdiam posições, países como Índia e China ganhavam posições. Ressalta-se a significativa participação da China no expressivo crescimento do mercado eólico, de 9º lugar com 0,3 GW<sup>2</sup> instalados em 2000, para a liderança mundial e mais de 210 GW instalados em 2019, o que representa uma participação de 33,8% no total global. Além da China, outros países em desenvolvimento se mostram importantes mercados para a indústria eólica, como: a Índia, que permaneceu no *top 10* durante todos os anos analisados e ficou em 4º lugar em 2019, com cerca de 37 GW instalados (6% do total mundial); e o Brasil, que no ano de 2015 já aparecia no *top 10*, ficou em 8º em 2019, com mais de 15 GW (2,5%).

Tabela 4.2 – Capacidade de energia eólica (MW) e participação no total mundial em 2019 (%) – *top 10* países – 2000-2019

<b>Rank</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2019 (% do total)</b>
<b>1º</b>	Alemanha 6.095	Alemanha 18.248	EUA 39.135	China 131.047	China 210.478 (33,8%)
<b>2º</b>	Dinamarca 2.390	Espanha 9.918	China 29.633	EUA 72.573	EUA 103.584 (16,6%)
<b>3º</b>	EUA 2.377	EUA 8.706	Alemanha 26.903	Alemanha 26.903	Alemanha 60.822 (9,8%)
<b>4º</b>	Espanha 2.206	Índia 4.433	Espanha 20.693	Índia 25.088	Índia 37.505 (6%)
<b>5º</b>	Índia 941	Dinamarca 3.127	Índia 13.184	Espanha 22.943	Espanha 25.553 (4,1%)
<b>6º</b>	Holanda 447	Itália 1.635	França 5.912	Reino Unido 14.305	Reino Unido 24.127 (3,9%)
<b>7º</b>	Reino Unido 412	Reino Unido 1.565	Itália 5.794	Canadá 11.214	França 16.260 (2,6%)
<b>8º</b>	Itália 363	Japão 1.227	Reino Unido 5.421	França 10.298	Brasil 15.363 (2,5%)
<b>9º</b>	China 341	Holanda 1.224	Canadá 3.967	Itália 9.137	Canadá 13.413 (2,2%)
<b>10º</b>	Grécia 226	Portugal 1.064	Dinamarca 3.801	Brasil 7.633	Itália 10.758 (1,7%)

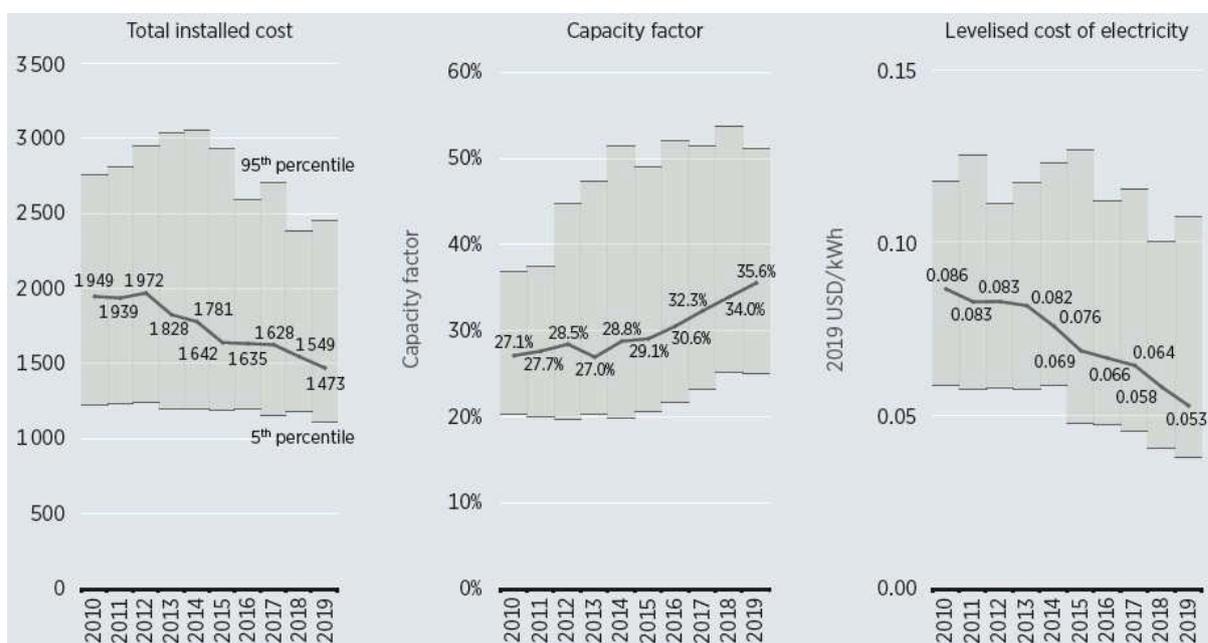
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da IRENA (2020).

<sup>2</sup> 1 GW = 1000 MW.

### 4.2.3 Características estruturais da indústria

Os preços das turbinas eólicas atingiram seu nível mais baixo entre 2000 e 2002, que foram seguidos por um forte aumento nos preços, devido a fatores como o aumento nos preços das *commodities* (e.g. cimento, cobre, ferro e aço), os gargalos na cadeia de suprimentos, e a introdução de modelos maiores e mais eficientes no mercado (IRENA, 2020c). À medida que as cadeias de suprimentos e as capacidades de produção aumentaram, os preços das turbinas, que tiveram como pico os anos entre 2007 e 2010, a depender do mercado, caíram desde então (entre 44 e 78%, em 2019) (IRENA, 2020c). A indústria eólica vem enfrentando as limitações inerentes de mercados e sistemas de energias, desenhados e otimizados para energia fóssil centralizada, através de inovações tecnológicas, de forma a reduzir os custos da energia eólica e integrá-la às redes elétricas de forma mais eficiente (REN21, 2020). Desse modo, a energia eólica emergiu nos últimos anos como uma das formas mais econômicas de adicionar nova capacidade de geração de eletricidade, refletindo em queda nos indicadores de custos e aumento no indicador de eficiência, tanto *onshore* (Figura 4.6) quanto *offshore* (Figura 4.7).

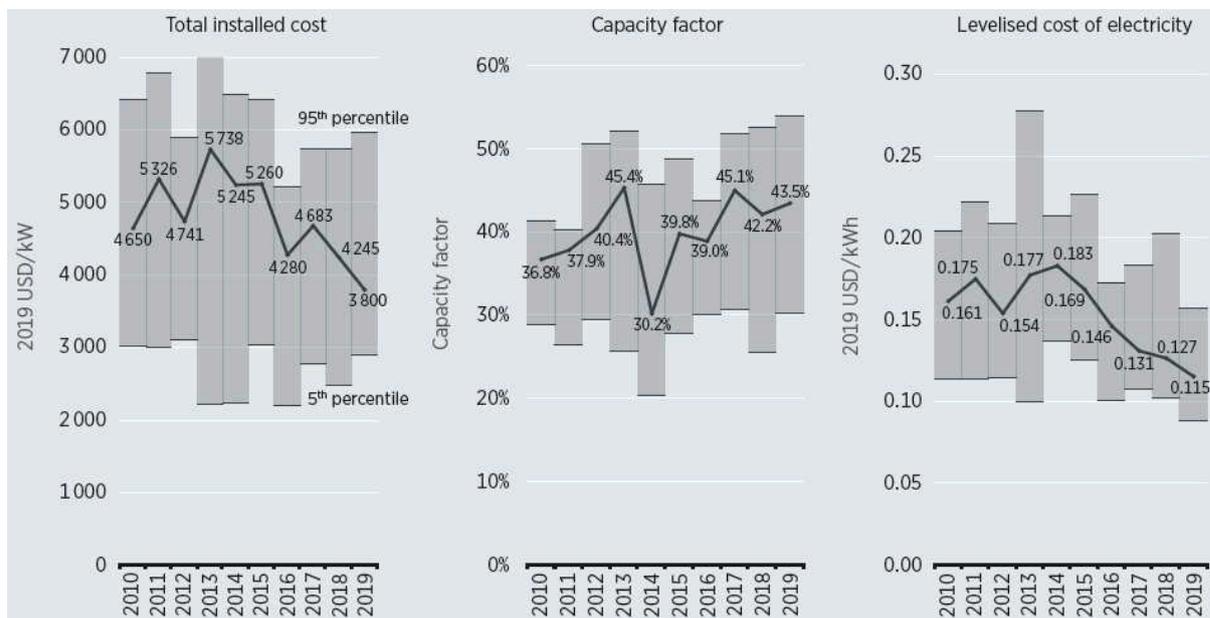
Figura 4.6 – Média ponderada de custos instalados, fatores de capacidade e LCOE para a energia eólica *onshore* – Mundo – 2010-2019



Fonte: (IRENA, 2020c).

Promovido pela queda nos preços das turbinas, significativo componente dos custos instalados dos projetos eólicos, os custos instalados médios ponderados globais de projetos *onshore* caíram 72%, entre 1983 e 2019 – de 5.179 para 1.473 US\$/kW, representando uma queda de 9% a cada duplicação da capacidade instalada de energia eólica no mundo. Os custos instalados de projetos *offshore*, por sua vez, aumentaram, entre 2010 e 2013 –

Figura 4.7 – Média ponderada de custos instalados, fatores de capacidade e LCOE para a energia eólica *offshore* – Mundo – 2010-2019



Fonte: (IRENA, 2020c).

de 4.650 para 5.738 US\$/kW –, na medida em que os projetos foram se movendo para pontos mais distantes da costa e em profundidades maiores, além do aumento na escala e complexidade dos projetos e crescimento dos preços da *commodities* no período. Depois do pico em 2013, os custos instalados caíram desde então, até atingir 3.800 US\$/kW, em 2019, por conta, dentre outros motivos, de melhorias no desenho das turbinas e na logística e de políticas e esquemas de apoio governamentais estáveis (IRENA, 2020c).

Pode-se verificar, na indústria eólica, um expressivo crescimento no fator de capacidade, que é a razão entre a produção efetiva de uma usina de geração de energia elétrica, em um período de tempo, e a capacidade total máxima nesse mesmo período, o que depende tanto da qualidade do vento no local da usina quanto da tecnologia empregada – grosso modo, uma *proxy* de eficiência. A tendência em direção de tecnologias de turbinas mais avançadas e eficientes, aliada com avanços na caracterização dos recursos eólicos, fez com que a produção de energia e o fator de capacidade crescessem na maioria dos mercados, nos últimos anos. Entre 1983 e 2019, o fator de capacidade global médio ponderado da energia eólica *onshore* cresceu de 20% para 36% – esse crescimento foi especialmente acentuado na última década (2009-2019), quando o fator de capacidade cresceu cerca de um terço, de 27% para 36%. Entre 2010 e 2019, o fator de capacidade global da *offshore* cresceu de 37% para 44% (IRENA, 2020c).

Entre 1983 e 2019, o LCOE (custo nivelado de energia elétrica) médio ponderado mundial dos projetos eólicos *onshore* caiu 83%, de 0,308 US\$/kWh para 0,053 US\$/kWh; sendo que, apenas na última década, a queda foi de 39%. A queda do custos da eletricidade

gerada a partir da fonte eólica *onshore*, foi promovida pelas melhorias nas tecnologias de turbinas e reduções nos custos totais instalados, que aumentaram o fator de capacidade e diminuíram os custos de operações e manutenções (O&Ms), especialmente através da utilização de turbinas de maior porte. A energia eólica *offshore*, por sua vez, apresenta um custo significativamente maior do que a *onshore*, principalmente por conta dos maiores custos de construção e manutenção das instalações no mar. Entretanto, o LCOE médio ponderado mundial dos projetos eólicos *offshore* apresentou rápida queda, 29%, de 0,161 US\$/kWh, em 2010, para 0,115 US\$/kWh, em 2019. Ademais, os resultados de leilões recentes para projetos planejados para serem comissionados em 2023 representam um grande avanço no quesito de competitividade, com preços caindo para a faixa de 0,05 e 0,1 US\$/kWh (IRENA, 2020c).

A transição global dos esquemas de *feed-in tariffs* em direção de esquemas de leilões alterou, fundamentalmente, a economia da indústria eólica, reforçando a tendência de quedas nos custos, na medida em que aumenta a competitividade, em toda a cadeia de suprimentos, do desenvolvimento à O&Ms, em escala local e global (IRENA, 2020c; REN21, 2020). Ao mesmo tempo em que os preços declinantes abriram as portas de novos mercados para a energia eólica e aumentaram suas vendas, essa transição para leilões resultou em intensa competição de preço, reduzindo o número e a diversidade de participantes no mercado e conduzindo a maiores atritos entre produtores de turbinas (REN21, 2020). Segundo o relatório da REN21 (2020), a indústria eólica já teve mais de 100 fornecedores de turbinas ao longo dos anos, com um pico de 63 fornecedores reportando instalações ao longo do ano de 2013. Esse número, porém, vem caindo rapidamente desde 2015.

Em consequência dessa concorrência severa, verifica-se uma maior consolidação dos produtores de turbinas eólicas, favorecendo grandes multinacionais em detrimento de atores menores: dos 33 produtores que forneceram turbinas para o mercado global em 2019, os 10 maiores representaram 85,5% do mercado global durante o ano – contra 75%, em 2016 –; apenas as quatro maiores empresas – *Vestas* (Dinamarca), *Siemens-Gamesa* (Alemanha-Espanha), *Goldwind* (China) e *GE Renewable Energy* (EUA) – representaram, juntas, cerca de 55% da capacidade instalada no ano de 2019 (REN21, 2020). Com relação às empresas, a líder do setor, em 2018, foi a dinamarquesa *Vestas*, pioneira na indústria de turbinas eólicas, com participação de mercado de 20,3%; com relação a países, destaca-se a China, que concentrou cinco das empresas do *top 10* do setor, em 2018 – em ordem, *Goldwind* (terceira colocada do mundo), *Envision*, *Mingyang*, *Guodian* e *Sewind* –, com uma participação combinada no mercado global de 32,2% (REN21, 2019).

### 4.3 ECONOMIA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

#### 4.3.1 Histórico e principais aspectos tecnológicos

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, 2014b). 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.

Na captação da energia solar fotovoltaica ocorre a conversão de luz solar – energia luminosa – em energia elétrica, através de células solares fotovoltaicas, montadas em módulos, feitas de materiais semicondutores que apresentam efeito fotovoltaico – que é a geração de voltagem e corrente elétrica, a partir da exposição à luz –, geralmente de silício cristalino. O funcionamento se dá, resumidamente, da seguinte forma: as partículas de luz solar, quando entram em contato com os átomos de silício, provocam o deslocamento dos elétrons, gerando, assim, uma corrente elétrica – a qual passa por inversores que mudam a corrente de contínua para alternada –, que é usada para carregar uma bateria. Os sistemas fotovoltaicos podem ser instalados no solo, em telhados, em paredes ou em bases flutuantes, de maneira fixa ou utilizando um rastreador solar para seguir o movimento do sol, em diferentes escalas de capacidade, conectados ou não à rede elétrica.

Ademais, classifica-se a energia solar fotovoltaica em: distribuída, relacionada com a geração de eletricidade em residências e estabelecimentos comerciais e industriais; e centralizada, que são conectadas às redes de distribuição de forma análoga às demais fontes. Em países da Europa, é grande a importância da geração distribuída, e.g. na Alemanha menos de 20% da energia solar fotovoltaica é centralizada; enquanto, em países latino-americanos, nos quais os leilões de energia têm sido importantes para promover a energia solar fotovoltaica, o segmento predominante é a centralizada (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Atualmente, as principais categorias de tecnologias fotovoltaicas são as de silício cristalino (mono e multicristalino) e de películas finas – que inclui o telureto de cádmio (CdTe), silício amorfo (a-Si), e as baseadas em cobre, índio, gálio e selênio (CIGS). A maior demanda por módulos mais eficientes está levando o mercado de energia solar fotovoltaica em direção da tecnologia PERC (*Passivated Emitter Rear Cell*) – que, por conta de seus ganhos de eficiência, já se tornou o novo padrão para células solares de silício monocristalino –, ao mesmo tempo em que se miram tecnologias de próxima geração, como

a HJT (*Heterojunction Cell Technology*), e novos materiais, como a perovskita (REN21, 2020).

Dentre as vantagens, tem-se a baixa emissão de gases nocivos ao meio ambiente durante operação, a inesgotabilidade, disponibilidade e magnitude do recurso utilizado – a luz do Sol –, a possibilidade de instalação de módulos fotovoltaicos em regiões distantes ou isoladas, a longa vida útil e a baixa necessidade de manutenção dos equipamentos – especialmente por não possuir partes mecanicamente móveis –, e o baixo consumo de água. Ademais, quando comparados com fontes convencionais como combustíveis fósseis e energia nuclear, poucos investimentos foram direcionados para o desenvolvimento de células e módulos solares, o que significa que há, ainda, um significativo espaço para melhorias na sua eficiência. A energia solar é, especialmente, benéfica para países em desenvolvimento, posto que a maior parte desses países se concentra em regiões tropicais e sub-tropicais, nas quais há um ótimo acesso à irradiação solar (DEVABHAKTUNI *et al.*, 2013). Por outro lado, dentre as principais limitações da fonte solar fotovoltaica, pode-se elencar o impacto sobre o uso da terra, o processo produtivo das células e módulos, que é intensiva em energia e envolve químicos altamente tóxicos ao meio ambiente – por conta da elevada exigência de matéria-prima, como o silício, para fabricação dos equipamentos –, e a intermitência do nível de insolação ao longo do ano.

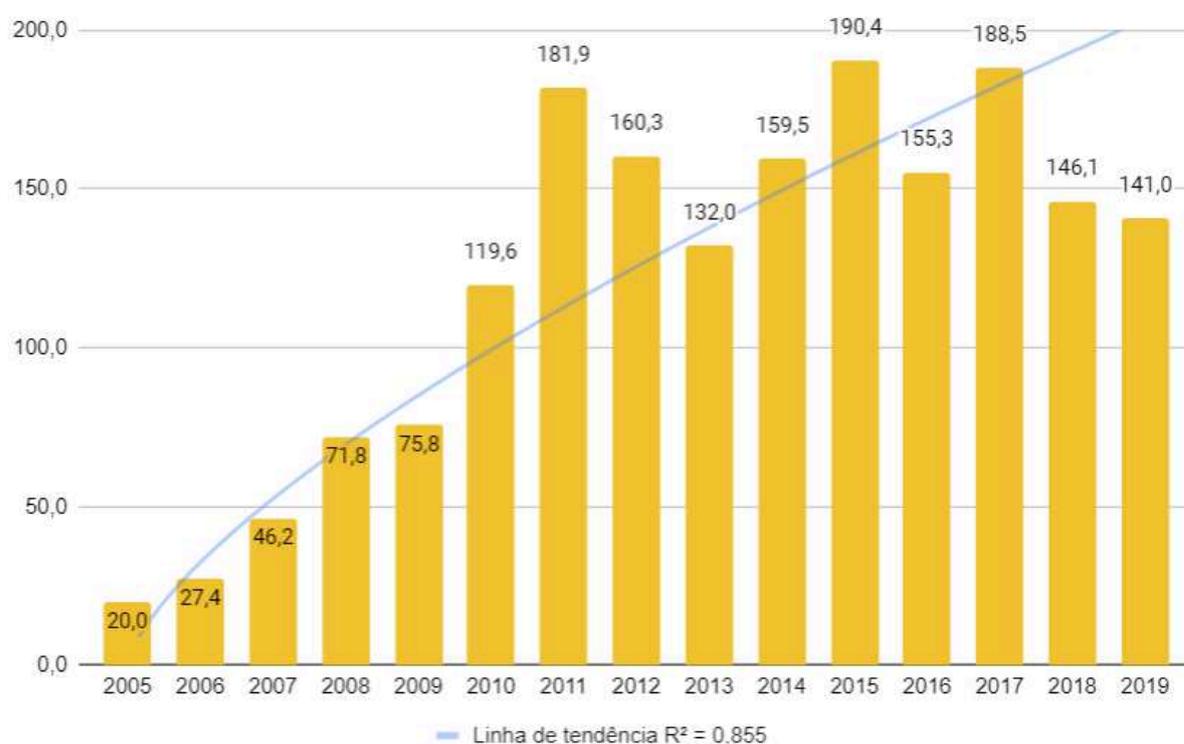
### 4.3.2 Investimentos e capacidade instalada

Uma forma de verificar o aumento da importância da fonte solar para a geração de energia elétrica pode ser através da análise do fluxo de investimentos realizados. A Figura 4.8 mostra os montantes de novos investimentos em energia solar<sup>3</sup>, realizados globalmente, desde o ano de 2005 até 2019, em bilhões de US\$ de 2019. O surto de investimentos nos anos recentes é ainda mais impressionante do que o verificado na energia eólica: em média, o nível de investimentos anuais no período de 2011-19 foi mais que oito vezes maior, em termos reais, em comparação ao nível registrado no ano de 2005. A linha de tendência, traçada no gráfico, demonstra o forte ritmo de crescimento dos novos investimentos em energia solar no período.

A capacidade instalada acumulada de geração de energia elétrica também é um importante indicador do elevado crescimento da energia solar no mundo. Na Figura 4.9, verifica-se o expressivo crescimento da capacidade instalada global, para geração de energia solar fotovoltaica, em específico: entre 2000 e 2019, cresceu cerca de 41% por ano em média. Nesse período, em média, a capacidade instalada dobrou a cada dois anos, aproximadamente, até atingir 578 GW, em 2019. Segundo a REN21 (2019), a energia solar fotovoltaica é a tecnologia energética de maior crescimento no mundo. Ainda assim, em

<sup>3</sup> Esses números incluem uma parcela minoritária direcionada à energia solar heliotérmica, alternativa menos difundida de obtenção de energia solar. A fonte heliotérmica representou apenas 1% do total gerado de energia solar em 2019 (IRENA, 2020).

Figura 4.8 – Investimentos globais em energia solar (bilhões de US\$ de 2019) – Mundo – 2005-2019

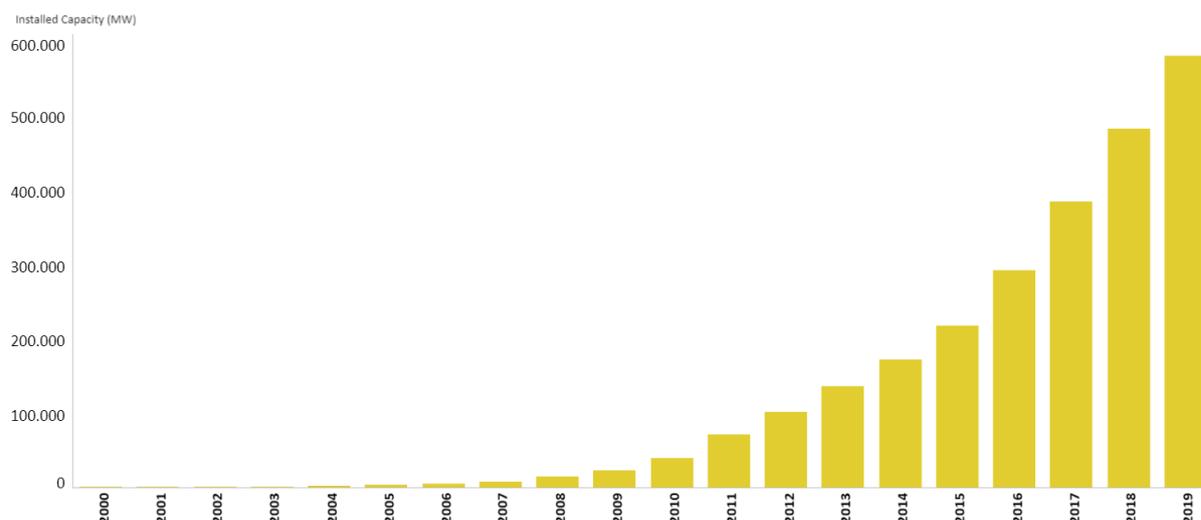


Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da [IRENA \(2020\)](#). Nota: valores deflacionados pela média anual do índice CPI-U.

nível, fica atrás da energia eólica em 2019 ([IRENA, 2020](#)). A análise da adição líquida de capacidade a cada ano, entretanto, mostra que ela pode tomar a liderança nos próximos anos, dado que o ritmo de expansão da capacidade global vem se acelerando consideravelmente: entre 2000 e 2009, a média de adição de capacidade foi de cerca de 2 GW por ano; entre 2010 e 2015, essa média saltou para mais de 32 GW por ano; entre 2016 e 2019, a média passou dos 90 GW anuais ([IRENA, 2020](#)). Ao compararmos com as adições anuais de energia eólica, verifica-se que a energia solar fotovoltaica partiu de uma média bastante inferior no início dos anos 2000, e alcançou uma média consideravelmente superior nos últimos anos.

Ao desagregarmos a capacidade de geração de energia solar fotovoltaica entre os principais países, desde os anos 2000, verifica-se, novamente, uma importante reconfiguração dos principais mercados para tecnologias fotovoltaicas. Na Tabela 4.3, verificam-se importantes reconfigurações no mercado mundial de energia solar fotovoltaica, posto que apenas cinco países dos maiores mercados em 2010 também aparecem no *top 10* de 2019. Além disso, países como Japão, EUA e Alemanha perderam posições, e a China subiu no *ranking* e, em 2015, já aparecia como o maior mercado mundial. Verifica-se, novamente, a significativa participação da China no expressivo crescimento do mercado solar fotovoltaico, de 4º lugar em 2000, com capacidade de 0,03 GW, até se tornar o líder mundial, com mais

Figura 4.9 – Capacidade instalada de geração de energia solar fotovoltaica (MW) – Mundo – 2000-2019



Fonte: IRENA (2020).

de 205 GW, em 2019, o que representou 35,4% do mercado mundial naquele ano. A Índia, que, em 2015, já aparecia no *top 10*, também se mostra um país em desenvolvimento com importante mercado – com mais de 34 GW instalados em 2019 (6% do total mundial). Por sua vez, o Brasil fica para trás e não aparece entre os 10 maiores mercados em nenhum dos anos – em 2019, a capacidade instalada brasileira era de apenas 2,5 GW (0,43%) (IRENA, 2020).

### 4.3.3 Características estruturais da indústria

Entre dezembro de 2009 e dezembro de 2019, os preços dos módulos solares de silício cristalino caíram, em média, 90% (IRENA, 2020c). Ainda que a escala de produção e o acúmulo de experiência tenham sido, parcialmente, responsáveis por essa significativa redução de preços, as recentes reduções nos custos dos módulos solares estão intimamente relacionadas com as inovações tecnológicas: a otimização dos processos produtivos e os ganhos de eficiência estão associados à crescente adoção de células com novas arquiteturas, e.g. a transição do mercado em direção das arquiteturas PERC e similares, que já representaram 60% do mercado em 2019 (IRENA, 2020c). Estima-se que ao final de 2018, havia 15 diferentes tecnologias de módulos solares (REN21, 2019). A eficiência média de módulos cristalinos cresceu de 14,7%, em 2010, para 19,2%, em 2019, o que se traduz na necessidade de áreas menores para uma determinada potência, isto é, a maior eficiência do módulo reduz, diretamente, os custos do módulo por *watt* (IRENA, 2020c). Isso refletiu em queda nos indicadores de custos e aumento no indicador de eficiência, expressas na Figura 4.10.

O custo instalado médio ponderado global de projetos comissionados, em 2019, foi

Tabela 4.3 – Capacidade de energia solar fotovoltaica (MW) e participação no total mundial em 2019 (%) – top 10 países – 2000-2019

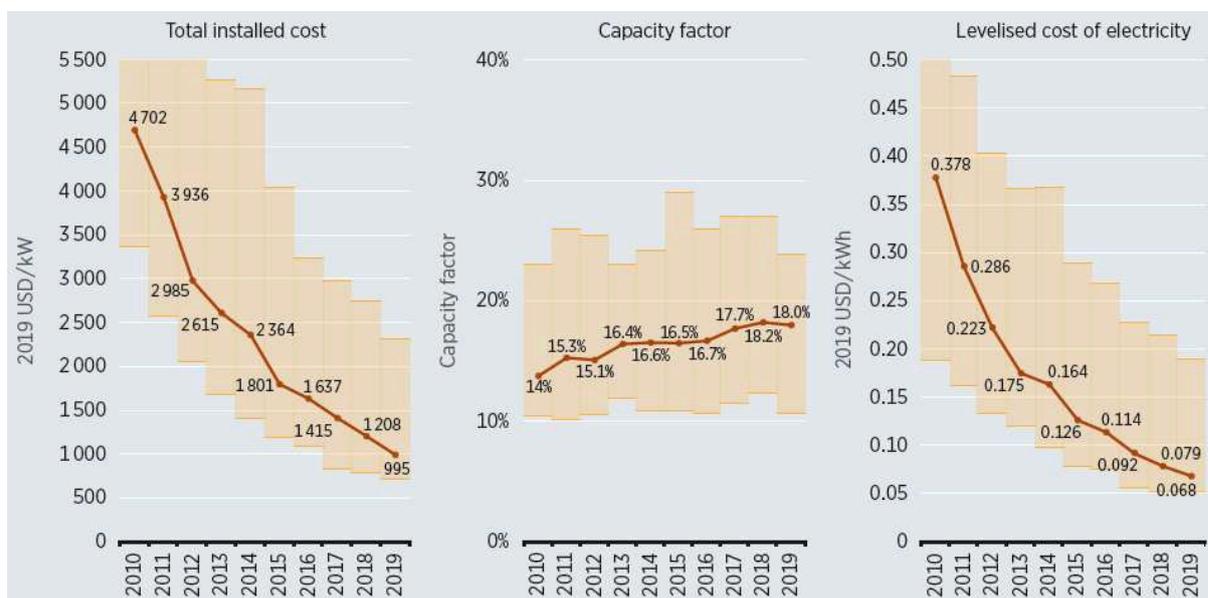
<b>Rank</b>	<b>2000</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2019 (% do total)</b>
<b>1º</b>	Japão 330	Alemanha 2.056	Alemanha 18.004	China 43.537	China 205.072 (35,4%)
<b>2º</b>	EUA 176	Japão 1.421	Espanha 3.873	Alemanha 39.222	Japão 61.840 (10,7%)
<b>3º</b>	Alemanha 114	EUA 493	Japão 3.599	Japão 28.615	EUA 60.539 (10,5%)
<b>4º</b>	China 33	China 141	Itália 3.592	EUA 21.684	Alemanha 48.960 (8,5%)
<b>5º</b>	Austrália 25	Austrália 52	EUA 2.909	Itália 18.901	Índia 34.831 (6%)
<b>6º</b>	Itália 19	Espanha 52	Tchéquia 1.727	Reino Unido 9.601	Itália 20.900 (3,6%)
<b>7º</b>	Suíça 16	Holanda 51	Austrália 1.088	França 7.137	Austrália 15.928 (2,8%)
<b>8º</b>	México 14	Itália 34	França 1.044	Austrália 5.943	Reino Unido 13.398 (2,3%)
<b>9º</b>	Holanda 13	Suíça 28	China 1.021	Índia 5.364	França 10.562 (1,8%)
<b>10º</b>	Espanha 10	Luxemburgo 23	Bélgica 1.007	Espanha 4.704	Coreia do Sul 10.505 (1,8%)

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da [IRENA \(2020\)](#).

de 995 US\$/kW, o que representa uma queda de 79% quando comparado com 2010. No nível global, as reduções de custos nos módulos e nos inversores foram responsáveis por cerca de 62% dessa queda. O fator de capacidade da energia solar fotovoltaica centralizada, relativamente baixo, cresceu de 14%, em 2010, para 18%, em 2019. Esse crescimento foi promovido, especialmente, por conta do crescimento das implementações em regiões com maior irradiação solar. Entretanto, apesar desse crescimento constante de 2010 em diante, o fator de capacidade parece estar se estabilizando, em torno de 18%, desde 2018. Por fim, entre 2010 e 2019, o LCOE médio ponderado global de novos projetos solares fotovoltaicos centralizados caiu impressionantes 82%, de 0,378 US\$/kWh, em 2010, para 0,68 US\$/kWh, em 2019. O rápido declínio nos custos instalados, o aumento no fator de capacidade e a redução nos custos de O&Ms contribuíram para essa significativa queda no custo da eletricidade fotovoltaica, assim como para a melhoria de sua competitividade ([IRENA, 2020c](#)).

A transição de *feed-in tariffs* para de leilões também alterou, fundamentalmente, a economia da indústria solar fotovoltaica, e os decorrentes preços declinantes apresentaram caráter dual. Por um lado, os preços declinantes auxiliaram na abertura significativa de

Figura 4.10 – Média ponderada de custos instalados, fatores de capacidade e LCOE para a energia solar fotovoltaica – Mundo – 2010-2019



Fonte: (IRENA, 2020c).

novos mercados, encorajaram expansão e melhoria na eficiência da produção, a entrada de novas empresas no setor e uma contínua busca por inovações – encorajando, também, maiores investimentos em tecnologias fotovoltaicas, especialmente em células e módulos solares, de forma a aumentar, ainda mais, a eficiência e diminuir os custos; por outro lado, preços baixos recordes nos leilões, resultado dos menores preços das células e dos módulos solares, da intensa concorrência e de incertezas nas políticas, resultaram em margens de lucro pequenas para alguns produtores, e trouxeram uma maior consolidação no setor (REN21, 2019; REN21, 2020). Em 2018, os 10 maiores fornecedores de módulos comercializaram, aproximadamente, 60% do total do ano (REN21, 2019); entretanto, isso ainda fica atrás da concentração observada na indústria eólica (85% em 2018) (REN21, 2020).

Novamente, verifica-se domínio da China: em 2018, sete das empresas do *top 10* são chinesas, incluindo as quatro primeiras – em ordem: *JinkoSolar*, *JA Solar*, *Trina Solar*, *LONGi Solar*, *Risen*, *GCL-SI* e *Talesun* (REN21, 2019). Além disso, do volume total de células e módulos vendidos pelas 10 maiores empresas, em 2019, mais de 80% foram efetivadas por empresas chinesas (REN21, 2020). Segundo, ainda, o relatório da REN21 (2019), o país chinês domina, também, os preços das células e dos módulos, influenciando as margens de outros produtores: a inundação de células e módulos solares chineses no mercado global, nos anos recentes, resultou no excesso de oferta e queda nos preços.

## 4.4 LOCK-IN E AS ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

### 4.4.1 Especificidades do *lock-in* brasileiro e as energias renováveis

Atualmente, o Brasil é o 9º maior consumidor de energia total e 8º de eletricidade do mundo, e o maior país da América Latina nesses dois indicadores; apesar disso, o país é apenas o 14º maior emissor de CO<sub>2</sub>, por meio de queima de combustível (ENERDATA, 2019). Analisando a matriz energética brasileira, verifica-se que um motivo para isso é a relativa baixa participação dos combustíveis fósseis na geração de energia no país, 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 (IEA, 2020a). A taxa de eletrificação brasileira, relativamente estável durante os últimos 30 anos, se encontra próxima da média mundial, em 2018, 19,4% (IEA, 2020a). Quando se analisa a matriz de geração de energia elétrica, verifica-se, novamente e de forma ainda mais clara, que a participação dos combustíveis fósseis é bastante limitada no Brasil. Os combustíveis fósseis representaram somente 15% da oferta de eletricidade brasileira, em 2018 – significativamente baixa quando contrastado com o verificado no mundo como um todo (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 corroboram o argumento de que o problema do *carbon lock-in*, no Brasil, ainda que presente, pode ser menos intenso do que em outras partes do mundo. Uma evidência disso é o fato de que as energias renováveis – componentes centrais da superação do *carbon lock-in* – são um caso de sucesso na matriz 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, ficando atrás apenas da Noruega e Nova Zelândia (ENERDATA, 2019).

Entretanto, Ferrazo (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 grande relevância na gigante estatal Petrobras, 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 toda a sua trajetória, segundo argumenta Ferrazo (2016), 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, o modelo rodoviário, e.g. carros e caminhões, com a instalação da indústria automobilística de origem estrangeira – como motores da industrialização e de desenvolvimento do país (ORENSTEIN; SOCHACZEWSKI, 2014). Dessa trajetória, atualmente, o setor automobilístico representa cerca de 3% do PIB – e 18% do PIB da indústria de transformação, demonstrando como a estrutura produtiva brasileira é dependente dessa indústria intensiva em carbono – e emprega, direta e indiretamente, 1,3 milhão de pessoas, o que coloca o país como 8º maior produtor e 6º maior mercado interno (ANFAVEA, 2020).

Do ponto de vista político-institucional, Ferrazo (2016) argumenta que as instituições e a estrutura de poder estabelecidas, com o tempo, formam um sistema rígido e inapto a mudanças, não dando espaço para as inovações e perpetuando escolhas que garantem resultados positivos para o poder hegemônico no setor energético. Por exemplo, 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 teriam muito a perder com ações para mudanças na matriz energética, no que tange ao consumo, já que muitos investimentos em bens de capitais seriam perdidos (FERRAÇO, 2016). Além disso, segundo Melo *et al.* (2016), o Ministério de Minas e Energia (MME), órgão responsável pela formulação e implementação de políticas e programas estruturais, no âmbito do setor energético, enfrenta forte influência da própria 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, que são tecnologias mais maduras, devido sua trajetória tecnológica: calculados pela INESC (2020), tais incentivos e subsídios, em ritmo crescente desde 2017, 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) nesse mesmo ano. Segundo o relatório, também falta transparência com relação às informações sobre quais são as empresas beneficiárias dos subsídios e os montantes.

No entanto, a característica central do sistema elétrico brasileiro é a elevada dependência da fonte hidrelétrica. Historicamente, o setor de eletricidade brasileiro foi estruturado ao redor do planejamento centralizado da exploração dos recursos hidrelétricos do país, para gerar energia para a industrialização e o desenvolvimento econômico, especialmente após a instauração do governo militar ditatorial, nos anos 1960 (BRADSHAW, 2017).

Criada em 1962, a estatal Eletrobras já era a maior empresa de geração de eletricidade no Brasil, na década de 1970 e, durante os anos 1970 e 1980, as companhias de eletricidade públicas realizaram elevados investimentos em grandes represas e em transmissão e distribuição de hidroeletricidade (FURTADO; PERROT, 2015). Como resultado dessa trajetória histórica, da abundância de recursos hidrelétricos e da capacidade tecnológica acumulada, constata-se que a fonte hidrelétrica tem participação elevadíssima, cerca de dois terços do total – enquanto a participação na matriz elétrica mundial é de apenas 16% (IEA, 2020a). Dessa forma, o Brasil se encontra num cenário peculiar: ainda que as energias renováveis sejam um caso de sucesso no Brasil, isso se deve, principalmente, à participação das hidroelétricas, que é uma tecnologia já bastante madura, conhecida e estabelecida<sup>4</sup>, enquanto as fontes renováveis modernas, 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 junto 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, tanto física quanto institucional, continuou a criar restrições importantes à adoção de formas alternativas de energia (BRADSHAW, 2017). 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 normalmente muito baixo em comparação com outras fontes importantes 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) ressaltam também que a própria Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é influenciada por empresas do setor de eletricidade (especialmente empresas de distribuição), que são contrárias ao desenvolvimento de geração distribuída, e.g. solar fotovoltaica, e podem colocar obstáculos às iniciativas da agência nesse sentido. Ademais, assim como no caso da exploração petrolífera do pré-sal, a perpetuação do padrão baseado em hidrelétricas, centralizadas e de grande porte, envolvem os interesses estabelecidos de grandes construtoras (FERRAÇO, 2016).

Nos anos 1990, com a redemocratização política e as reformas de mercado, a

<sup>4</sup> A primeira usina hidroelétrica da América Latina – rio Paraibuna, em Juiz de Fora – foi inaugurada em 1889 (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

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<sup>5</sup> e criando agências reguladoras –, que, entretanto, falhou em atrair investimentos suficientes em capacidade instalada (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 necessária 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 brasileira, nos anos 1990, resultou em escassez de oferta elétrica, apagões generalizados, e levou o sistema elétrico a uma crise (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; FRAUNDORFER; RABITZ, 2020) – o governo forçou um corte de energia para 20% dos consumidores residenciais e industriais, causando imensos custos sociais (MELO *et al.*, 2016). Tal evento expôs as vulnerabilidades estruturais do sistema de eletricidade altamente baseado em hidrelétricas (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Desde então, o Brasil passou a registrar, com maior frequência, eventos climáticos extremos, com volume de chuvas significativamente abaixo das médias (AVELINO, 2020). Aliado a isso, destaca-se o fato de que 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 (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; LOSEKANN; HALLACK, 2018), além do comprometimento brasileiro com a redução das emissões causadoras das mudanças climáticas (AVELINO, 2020).

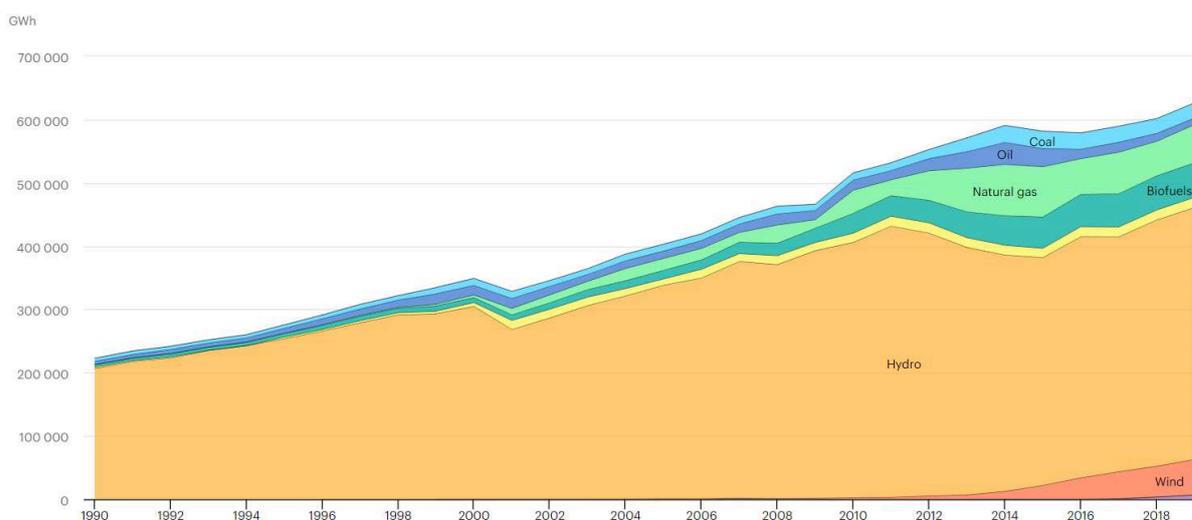
O ímpeto político gerado pela crise energética resultou na implementação de políticas de promoção das energias renováveis, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002 (BRADSHAW, 2017). Dessa forma, desde que a administração do Presidente Lula tomou posse em 2003, o setor de eletricidade brasileiro se caracterizou por uma intervenção estatal mais forte e um portfólio de políticas em constante expansão, com o objetivo de ampliar e diversificar o fornecimento de energia renovável (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Nesse período, portanto, o Es-

<sup>5</sup> Em 2020, um incêndio na subestação Macapá – sob controle de uma empresa privada multinacional, a espanhola Isolux – levou ao desligamento de linhas de transmissão e de usinas hidrelétricas, fazendo com que 14 dos 16 municípios do Amapá ficassem sem energia, em meio a pandemia do COVID-19. Apesar do acidente ter ocorrido em uma empresa privada, os governos federal e estadual precisaram atuar para providenciar o conserto.

tado brasileiro passou a recuperar seu papel central no planejamento elétrico nacional e, apesar da coexistência de empresas privadas e públicas no setor, 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). Entretanto, em 2016, o governo que assumiu após o processo de “*impeachment*” da Presidente Dilma promoveu mudanças significativas na governança energética, retomando o processo de privatização, com objetivo de reduzir o papel do Estado; o atual governo sinaliza a continuação desse processo com o Projeto de Lei Nº 5.877, de 2019, que dispõe sobre a privatização da Eletrobras (AVELINO, 2020).

A evolução da matriz de geração de energia elétrica no Brasil, ao longo do período entre 1990 e 2019, está representada na Figura 4.11. O sistema elétrico brasileiro passou por significativas 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. Nos últimos anos, enquanto a hidrelétrica mantém sua relativa estagnação, a fonte eólica expandiu consideravelmente, ao passo que a fonte solar fotovoltaica, apesar do crescimento após 2017, ainda continua com uma participação baixa (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Dentre as energias renováveis, verifica-se que, em 2019, a principal fonte continuava sendo a hidrelétrica (então com uma participação menor, cerca de 63,5% do total), seguida pela eólica (8,9%), biomassa (8,7%) e solar fotovoltaica (1,1%) (IEA, 2020a).

Figura 4.11 – Geração de energia elétrica por fonte (GWh) – Brasil – 1990-2019



Fonte: IEA (2020a).

Além do crescimento das fontes renováveis, porém, verifica-se também um preocupante crescimento de fontes fósseis, como o gás natural e o carvão, tanto em termos absolutos quanto relativos (IEA, 2020a). Argumenta-se, portanto, que a tendência de

diversificação da matriz elétrica brasileira, realizada nos últimos anos, tem mais relação com os problemas resultantes da forte dependência de apenas uma fonte de eletricidade perto dos seus limites (as hidrelétricas), e menos com as preocupações ambientais de descarbonizar o setor elétrico. 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.

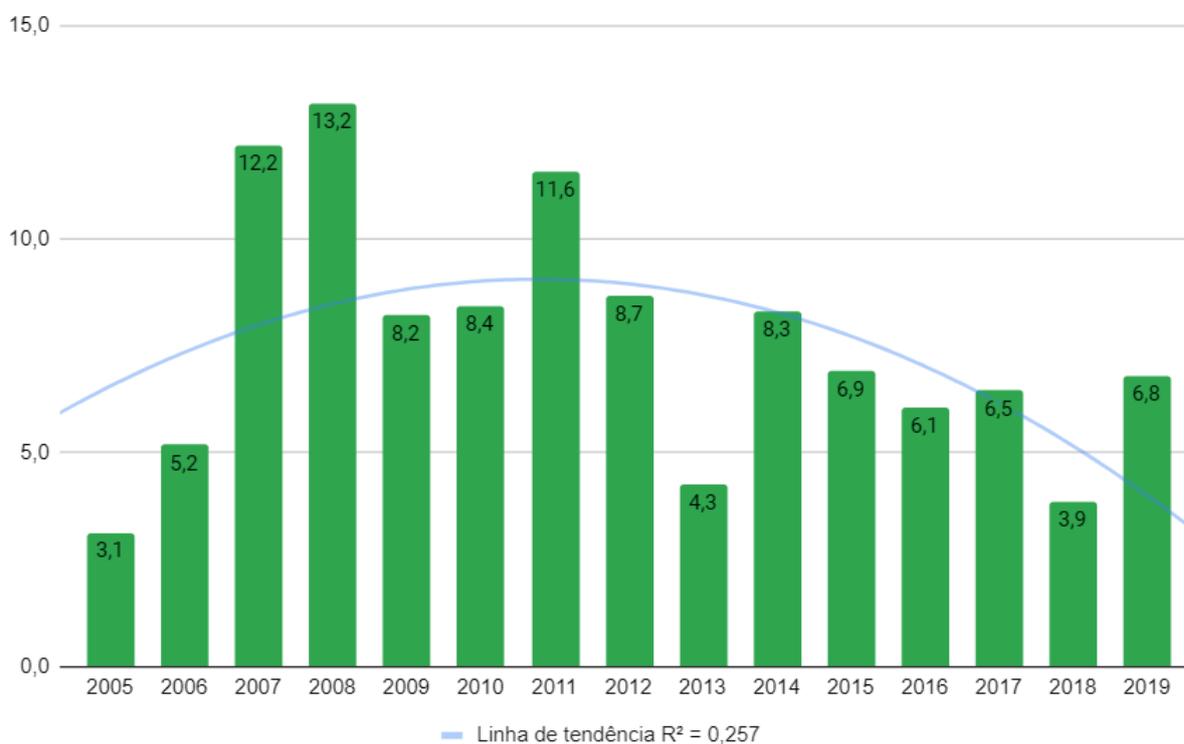
A Figura 4.12 apresenta os montantes de novos investimentos em energias renováveis, realizados desde o ano de 2005 até 2019, em bilhões de US\$ de 2019, no Brasil. A linha de tendência traçada no gráfico, aliada ao seu baixo  $R^2$ , demonstra que os investimentos brasileiros em energias renováveis ocorreram de maneira errática, sem uma tendência definida, na contramão do surto de investimentos verificados globalmente no setor (Figura 4.2). Esses montantes demonstram, ainda, que os investimentos em energias renováveis são marginais em comparação com o que ainda é destinado ao petróleo e às termoelétricas a carvão e gás no país: o investimento de US\$ 6,8 bilhões, em 2019, representou menos do que um terço<sup>6</sup> do que foi destinado apenas pelo governo, em forma de subsídios, para a produção e consumo de combustíveis fósseis no mesmo ano.

Particularmente, nos últimos anos, nos quais se verifica um crescimento do volume anual de investimentos, especialmente em energia eólica (Figura 4.4) e solar (Figura 4.8), os investimentos brasileiros perderam força: a média anual, em termos reais, passou de cerca de US\$ 10,4 bilhões, no período entre 2007 e 2012, para cerca de 6,1 bilhões, entre 2013 e 2019. Em 2019, o investimento total em energias renováveis, no Brasil, foi de US\$ 6,8 bilhões, o que representou um significativo crescimento relativo a 2018, mas que ainda se encontra em patamares muito abaixo do verificado em 2008, momento em que o *boom* dos biocombustíveis estava em pleno vapor no país; dentre esses investimentos, em 2019, verifica-se que a maior parte foi destinada à adição de novas capacidades (6,5 bilhões), dos quais as energias eólica (3,4) e solar (2,5) dominaram grandes parcelas ([REN21, 2020](#)).

Além da abundância de recursos renováveis – fortes ventos e alta irradiação solar, como se detalha na próxima subseção –, outra razão que mostra que as fontes renováveis são favoráveis no Brasil é a limitada oferta de recursos fósseis para geração de energia elétrica: por exemplo, o carvão e o gás natural representam entre 40 e 60% da importação de energia primária do Brasil; e outra, ainda, é o fato de que as reservas de carvão brasileiras são consideradas de má qualidade ([AQUILA \*et al.\*, 2017](#)). Nesse sentido, argumentam [Aquila \*et al.\* \(2017\)](#), uma estratégia que busque aumentar a oferta de energia através do carvão e do gás natural envolve importação de recursos energéticos, o que aumenta a exposição do país à incerteza macroeconômica das variações do câmbio. Além disso,

<sup>6</sup> Considerado a taxa de câmbio anual em 2019 entre Real e Dólar de 3,9451.

Figura 4.12 – Investimento em energias renováveis (bilhões de US\$ de 2019) – Brasil – 2005-2019



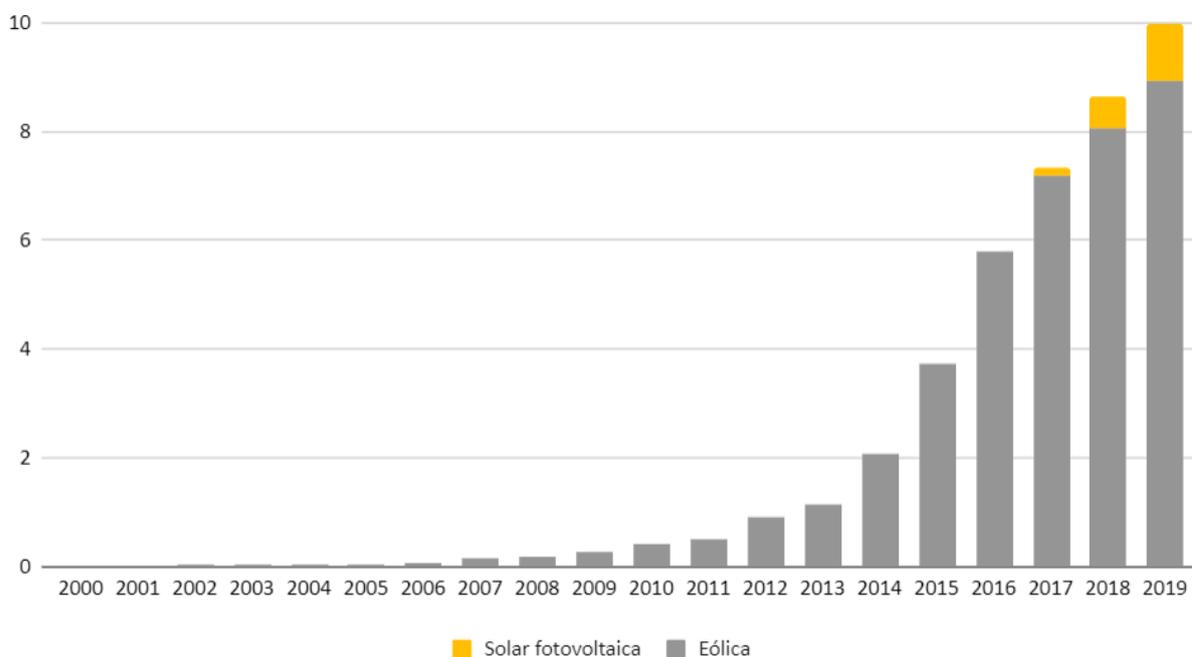
Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da [IRENA \(2020\)](#). Nota: valores deflacionados pela média anual do índice CPI-U.

[Losekann e Hallack \(2018\)](#) argumentam que a matriz elétrica brasileira conta com uma posição privilegiada para acomodar o crescimento da participação de fontes renováveis intermitentes – e.g. eólica e solar fotovoltaica –, devido ao seu caráter dinâmico e elevado grau de flexibilidade, o que permitiria a expansão das fontes renováveis com custos de integração reduzidos.

#### 4.4.2 As energias eólica e solar fotovoltaica no Brasil

A participação das fontes eólica e solar fotovoltaica 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 ([IEA, 2020a](#)). Segundo a [IEA \(2020a\)](#), que dispõe de dados relativos ao Brasil para o ano de 2019, a participação dessas duas fontes de energia combinadas subiu para 10%. Na Figura 4.13, 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 4.13 – Participação das energias eólica e solar no total de energia elétrica (%) – Brasil – 2000-2019



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados da [IEA \(2020a\)](#).

#### 4.4.2.1 Energia eólica

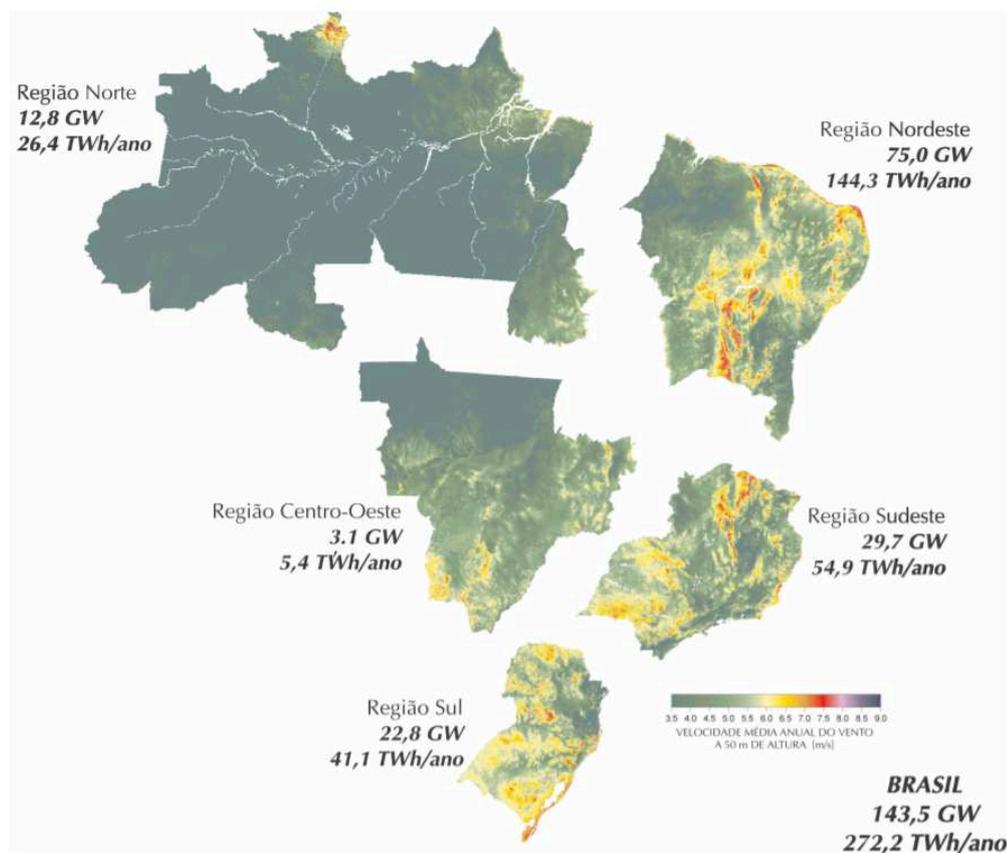
A primeira turbina eólica – de 23 metros de altura, rotor de três pás de 17 metros de diâmetro e potência nominal de 75 kW ([JUÁREZ \*et al.\*, 2014](#)) – foi instalada, no Brasil, na ilha de Fernando de Noronha, em 1992, em cooperação entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e a empresa de distribuição estadual (CELPE) ([FURTADO; PERROT, 2015](#)), efetivando o primeiro passo da energia eólica brasileira<sup>7</sup>. Em 2003, 10 anos depois, a capacidade instalada em todo o país ainda era bastante baixa, cerca de 24 MW ([IRENA, 2020](#)), demonstrando o pouco progresso no estabelecimento da fonte eólica, como uma alternativa para geração de eletricidade, ao longo dos anos 1990. 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 brasileiros, que se mostraram abundantes. O Atlas do potencial eólico brasileiro, importante marco para o setor, no Brasil, estimou que o país tem potencial disponível, somente no segmento *onshore*, de 143,5 GW ([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](#)). Além disso, verifica-se um ainda baixo aproveitamento desse potencial, posto que, em 2019, a capacidade instalada de energia eólica no Brasil era de cerca de 15 GW (aproximadamente, 10% do potencial).

<sup>7</sup> Em 2009, ela foi destruída em uma tempestade.

Na Figura 4.14, expressa-se o potencial estimado pelo Atlas, desagregado em cada uma das cinco regiões brasileiras, com destaque para a imensa parcela do potencial concentrado na região Nordeste.

Figura 4.14 – Mapa do potencial eólico brasileiro por região



Fonte: [Amarante et al. \(2001\)](#).

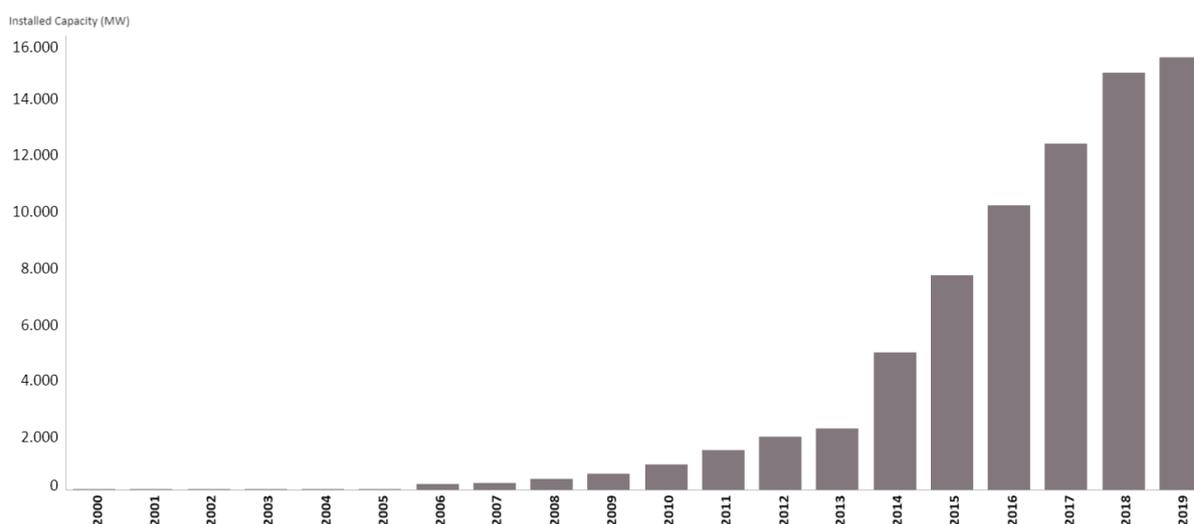
Entretanto, o Atlas levou em conta turbinas instaladas em torres de apenas 50 metros. Para considerar o crescimento do porte das turbinas nos últimos anos, [Pereira \(2016\)](#) realizou uma reavaliação do potencial *onshore* para torres de 100 metros e chegou ao número de 880,5 GW em nível nacional (aproximadamente seis vezes maior do que a estimativa obtida em 2001), suficiente para produzir 1,7 PWh/ano (o que corresponde a 2,7 vezes o total da matriz elétrica brasileira, em 2019 ([IEA, 2020a](#))). Além disso, [Pereira \(2016\)](#) estima o potencial *offshore* brasileiro em 1.300 GW ao nível nacional, suficientes para produzir 3,5 PWh/ano (ou 5,6 vezes o total da matriz elétrica brasileira em 2019). Nesse sentido, o potencial da participação eólica na matriz elétrica brasileira e seu subaproveitamento atual são ainda mais salientes.

Soma-se a esse vasto potencial o argumento de que a energia eólica é uma fonte apropriada para o caso brasileiro, pois suas características técnicas estão alinhadas às estruturas hidrelétricas subjacentes, além de aumentar a segurança energética ([BRADSHAW, 2017](#)). 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 no Brasil; segundo, grande parte do potencial de geração eólica tem pico em períodos secos, nos quais as represas se esvaziam, isto é, essas fontes apresentam complementariedade entre si e podem contribuir para uma maior segurança 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 (BRADSHAW, 2017; LOSEKANN; HALLACK, 2018).

A Figura 4.15 expressa a capacidade instalada acumulada de energia eólica no Brasil, no período entre 2000 e 2019. Por conta da quantidade e qualidade dos ventos da região, a maior parte da capacidade eólica brasileira está instalada no Nordeste (LUCENA; LUCENA, 2019). Ademais, outro ponto a ser ressaltado é o fato de que a energia eólica, no Brasil, limita-se ao segmento *onshore*. Apesar do imenso potencial, especialmente na região costeira do Nordeste (PEREIRA, 2016), o segmento *offshore* segue totalmente inexplorado no país. Os primeiros passos nesse segmento foram dados pela Petrobras – a empresa estatal de petróleo brasileira –, com a instalação de uma planta-piloto nas proximidades de uma de suas plataformas na região Nordeste, com expectativa de início de operação em 2022 (LUCENA; LUCENA, 2019).

Figura 4.15 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica eólica (MW) – Brasil – 2000-2019



Fonte: IRENA (2020).

O crescimento da capacidade instalada acumulada de energia eólica no Brasil ocorreu de maneira bastante rápida, no período entre 2000 e 2019, aproximadamente 41% por ano. Essa taxa, muito superior à observada no mundo (21%), significa que, em média, o Brasil viu sua capacidade instalada de energia eólica dobrar a cada dois anos aproximadamente. Apenas na última década (2009-2019), período no qual foram

realizados leilões específicos para essa fonte, a capacidade instalada de energia eólica brasileira cresceu mais de 25 vezes. A taxa de crescimento verificada expressa uma rápida expansão da energia eólica no Brasil em relação ao mundo: o país apareceu 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 em 8º, na frente de países como o Canadá (IRENA, 2020).

Em adições líquidas, verificam-se diversas fases distintas. 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 no período entre 2014 e 2018 que o crescimento alcançou seu ritmo mais rápido, mais do que 2,5 GW por ano. Em 2019, entretanto, último ano para o qual se tem dados, o crescimento regrediu consideravelmente, com a instalação de apenas 531 MW de novas capacidades de energia eólica (IRENA, 2020).

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 no país. 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, segundo a ABEEÓLICA (2020), a fonte eólica gerou 55,9 TWh, em 2019, com destaque para a participação dessa fonte 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. Nesse sentido, verifica-se a rápida ascensão da energia eólica como importante fonte no sistema elétrico brasileiro nos anos recentes.

A comparação das características do segmento eólico *onshore* no Brasil com a média mundial, a partir do relatório da IRENA (2020c), 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 Brasil apresenta um fator de capacidade, usado como *proxy* de eficiência, em rápido crescimento e historicamente muito superior à média mundial, 51% contra apenas 36%, em 2019 – com destaque para os estados do Nordeste (ABEEÓLICA, 2020) –, por conta da alta qualidade dos ventos. Além disso, apresenta um LCOE 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, 2020c).

Com relação à indústria eólica, o Brasil – que assim como outros países em desenvol-

vimento é um *latecomer* – possui um grau de conteúdo local ainda limitado, especialmente em componentes intensivos em conhecimento do nacele, como geradores, dispositivos eletrônicos e caixa de transmissão (FURTADO; PERROT, 2015). Seguindo a Wobben (Alemanha), 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 –, *IMPESA* (Argentina) etc. Ressalta-se, também, a WEG, empresa de capital nacional, que ingressou no setor em 2012 (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Ainda assim, entende-se que o Brasil conseguiu nacionalizar alguma parte da produção de equipamentos eólicos – turbinas, torres e subcomponentes (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015) –, especialmente através de 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, 2020b). Segundo os dados levantados pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), 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 a maior parte, 111 empresas, está envolvida com a produção de subcomponentes – 65 empresas produzem subcomponentes de nacele; 48, de rotor; e 31, de torres (ABDI, 2020a). Nesse contexto, os fabricantes de subcomponentes se concentram, principalmente, na região Sudeste, em especial no estado de São Paulo, verifica-se uma maior concentração de fabricantes de componentes na região Nordeste, em especial na Bahia e no Ceará (ABDI, 2020a), de forma a reduzir a dispersão geográfica da cadeia de suprimento e as consequentes dificuldades logísticas (DIÓGENES *et al.*, 2019). A indústria eólica emprega, no Brasil, direta e indiretamente, 19 mil pessoas (IRENA, 2020b).

#### 4.4.2.2 Energia solar fotovoltaica

Historicamente, as primeiras instalações de energia solar fotovoltaica distribuída no Brasil 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) (FERREIRA *et al.*, 2018). 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 é retardatário, tendo sua primeira usina solar fotovoltaica (com potência de 1 MW) inaugurada apenas em 2011, resultado de uma iniciativa privada no município de Tauá, no sertão do Ceará (FERREIRA *et al.*, 2018; AVELINO, 2020). Esses programas, entretanto, não foram suficientes para construir um

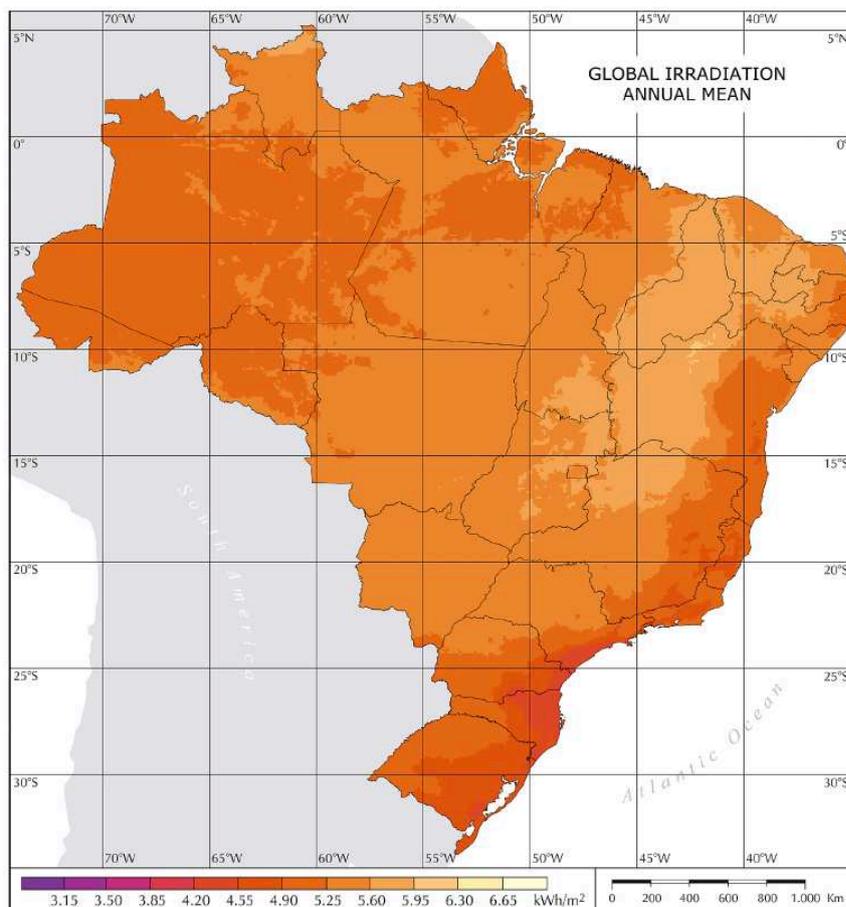
mercado interno de energia solar fotovoltaica. O cenário da energia solar fotovoltaica, no Brasil, começou a se alterar apenas a partir de 2012, com a publicação da Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482, e, depois, em 2014, com o início da realização de leilões exclusivos para essa fonte.

Os recursos solares são abundantes no Brasil. O mapa, apresentado na Figura 4.16 representa a média anual do total diário da irradiação global horizontal. Apesar das diferentes características climáticas, existentes no território brasileiro, verifica-se que a irradiação solar é, relativamente, uniforme ao longo de todo o país, com o valor máximo (6,5 kWh/m<sup>2</sup> por dia) ocorrendo na região Nordeste (norte da Bahia), e o valor mínimo (4,25 kWh/m<sup>2</sup>) ocorrendo na região Sul (litoral norte de Santa Catarina) (PEREIRA; LIMA, 2008). 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 (2,5 a 3,5 kWh/m<sup>2</sup>) e Espanha (3,28 a 5,3 kWh/m<sup>2</sup>), países onde projetos de obtenção de energia a partir dos recursos solares são amplamente disseminados, muitos dos quais com grandes incentivos governamentais (MARTINS *et al.*, 2008; PEREIRA; LIMA, 2008; ROSA; GASPARIN, 2016). De acordo com Pereira *et al.* (2017, p. 57), o potencial brasileiro é tamanho que: “No local menos ensolarado do Brasil, é possível gerar mais eletricidade solar do que no local mais ensolarado da Alemanha”.

Segundo Pereira (2016), o Brasil precisa de somente 11.306 km<sup>2</sup>, 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, no Brasil, é bastante expressivo, cerca de 468 PWh/ano, dos quais 64,3 PWh/ano apenas em áreas degradadas (PEREIRA, 2016) – o que corresponde a 747 vezes o total da matriz elétrica brasileira, em 2019; ou 102 vezes considerando apenas as áreas degradadas (IEA, 2020a). Somente em áreas de represas hidrelétricas, nas quais sistemas flutuantes poderiam ser instalados, o potencial teórico, segundo estima Pereira (2016), seria de 1,4 PWh/ano – o que representa 2,2 vezes o total da matriz elétrica brasileira, em 2019 (IEA, 2020a). Destaca-se, entretanto, que esses números correspondem ao potencial teórico, isto é, não levam em consideração a eficiência das tecnologias de conversão. Ainda assim, é possível afirmar que, no Brasil, o potencial da energia solar é muito elevado, ao mesmo tempo que seu aproveitamento é ainda bastante incipiente.

Diferente do caso da energia eólica, 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 (BRADSHAW, 2017). 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; FERREIRA *et al.*, 2018). Por outro lado, assim como verificado para a energia eólica, os períodos secos – nos quais as represas se esvaziam e a produção de hidreletricidade fica comprometida –

Figura 4.16 – Mapa da irradiação solar em território brasileiro



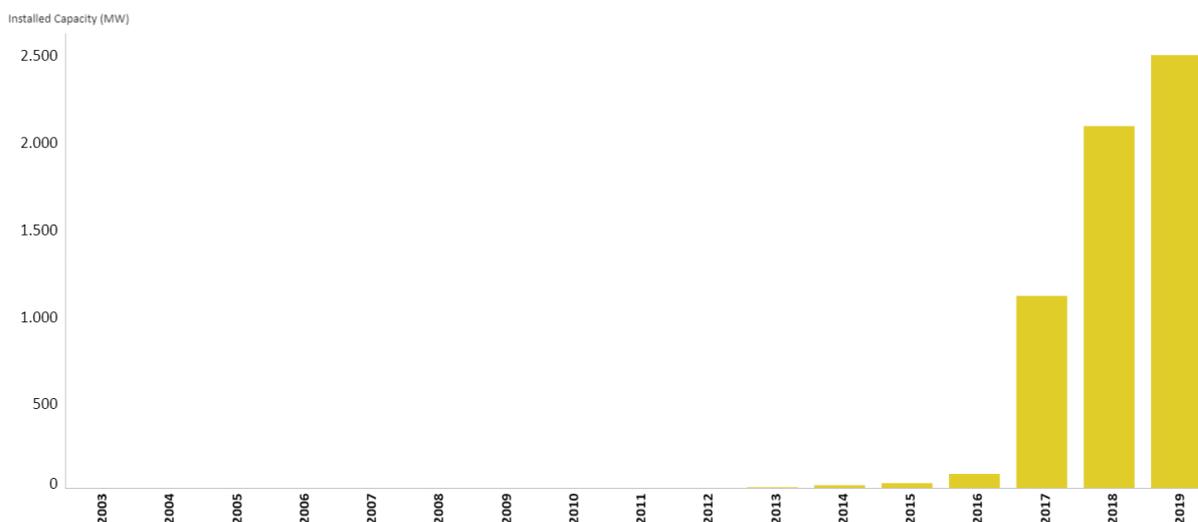
Fonte: Pereira e Lima (2008).

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 4.17, expressa-se a capacidade instalada acumulada de energia solar fotovoltaica no Brasil, no período entre 2000 e 2019. Vale ressaltar que, no Brasil, a energia fotovoltaica representa todo o mercado de energia solar, isto é, atualmente, a energia heliotérmica não é utilizada no país. Atualmente, o Brasil 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).

O crescimento da capacidade instalada acumulada de energia solar fotovoltaica, no Brasil, ocorreu de maneira ainda mais rápida do que a capacidade eólica no período entre 2000 e 2019, aproximadamente, 51% por ano. Essa taxa, superior à observada no mundo como um todo (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

Figura 4.17 – Capacidade instalada de geração de energia elétrica solar fotovoltaica (MW) – Brasil – 2000-2019



Fonte: [IRENA \(2020\)](#).

2019, período no qual foram realizados leilões específicos para essa fonte, a capacidade instalada brasileira cresceu 155 vezes. Entretanto, apesar da taxa de crescimento ser alta, o nível da capacidade instalada brasileira é, em termos relativos, baixíssimo: o Brasil não apareceu no *top 10* maiores mercados de energia solar fotovoltaica no mundo, em nenhum ano; e a capacidade instalada, em 2019, aproximadamente 2,5 GW, representava somente 0,43% do total mundial ([IRENA, 2020](#)).

Em adições líquidas, verificam-se diversas fases distintas. 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 da capacidade instalada de energia fotovoltaica se deu entre 2017 e 2018, anos nos quais foram instalados cerca de 1 GW anualmente. Em 2019, último ano para o qual se tem dados, o ritmo de crescimento regrediu, com a instalação de apenas 407 MW, análogo ao verificado também na energia eólica ([IRENA, 2020](#)).

O crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil, nos últimos anos, não apenas pode ser observado em termos absolutos de capacidade instalada, mas também em termos relativos da sua participação na 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%) no mesmo período ([IEA, 2020a](#)). Segundo dados da [IEA \(2020a\)](#), 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.

Assim como verificado nos custos instalados da energia eólica *onshore*, os custos

brasileiros se mostram superiores à média de custos mundial na energia solar fotovoltaica. Entretanto, a diferença, nesse caso, é muito mais significativa: enquanto a média mundial de custos instalados era de 995 US\$/kW, em 2019, os custos, no Brasil, eram de 1.255 US\$/kW (IRENA, 2020c). A comparação das características do setor no Brasil com o mundo encontra limitações na própria pouca importância do setor, no país: a amostra de países, dos quais o relatório da IRENA (2020c) apresenta e analisa dados de LCOE, não inclui o Brasil. Além disso, o relatório também não inclui dados, por país, dos indicadores de fator de capacidade. Dados da ABSOLAR (2020) mostram que o fator de capacidade da energia solar fotovoltaica centralizada, no Brasil, é bastante elevado, chegando a alcançar a média diária de 26,1%, significativamente superior aos 18% da média mundial, em 2019 (IRENA, 2020c).

Somam-se a esses dados as informações compiladas no Infográfico da ABSOLAR (ABSOLAR, 2020) para a energia solar fotovoltaica distribuída. Em primeiro lugar, verifica-se uma relativa elevada capacidade instalada de energia solar fotovoltaica de forma distribuída – com crescimento liderado pelos sistemas residenciais, mas com participação crescente de sistemas comerciais e rurais (REN21, 2020) –, com 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 (ABSOLAR, 2020). Diferente do segmento centralizado, que concentra-se, 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 nesses estados, que favorece a instalação de sistemas fotovoltaicos por parte dos seus habitantes, posto que, segundo Losekann e Hallack (2018), o tipo de consumidor que mais adota a geração distribuída da energia solar fotovoltaica são os consumidores residenciais de alta renda.

Com relação à indústria, o Brasil está expandindo sua capacidade produtiva de módulos fotovoltaicos, com diversas empresas chinesas se instalando no país (IRENA, 2020b). A brasileira WEG, além de atuar no setor de energia eólica, também produz tecnologias e equipamentos associados à energia solar fotovoltaica. Segundo os dados levantados pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), a cadeia produtiva brasileira do setor solar fotovoltaico conta com 378 empresas; destas, verifica-se que a maior parte, 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 (ABDI, 2020b). Ao passo que as empresas prestadoras de serviço estão, geograficamente, mais 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, 2020b](#)).

#### 4.5 SÍNTESE CONCLUSIVA

Energia renovável não é um conceito novo, mas seus recentes avanços tecnológicos e imenso potencial não utilizado a fazem emergir como uma importante alternativa às fontes de energia fóssil e nuclear. Evidência desse fenômeno pode ser verificado no crescente fluxo de investimentos (alcançando US\$ 301,8 bilhões, em 2019) e na crescente participação das fontes renováveis nas novas adições de capacidade ao redor do mundo (maior do que 70%, em 2019), podendo indicar um processo de transição energética. Ao longo do capítulo, focou-se nas energias eólica e solar fotovoltaica, por serem as fontes de crescimento mais expressivo, tanto em investimentos quanto em capacidade instalada. Nessas fontes, podem-se verificar avanços em suas características de desempenho e eficiência, e forte tendência de queda nos custos instalados e de geração (LCOE). Este último indicador, central para que essas fontes conquistem vantagem de custo relativo, demonstrou rápida queda na última década: na energia eólica *onshore*, a queda foi de 39%; na *onshore*, 29%; e na solar fotovoltaica, 82%. Por outro lado, a transição energética está longe de se tornar completa: ainda há grandes espaços para melhorias no desempenho das tecnologias de energia eólica e solar fotovoltaica, além de um vasto mercado potencial a ser penetrado, superando o atual padrão de consumo, baseado em combustíveis fósseis, inclusive através da eletrificação do uso final (que é de apenas 19,3%).

Na parte final do capítulo, analisou-se também o caso específico do Brasil, verificando 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, discutiu-se a questão do *lock-in* tecnológico e político-institucional na matriz energética e elétrica brasileira, tanto em relação aos combustíveis fósseis – especialmente relacionados às indústrias petróleo-automobilísticas – quanto às hidrelétricas. 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, em grande medida frutos de uma série de políticas governamentais, como é discutido no Capítulo 5.

## 5 POLÍTICAS DE INOVAÇÃO EM ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

Nesse capítulo, por fim, realiza-se um exercício de análise das políticas de inovação em energia eólica e solar fotovoltaica, realizadas pelo Estado brasileiro. De tal forma, busca-se verificar qual é o papel do Estado, no Brasil, como país econômica e tecnologicamente atrasado, no desenvolvimento e na implementação de inovações em energias renováveis – especificamente, eólica e solar fotovoltaica –, entendidas como centrais para a emergente revolução tecnológica e, dessa forma, busca-se entender como o país vem enfrentando os desafios e aproveitando as oportunidades da transição para um paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis.

Na seção 5.1, apresenta-se o plano de fundo para as políticas de inovação no setor de energias renováveis, eólica e solar fotovoltaica em específico, a saber: as principais instituições governamentais associadas a esses setores, e o contexto recente das políticas macroeconômicas (entendidas como políticas de inovação implícitas). Na seção 5.2, por sua vez, são discutidas as principais políticas públicas de inovação, relacionadas com as energias renováveis em geral, e com as fontes eólica e solar fotovoltaica, em específico, aplicadas no caso brasileiro. Na Seção 5.3, propõe-se uma análise dessas políticas nos setores eólico e solar fotovoltaico brasileiro, realizada através do exame da sua aderência com os princípios teóricos estabelecidos no Capítulo 3. Ainda na seção 5.3, busca-se argumentar pelo resgate do papel ativo do Estado na condução de políticas de inovação para promover o desenvolvimento econômico no Brasil, abandonado nos últimos governos, e, a partir disso, apresentam-se algumas recomendações de políticas para enfrentar as deficiências verificadas, no caso brasileiro, relacionadas com as energias renováveis – eólica e solar fotovoltaica –, com base na literatura das políticas de inovação *mission-oriented*. Na seção 5.4, apresenta-se uma síntese conclusiva do capítulo.

### 5.1 PLANO DE FUNDO DO CASO BRASILEIRO

#### 5.1.1 Principais instituições governamentais

O Brasil não possui uma instituição específica para lidar com as energias renováveis (MELO *et al.*, 2016). Entretanto, diversas instituições governamentais estão associadas com as fontes renováveis de energia e com as inovações tecnológicas relacionadas, incluindo ministérios, agência reguladora, empresa estatal e instituições de financiamento.

##### 5.1.1.1 Ministérios: MME, MMA e MCTI

O primeiro ministério a ser ressaltado é o Ministério de Minas e Energia (MME), o qual, criado em 1960, é, dentre outras atribuições, responsável pela formulação e implementação de políticas e programas estruturais, no âmbito do setor energético. Através da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético, o MME desenvolve ações

estruturais de longo prazo para a implementação de políticas setoriais, dentre elas estudos prospectivos sobre novas tecnologias, incluindo as energias renováveis (MAZZUCATO; PENNA, 2016). O MME também é responsável pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), criada em 2004 para prestar serviços na área de estudos e pesquisas relacionadas com a geração, distribuição e transmissão de energia, destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético brasileiro – e.g. o Plano Decenal de Expansão de Energia, no médio prazo, e o Plano Nacional de Energia, no longo prazo. Os estudos realizados pela EPE incluem análises de viabilidade tecno-econômica e socio-ambiental de diferentes tecnologias, impacto social, avaliação e incremento na utilização de energias de fontes renováveis etc.

Ao abordar a questão ambiental, em específico, faz-se necessário ressaltar o papel do Ministério do Meio Ambiente (MMA). Criado em 1985, o MMA tem um papel estratégico na formulação e implementação de políticas transversais, visando alinhar as iniciativas governamentais entre os ministérios aos princípios e às práticas sustentáveis (MAZZUCATO; PENNA, 2016). A pedra angular da política brasileira de mitigação das mudanças climáticas é a Política Nacional de Mudanças Climáticas (NPCC), estabelecida em 2009. O NPCC estabelece um compromisso voluntário do Brasil na adoção de ações de mitigação para reduzir emissões de gases de efeito estufa, entre 36,1 e 38,9%, até 2020, contra o nível de 2005. O NPCC também inclui metas para reduzir o desmatamento, promover o reflorestamento, e aumentar o uso de etanol, a eficiência energética e a geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. Segundo Mazzucato e Penna (2016), o NPCC e as políticas ambientais e energéticas associadas constituem uma legislação que permite o estabelecimento de programas de inovação *mission-oriented*, com objetivo de enfrentar os desafios ambientais e climáticos.

Em 2015, o Brasil também enviou sua contribuição, nacionalmente determinada, para a 21<sup>a</sup> Conferência Anual das Partes em Paris (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), que alcançou um novo acordo global para reduzir as emissões que causam mudanças climáticas. A contribuição brasileira incluiu a meta de reduzir as emissões de gases de efeito-estufa em 37% até 2025 e 43% em 2030, em comparação com 2005, além de ações específicas para mitigar o desmatamento e de políticas especiais de energia para aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética. Para o setor de energia, o Brasil estabeleceu metas de atingir a participação de 45% de energias renováveis na matriz de energia total até 2030, das quais, entre 28 e 33%, devem ser não-hidrelétricas (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Desde 1992, quando sediou a primeira conferência das Nações Unidas sobre mudanças climáticas, o Brasil apresentava forte compromisso ambiental no nível internacional. Entretanto, nos anos recentes, sob as diretrizes do atual governo federal e ministro do MMA, verificam-se imensos retrocessos na preocupação do governo brasileiro com as questões ambientais, com impacto negativo na imagem do Brasil frente à comunidade mundial.

Em 2020, por exemplo, o MMA teve despesas executadas de apenas R\$ 2,26 bilhões – equivalente à 0,07% dos gastos públicos –, demonstrando a baixa relevância dada pelo atual governo a essa pasta. Nesse ano, também, verifica-se a intensificação do desmatamento da Amazônia e o aumento dos incêndios no Centro-Oeste (na região do Pantanal, especialmente) e Norte do país, motivados, em grande parte, pela redução da fiscalização contra esses crimes por parte do governo.

Dentre o marco institucional voltado à questão da inovação tecnológica, deve-se ressaltar o papel do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). O MCTI foi estabelecido em 1985, colocando a inovação na agenda política brasileira pela primeira vez; entretanto, a crise no final dos anos 1980 trouxe instabilidade institucional e diminuição nos recursos, e o pensamento liberal de desregulamentação e privatização dos anos 1990 restringiram, em grande escala, sua atuação (CASSIOLATO *et al.*, 2014). A inovação retornou à agenda política do governo federal em 1999, contudo, ainda, sob a influência dos princípios liberais: a inovação era, antiquadamente, concebida como um processo linear, no qual a política de inovação possuía um papel limitado de consertar as falhas de mercado (CASSIOLATO *et al.*, 2014). Em geral, as políticas eram horizontais e seguiam a lógica *supply-push* (MAZZUCATO; PENNA, 2016). Além disso, ficaram restritas ao próprio Ministério, totalmente desconectado de outras políticas governamentais, o que limitou sua efetividade (CASSIOLATO *et al.*, 2014).

De acordo com Cassiolato *et al.* (2014), a política de inovação ganhou complexidade no início dos anos 2000, com os governos Lula e Dilma buscando colocar o problema da inovação no centro da estratégia de desenvolvimento. O governo do Presidente Lula promoveu duas importantes mudanças: primeiro, as estratégias e políticas de desenvolvimento foram reintroduzidas no Brasil, com as políticas industrial e de ciência, tecnologia e inovação ganhando destaque; segundo, o aumento significativo de recursos destinados à ciência e tecnologia (CASSIOLATO *et al.*, 2014). Entretanto, as políticas continuaram a ser baseadas em uma visão linear do processo de inovação e, por esse motivo, concentraram-se em P&D e empregaram ferramentas e mecanismos com eficácia limitada – e.g. créditos tributários de P&D, subvenções econômicas a projetos de P&D, fundos setoriais utilizados de forma não estratégica, e equalização de taxas de juros (MAZZUCATO; PENNA, 2016). Após esse breve período, a pauta da ciência, tecnologia e inovação vem perdendo espaço no Brasil, por conta de uma nova guinada neoliberal – conforme alertado na Introdução desta dissertação e reforçado ao final deste capítulo –, de tal forma que o Ministério gastou apenas cerca de R\$ 8,56 bilhões, em 2020 – aproximadamente 0,26% dos gastos públicos.

#### 5.1.1.2 Agência regulatória: ANEEL

Nos anos 1990, o processo de privatização das empresas estatais brasileiras marcou uma significativa mudança na economia e no papel associado do Estado: afastando-se da produção e assumindo um papel mais regulatório, de forma a garantir preços e tarifas

justos e razoáveis, acesso à infraestrutura monopolizada, qualidade de serviços, segurança do suprimento e supervisão dos programas obrigatórios de P&D – em alguns setores, como contrapartida do processo de privatização (MAZZUCATO; PENNA, 2016). Entre 1996 e 1998 foram estabelecidas três agências reguladoras, ligadas, diretamente, com as privatizações: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Fundada em 1996, a ANEEL é de particular importância para a presente pesquisa. Como órgão independente, responsável pela governança do setor de eletricidade brasileiro, a ANEEL tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, de acordo com as políticas e diretrizes do governo federal. A agência está, formalmente, sob o guarda-chuva do MME, mas é financeira e administrativamente independente do governo, por meio de encargos cobrados de geradores de eletricidade e empresas de distribuição. Além de regular o setor privado, a ANEEL também contribui para o cumprimento de outros objetivos, que atendem ao interesse público, e.g. tem o dever de cumprir as orientações sociais e ambientais dos ministérios e da legislação vigente (BRADSHAW, 2017).

A ANEEL, através da Lei Nº 9.991 de 2000, também coordena um grande programa setorial de P&D em energia elétrica, que é a principal fonte de recursos em P&D e investimentos em inovação no setor. O programa requer que as firmas do setor de eletricidade brasileiro, públicas ou privadas – concessionárias de serviços públicos de distribuição, transmissão e geração, permissionárias de serviços públicos de distribuição e autorizadas à produção independente de energia elétrica, excluindo-se eólicas, solar, biomassa, e pequenas centrais hidrelétricas – invistam um valor anual mínimo de 1% de sua receita operacional líquida em projetos de P&D e inovação. Desse valor, 0,4% é despendido em projetos de P&D, supervisionados pela ANEEL; 0,4%, pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT); e os últimos 0,2%, pela EPE. Esses fundos auxiliam no desenvolvimento de atividades de pesquisa que, por sua vez, contribuem para a criação de conhecimento científico e técnico, para endereçar desafios tecnológicos e de mercado, no setor de eletricidade. Mazzucato e Penna (2016) argumentam que esse é um interessante programa na promoção de investimentos em P&D e inovação em um setor, cujas características naturais de monopólio fornecem pouco incentivo para isso; entretanto, até recentemente, os recursos públicos não eram direcionados a tecnologias específicas, mas deixados a cargo das empresas.

### 5.1.1.3 Empresa estatal: Eletrobras

Criada em 1962, a empresa estatal Eletrobras é a maior empresa de geração de energia elétrica brasileira, com capacidade instalada equivalente a cerca de um terço da capacidade total, e é líder em transmissão de energia elétrica no Brasil, com aproximada-

mente metade do total de linhas de transmissão em sua rede básica, em alta e extra-alta tensão. É considerada uma das empresas mais inovadoras do Brasil, desenvolvendo importantes tecnologias através do próprio centro de pesquisa, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) (MAZZUCATO; PENNA, 2016). A estatal é um importante órgão no setor de energias renováveis: em 2018, 95,2% da matriz de geração de energia elétrica era composta por fontes renováveis (ELETROBRAS, 2018).

A Eletrobras gerencia três importantes programas governamentais estratégicos: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), criado em 1985 para promover a eficiência no uso de energia elétrica, contribuindo para reduzir emissões de gases de efeito estufa e mitigar impactos ambientais; o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica (Luz para Todos), instituído em 2003, já levou energia elétrica para 16,8 milhões de brasileiros, sendo fundamental para a melhoria da qualidade de vida e o desenvolvimento socioeconômico; e o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), instituído em 2002, contribui para a diversificação da matriz energética, geração de empregos diretos e indiretos, avanço industrial, internalização de tecnologia de ponta e redução de emissões de gases de efeito estufa.

#### 5.1.1.4 Instituições de financiamento público: BNDES e FINEP

Fundado em 1952, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), atualmente ligado ao Ministério da Economia (ME), é a instituição de financiamento de longo prazo mais importante do Brasil e um dos maiores bancos de desenvolvimento do mundo. Desde meados dos anos 1990, o BNDES é fonte de financiamento “paciente” e “comprometido”, através de programas direcionados a P&D e desenvolvimento de inovações tecnológicas; entretanto, foi somente depois de 2003 que o apoio à inovação se tornou variável-chave e prioridade estratégica, resultando no aumento de desembolsos e programas para projetos inovativos (MAZZUCATO; PENNA, 2016). Após 2006, segundo Cassiolato *et al.* (2014), o BNDES passou a desempenhar um papel ativo no desenho e na implementação de políticas, através de programas de incentivo à inovação, com taxas de juros baixas, como o programa Capital Inovador e o Fundo de Desenvolvimento Técnico-Científico (FUNTEC), que possuem projetos focados em áreas relevantes para o país, como saúde, meio ambiente e energias renováveis.

Como resultado dessa experiência acumulada, o BNDES criou capacidade jurídica, administrativa e institucional, possuindo hoje um conjunto de diferentes tipos de financiamento para inovação, que abrange uma variedade de ferramentas e programas: a) renda variável e fixa, com objetivo de promover projetos de inovação e setores estratégicos; b) renda variável, com objetivo de estabelecer empresas altamente inovadoras; c) renda fixa, destinado a projetos inovativos em pequenas e médias empresas; e d) recursos não reembolsáveis, através do FUNTEC, para financiamento de P&D básico em determinadas áreas

de potencial futuro e interesse nacional (MAZZUCATO; PENNA, 2015; MAZZUCATO; PENNA, 2016). Nesse sentido, pode-se dizer que a “caixa de ferramentas” do BNDES é vasta, envolvendo todas as fases do ciclo de vida de uma empresa inovadora: pré-incubação (e.g. FUNTEC), incubação, inicialização e lançamento (e.g. CRIATEC), crescimento e maturidade (e.g. programas setoriais e Inova Empresa) (MAZZUCATO; PENNA, 2015).

O caráter crucial dos financiamentos do BNDES, no apoio a micros, pequenas e médias empresas e à inovação, além do apoio em áreas que exigem altos volumes de investimentos iniciais – como é o caso das energias renováveis –, reforça a percepção de que é, perfeitamente, possível implementar um modelo de desenvolvimento sustentável, centrado em estruturas produtivas adequadas às demandas da sociedade e aos problemas sociais do século XXI. Nos últimos anos, entretanto, o BNDES vem sendo desmontado, tanto pela devolução de recursos do banco ao Tesouro para reduzir os *deficit* do governo federal, quanto pela demonização das próprias atividades da instituição em meio à frustrada busca pela tal “caixa preta” (CARVALHO, 2020).

Criada em 1967, a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ligada ao MCTI, pode ser considerada um banco de desenvolvimento para projetos de ciência, tecnologia e inovação (MAZZUCATO; PENNA, 2016), ainda que com montante de recursos menores do que o BNDES. A FINEP coordena, desde 1969, o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), que tem como objetivo financiar a inovação e o avanço científico e tecnológico, com vistas a promover o desenvolvimento econômico e social. Em 2013, em conjunto com o BNDES e com a ANEEL, a FINEP executou um importante programa, específico na promoção de inovações em energias renováveis, no âmbito do Plano Inova Empresa, o Inova Energia. O programa contou com linhas temáticas destinadas ao desenvolvimento de tecnologias ligadas à geração de energia por fontes alternativas – fotovoltaicas, heliotérmicas e eólicas –, *smart-grids*, e veículos elétricos e híbridos.

### 5.1.2 Políticas macroeconômicas

Antes de se abordar as políticas públicas de inovação em energias renováveis em específico, deve-se discutir as políticas macroeconômicas praticadas pelo Brasil. Argumenta-se que as políticas macroeconômicas podem ser vistas como políticas industriais e de inovação implícitas, pois podem tanto prejudicar quanto promover as políticas explícitas. Dado o caráter das políticas macroeconômicas brasileiras, desde o final dos anos 1990 – metas estritas de inflação, alcançadas através da manipulação de altas taxas de juros, *superavit* primário permanente para garantir o pagamento de juros da dívida pública e regime de taxa de câmbio flexível que tende a ficar supervalorizada e comprometer a competitividade da indústria doméstica –, tem-se que essas políticas colocam obstáculos sobre as políticas industriais e de inovação no país (MAZZUCATO; PENNA, 2016).

Destaca-se, sobretudo, o pé fiscal do tripé macroeconômico, que força uma atuação desestabilizadora por parte do Estado – cortando gastos em momentos de crise, e

umentando espaço para expansão dos gastos em períodos de crescimento –, além de prejudicar o planejamento orçamentário – o qual é baseado em projeções de crescimento que, quando frustradas, implicam contingenciamentos e bloqueiam recursos já aprovados pelo Congresso –, bem como a execução de políticas por parte dos Ministérios (CARVALHO, 2020).

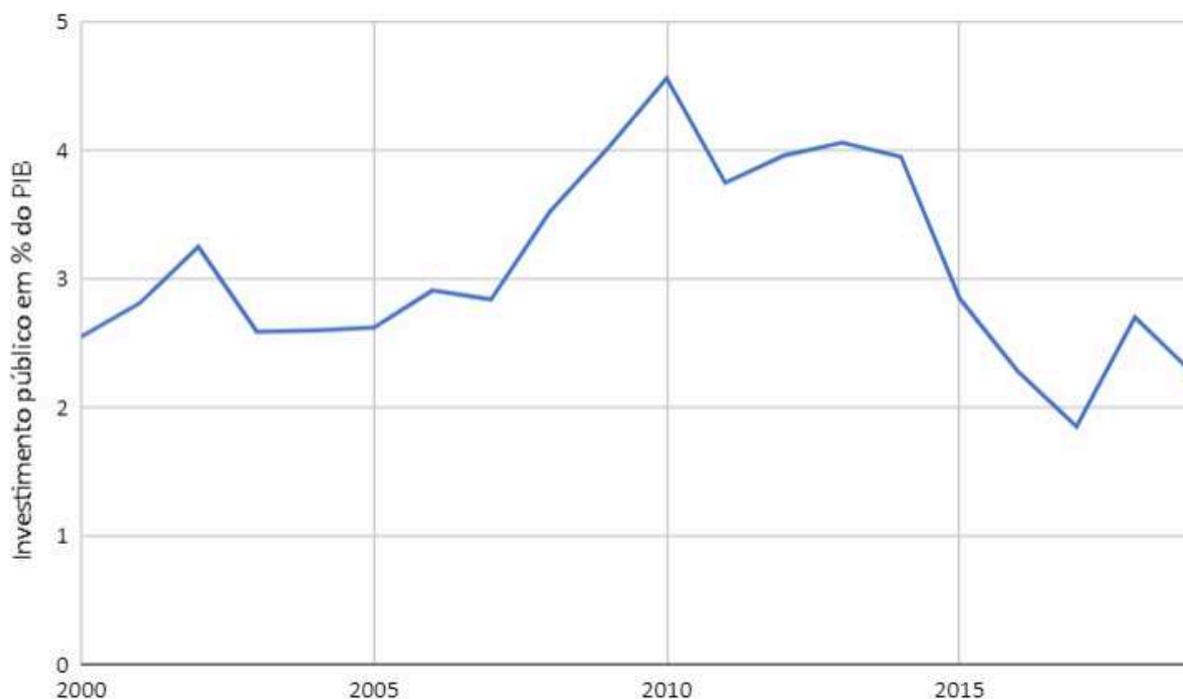
As regras fiscais brasileiras costumam, ainda, penalizar, desproporcionalmente, os investimentos públicos em infraestrutura em momentos de ajuste nas contas públicas, que, em momento de recessão, são os primeiros a serem cortados. A partir de 2015, com o país em crise, os investimentos públicos entraram em rápido declínio, chegando a pontos, como no terceiro trimestre de 2019, em que o total de investimentos do governo federal, estadual e municipal não foi suficiente sequer para cobrir a depreciação da infraestrutura existente, registrando um saldo negativo de R\$ 11,4 bilhões. Além de aumentar a carência na infraestrutura, a queda desses investimentos são, ao menos em parte, responsáveis pela profunda recessão ocorrida entre 2015-2016 e pela recuperação mais lenta da história do país entre 2017-2019. Em 2016, com a aprovação do teto de gastos, o cenário se deteriorou ainda mais, posto que o espaço para despesas discricionárias e, conseqüentemente, para investimentos seguiu caindo a cada ano (CARVALHO, 2020).

A Figura 5.1 apresenta a trajetória dos investimentos públicos, em porcentagem do PIB no Brasil, entre 2000 e 2019, e demonstra a rápida queda nos anos 2010, atingindo, em 2019, patamares inferiores ao registrado em 2000. O valor registrado em 2019 foi o segundo menor desde 1947, e as perspectivas para 2020 são ainda piores: maior parte dos recursos será destinada à transferência de renda e na saúde pública para contribuir no enfrentamento da crise da COVID-19 (PIRES, 2020).

Uma importante consequência do teto de gastos é o acirramento de conflitos distributivos na sociedade: diferentes áreas disputam fatias de um bolo que fica cada vez menor, cujas áreas com menos defensores e que não possuem um valor mínimo exigido, e.g. a infraestrutura e a ciência e tecnologia, concentram a maior parte dos prejuízos (CARVALHO, 2020). Portanto, é nesse contexto de política macroeconômica, como um obstáculo à política de inovação no Brasil, que se insere a presente pesquisa sobre as políticas de inovação em energias eólica e solar fotovoltaica.

Com relação à energia eólica, em específico, Diógenes *et al.* (2019) verificam que o ambiente macroeconômico instável experimentado, atualmente, pelo Brasil afeta a indústria eólica em quatro aspectos: a) a crise econômica resultou na redução da atividade da indústria e do comércio, o que, conseqüentemente, reduziu a demanda por eletricidade e, também, a realização dos leilões de energia; b) a baixa atividade industrial e comercial também reduziu a receita fiscal do governo, o que levou à redução da disponibilidade de financiamento competitivo por parte dos bancos de desenvolvimento estatais; c) a incerteza da recuperação econômica causou frequentes flutuações na taxa de câmbio, resultando na instabilidade nos preços dos componentes importados; d) por fim, os investimentos públi-

Figura 5.1 – Investimentos públicos em porcentagem do PIB (%) – Brasil – 2000-2019.



Fonte: Pires (2020).

cos para reforçar a infraestrutura, especialmente em redes de transmissão para acomodar a energia eólica, já em situação de precariedade no país, também foram reduzidos por conta da queda da receita fiscal. Com relação à energia solar fotovoltaica, por sua vez, Carstens e Cunha (2019) ressaltam também a instabilidade econômica, que aumenta os riscos dos investimentos no país e desencoraja investidores, especialmente estrangeiros, como uma das principais barreiras ao crescimento dessa fonte no Brasil.

## 5.2 O PAPEL DO ESTADO BRASILEIRO NO DESENVOLVIMENTO DOS SETORES DE ENERGIAS EÓLICA E SOLAR FOTOVOLTAICA

### 5.2.1 Políticas públicas em energias renováveis

Até 2001, não havia, no Brasil, incentivos favoráveis para as energias elétricas renováveis “modernas”, isto é, renováveis não hidrelétricas (AQUILA *et al.*, 2017). Entretanto, como visto anteriormente, uma severa crise energética, no início dos anos 2000, motivou o surgimento de iniciativas governamentais para promoção de fontes de energia alternativas às hidrelétricas. Através da Lei N<sup>o</sup> 10.438, de abril de 2002, foi, então, estabelecido o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o primeiro programa destinado a promover, ativamente, fontes demoninadas “alternativas” para geração de energia elétrica no Brasil – eólica, biomassa e hidrelétricas de pequeno porte, especificamente (IEA, 2020c). O programa tinha como objetivo diminuir a elevada depen-

dência do país de hidrelétricas de grande porte (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015) e, dessa forma, aumentar a diversificação da matriz energética para compensar as flutuações sazonais das hidrelétricas. O PROINFA incluiu um sistema de financiamento especial, através do BNDES (AQUILA *et al.*, 2017), de até 70% dos custos de capital (excluindo aquisição de terrenos e bens e serviços importados) (IEA, 2020c).

Inicialmente, o programa operou através de modelos padrão de *feed-in tariff* para adicionar 3,3 GW de capacidade no sistema elétrico brasileiro – 1,1 GW de cada uma das fontes, eólica, biomassa e hidrelétricas de pequeno porte –, com contratos de compra de eletricidade de longo prazo (20 anos) para produtores de energia independentes, garantidos pela Eletrobras (JUÁREZ *et al.*, 2014; HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; AQUILA *et al.*, 2017). Para atingir a meta de 3,3 GW, foram contratados, dentro do escopo do programa, 0,68 GW de biomassa, 1,19 GW de energia hidrelétrica de pequeno porte e 1,42 GW de energia eólica (MELO *et al.*, 2016) – estes dois últimos compensando a baixa contratação do primeiro (JUÁREZ *et al.*, 2014). Uma segunda fase do PROINFA estava prevista na lei, na qual o objetivo era fazer com que as fontes alternativas, contempladas no programa, alcançassem 10% do consumo de eletricidade nacional, em 2022, mas que sequer foi implementada devido a mudanças nas regulações do setor elétrico brasileiro (MELO *et al.*, 2016).

O PROINFA também incluiu requerimentos de conteúdo local, isto é, requisitos mínimos de equipamentos fabricados nacionalmente nos projetos contratados (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; MELO *et al.*, 2016; MAZZUCATO; PENNA, 2016; AQUILA *et al.*, 2017). No PROINFA, portanto, a demanda por energias renováveis para a rede de distribuição nacional estava diretamente conectada com requerimentos de conteúdo local, isto é, no programa, havia entrelaçamento de instrumentos de oferta e demanda. O requerimento de conteúdo local se baseou nos cálculos econômicos do MME, segundo os quais os custos adicionais da adição de energias renováveis à rede poderiam ser compensados no longo prazo com a localização da produção e inovação no setor (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015). A administração do Presidente FHC estabeleceu o requerimento de conteúdo local de 50% apenas para a primeira fase do programa; já a administração do Presidente Lula – que favoreceu as energias renováveis como um elemento central de uma economia moderna, na qual o Estado apoiaria as capacidades de inovação e competitividade global do país – estabeleceu o percentual de 60% para a primeira fase e 90% para uma segunda fase que, entretanto, nunca foi implementada (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015).

Com a adoção da Lei Nº 10.848 de 2004, já na administração do Presidente Lula, foi introduzido um quadro jurídico para a utilização de um sistema de contratações através de leilões de eletricidade – conduzidos pela ANEEL, sob as orientações do MME (BRADSHAW, 2017; IEA, 2020c). Emendado em 2007, esse sistema passou a permitir o uso de leilões para o desenvolvimento de tecnologias específicas, especialmente desenhados para

as fontes renováveis, como eólica e solar fotovoltaica (BRADSHAW, 2017; IEA, 2020c). Os leilões de energia renovável no Brasil ocorrem através de leilões regulares ou de leilões de reserva, estes últimos, desde 2009, orientados a licitar fontes não convencionais de energia, especialmente eólica (AQUILA *et al.*, 2017). Cobrindo quase três quartos do mercado doméstico de eletricidade, o sistema de leilões se tornou o principal instrumento de política, permitindo expandir e diversificar a oferta de energia renovável desde a administração do Presidente Lula (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020).

Sob o sistema de leilões, os volumes de eletricidade são licitados com base nas previsões de demanda das empresas de distribuição, com contratos cedidos às empresas de geração que apresentam as ofertas mais baixas (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Nesse sistema, as empresas concorrem umas com as outras, fazendo com que as tarifas resultantes sejam, substancialmente, mais baixas e menos lucrativas do que no caso das *feed-in tariffs*, isto é: por um lado, os baixos preços podem comprometer a realização bem sucedida das licitações vencedoras; por outro, a manutenção dos preços num patamar baixo, para consumidores e indústria, é uma área de grande preocupação para o Estado brasileiro (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015) e, desse ponto de vista, o programa pode ser visto como um sucesso (MELO *et al.*, 2016). Segundo Hochstetler e Kostka (2015), tanto as *feed-in tariffs* quanto os leilões, ambos com contratos de longa duração (geralmente, de 20 anos), fornecem uma garantia de demanda necessária para atrair empresas de geração privadas para o setor.

Entretanto, com a flutuação substancial dos volumes e o cancelamento frequente de leilões programados, a previsibilidade é baixa (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Por exemplo, no total, entre 2009 e 2019, contratos foram concedidos para 19,1 GW de capacidade instalada de energia eólica e 4,9 GW para solar fotovoltaica; entretanto, existe uma significativa variação ano a ano – e.g. o volume anual para energia eólica variou de 0,28 GW, em 2012, para 4,7 GW, em 2013 (ANEEL, 2020). Além disso, em 2016, os leilões para energias eólica e solar fotovoltaica foram cancelados por parte do MME, dias antes da data definida, devido a ajustes para baixo nas projeções de demanda para o ano seguinte (BRADSHAW, 2017; FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Essa imprevisibilidade do sistema de leilões pode ser visto como um entrave aos investimentos no setor (FRAUNDORFER; RABITZ, 2020). Ainda assim, segundo Mazzucato e Penna (2016), o esquema de leilões, pelo lado da demanda, foi o instrumento mais bem-sucedido no suporte de energias elétricas renováveis – particularmente, a eólica.

Como visto no caso dos leilões, não existem, no Brasil, metas de expansão das fontes renováveis de energia na matriz elétrica. O mais perto disso é o Plano Decenal de Expansão de Energia, publicado, anualmente, pela EPE sob as diretrizes do MME, que se constitui como um documento informativo, com objetivo de indicar, e não propriamente determinar, as perspectivas de expansão futura do setor de energia sob a ótica do governo, no horizonte decenal. No Plano divulgado para o ano de 2029, por exemplo, a EPE projeta

um importante crescimento da capacidade instalada de fontes renováveis, especialmente eólica (39,5 GW, em 2029, cerca de 17% da capacidade instalada total), solar fotovoltaica centralizada (10,6 GW, 4,5%) e de geração distribuída (12 GW, 5,2%). Entretanto, apesar da projeção de diminuição, em termos absolutos, da capacidade instalada de carvão e petróleo, o expressivo crescimento projetado para o gás natural (36,2 GW, em 2029) faz com que a expectativa seja de que os combustíveis fósseis como um todo aumentem sua participação na matriz elétrica brasileira na próxima década (de 12,9 para 16,6%, segundo os números utilizados no relatório) (EPE, 2020).

Outro pilar central da política de inovação em energia renovável, no Brasil, é o financiamento público através do BNDES. Dado que grande parte dos financiamentos da indústria de energia brasileira passa pelo BNDES, pode-se esperar o mesmo para as energias renováveis; e de fato, o financiamento subsidiado do BNDES é um dos principais elementos das políticas de promoção das energias renováveis no Brasil (LOSEKANN; HALLACK, 2018). A ideia de que as indústrias verdes seriam parte da economia do futuro pode ser observada pela atuação do BNDES, que se tornou, efetivamente, o garantidor da continuidade da produção nacional de equipamentos associados com energias renováveis, especialmente após o fim não oficial do PROINFA, em 2008, em favor de um sistema de leilão sem política de conteúdo local explícita (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015). Isso se deveu ao fato de o financiamento subsidiado do BNDES estar atrelado a política industrial de produção nacional de componentes própria, através de requerimentos de conteúdo local, específico das energias renováveis, para obtenção dos financiamentos (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Entretanto, um problema identificado na estratégia brasileira consiste em que o país não possui uma grande base de produção de equipamentos para a geração de energia elétrica eólica e solar fotovoltaica. Segundo Aquila *et al.* (2017), os projetos renováveis no Brasil são altamente dependentes de tecnologias desenvolvidas em outros países, mesmo com as políticas de requerimentos de conteúdo local, aplicadas no caso brasileiro. Para que as energias renováveis contribuam para o desenvolvimento do país, fazem-se necessárias políticas complementares de ciência, tecnologia e inovação nesses setores (MAZZUCATO; PENNA, 2016), como é o caso do programa Inova Energia. O Inova Energia teve como modelo o Plano Conjunto de Apoio à Inovação Tecnológica e Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico (PAISS), iniciativa bem sucedida do BNDES e da FINEP em 2011, que buscou fomentar novos planos de negócios de empresas que estivessem aptas a participar da corrida tecnológica pelos combustíveis celulósicos (conhecidos como etanol de 2ª geração). O PAISS foi, em si mesmo, uma inovação, concebida e colocada em prática pelo BNDES e FINEP, que exigiu revisões, ao longo do tempo, na concepção e execução do plano (NYKO *et al.*, 2013), numa espécie de aprendizado institucional.

Desde então, o BNDES e a FINEP passaram a realizar o Plano Inova Empresa, iniciativa que teve como objetivo fomentar projetos de apoio à inovação em diversos setores

considerados estratégicos pelo Estado brasileiro. O Inova Empresa constituiu a principal política de inovação do período recente do país, contando com um orçamento em nível sem precedentes (para os padrões brasileiros) (MENDONÇA *et al.*, 2018). O modelo Inova possui elevado nível de estruturação e pode ser caracterizado pelos seguintes aspectos: a) tem como objetivo enfrentar desafios tecnológicos em cadeias produtivas, setores ou temas específicos, que tenham importância estratégica para o Brasil, ou ofereçam potencial de mercado, estimulando as firmas a investirem em direções diferentes das suas escolhas correntes; b) integra e articula diversos instrumentos de política pública, particularmente ferramentas de financiamento – e.g. subvenções e crédito subsidiado –, compras públicas e marco regulatório; c) estabelece parcerias do BNDES e da FINEP com ministérios, outros órgãos públicos e/ou empresas estatais; e d) promove redes de inovação – cooperação e parcerias – entre empresas e institutos de pesquisa (NYKO *et al.*, 2013; MAZZUCATO; PENNA, 2016).

Do ponto de vista da gestão de recursos públicos, esse modelo permite a centralização dos guichês entre BNDES e FINEP, evitando duplicidade e promovendo sinergia entre ambas as instituições; do ponto de vista empresarial, permite a formação de parcerias para a realização de investimentos de maior porte e acesso a instrumentos que viabilizem esforços de inovação mais radicais. Além disso, o modelo representa uma inversão na lógica de análise: os planos de negócios – contemplando todas as etapas do processo inovativo – são submetidos pelas empresas e, após serem avaliados, o BNDES e a FINEP – e, se for o caso, outras instituições participantes – apresentam sugestões de instrumentos de apoio mais adequados para cada uma das etapas da inovação pretendida. Por preverem etapas de apresentação e defesa, presenciais, de planos de negócios, essas iniciativas deram mais densidade e conteúdo aos pleitos das empresas, ao mesmo tempo que permitiram uma análise comparada de um portfólio de planos de negócios com finalidades similares. Essa análise possibilita, inclusive, que as equipes técnicas que executam essas iniciativas adquiram conhecimento acerca da corrida tecnológica que buscam fomentar (NYKO *et al.*, 2013).

Um dos principais aspectos dos programas Inova – sem precedentes para o Brasil e, em certo grau, para o mundo – foi a tentativa de cada iniciativa em integrar todos os esforços federais existentes em uma determinada temática ou setor (MENDONÇA *et al.*, 2018). Diferentemente da tradição brasileira de políticas de inovação *supply-push*, o Plano Inova Empresa foi uma iniciativa de política verdadeiramente sistêmica (MAZZUCATO; PENNA, 2016). Como o Plano Inova teve como característica o direcionamento de recursos financeiros e o estabelecimento de redes setoriais – com instituições públicas, privadas e científicas – para promover o desenvolvimento de tecnologias que endereçassem desafios específicos, ele é definido por Mazzucato e Penna (2016) como um exemplo de política de inovação *mission-oriented*. Nesse sentido, o fato de que todos os programas Inova envolveram a identificação de uma missão, os torna interessantes como objeto de estudo

para esta dissertação.

Estabelecido em 2013, o Inova Energia, representando cerca de 9% do orçamento total do Plano Inova Empresa, foi uma iniciativa destinada à coordenação das ações de fomento à inovação e ao aprimoramento da integração dos instrumentos de apoio, disponibilizados pelo BNDES, FINEP e ANEEL. A inclusão da ANEEL no programa foi crucial, pois o sistema elétrico brasileiro é centralizado e altamente regulado, inclusive através das obrigações de investimentos em P&D e inovação por parte das empresas do setor (MENDONÇA *et al.*, 2018). O objetivo do Inova Energia era impulsionar a cooperação e o compartilhamento de conhecimento entre empresas e institutos tecnológicos, bem como promover a inovação, o domínio tecnológico e a comercialização de tecnologias nas linhas temáticas de: a) *smart-grids*; b) energia renovável, especificamente, eólica, solar fotovoltaica e heliotérmica; e c) veículos elétricos, híbridos e eficientes (IEA, 2020c). Nesse sentido, o programa apresentava um amplo escopo, com três linhas temáticas, desenhadas para repensar o setor de eletricidade no Brasil (MENDONÇA *et al.*, 2018).

Ainda que todas as três linhas temáticas do Plano tivessem forte relação com o problema abordado nesta dissertação, destaca-se a segunda, direcionada, especificamente, para a geração de energia através de fontes alternativas – em particular a eólica e a solar fotovoltaica. Dentro dessa linha, buscou-se promover soluções para a cadeia eólica – desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento energético eólico, contemplando a estruturação de projetos, os seus aerogeradores, e seus componentes, tais como torres, pás e naceles – e solar fotovoltaica – desenvolvimento de tecnologias para produção de silício purificado em grau solar, *wafers* de silício e células fotovoltaicas de silício; desenvolvimento de tecnologias para produção de células fotovoltaicas de películas finas ou de outros materiais; e desenvolvimento de tecnologias e soluções para produção de inversores e equipamentos aplicados a sistemas fotovoltaicos.

Pode-se afirmar que o Inova Energia foi uma iniciativa direcionada a lidar com grandes problemas, que só poderiam ser resolvidos através da inovação ou difusão de novas tecnologias e, para tal, forneceu apoio em todas as etapas para o cumprimento desses objetivos (MENDONÇA *et al.*, 2018). Por exemplo, o programa financiou projetos que incluíam P&D, atividades de engenharia e absorção tecnológica, produção e comercialização de produtos, processos e serviços inovativos de empresas e instituições científicas tecnológicas (ICTs) brasileiras (MELO *et al.*, 2016).

O apoio do BNDES, da FINEP e da ANEEL a projetos de inovação foi de até 90% do valor total de cada projeto, e o restante foi alocado pela empresa ou grupo de empresas por ele responsável, a título de contrapartida mínima obrigatória. Das empresas líderes também foi requerido um mínimo de recursos para ser elegível – receita operacional bruta igual ou superior a R\$ 16 milhões, ou patrimônio líquido igual ou superior a R\$ 4 milhões no último exercício –, o que auxiliou a abrangência e robustez dos projetos (MENDONÇA *et al.*, 2018). Os instrumentos de apoio financeiro oferecidos pelas instituições envolveram:

a) BNDES: primariamente, através das operações de crédito, de acordo com as condições e normas vigentes no produto BNDES Finem, mas também foram utilizados instrumentos de renda variável e de cooperação ICTs-Empresas no âmbito do FUNTEC; b) FINEP: instrumentos de subvenção econômica no âmbito do programa Inova Brasil, de renda variável e de cooperação ICTs-Empresas; c) ANEEL: através dos recursos obrigatórios de P&D. O orçamento original para o plano foi de R\$ 3 bilhões, dos quais: 1,2 bilhão, oriundos do BNDES; 1,2 bilhão, da FINEP; e 600 milhões, da ANEEL.

Em fevereiro de 2014, os processos de seleção foram encerrados e os resultados divulgados do Inova Energia demonstram que foram selecionados projetos de 58 empresas nas três linhas de pesquisa (IEA, 2020c). Na linha temática dois, foram aprovados projetos de 14 empresas<sup>1</sup>. Com relação aos instrumentos utilizados, verifica-se que: as operações de crédito do BNDES foram concedidas para todas as 14 empresas e os instrumentos de P&D da ANEEL, de subvenção da FINEP e do FUNTEC do BNDES foram concedidos, cada um deles, para três empresas. Os projetos de duas empresas se destacam: a) o projeto da companhia elétrica pública catarinense, a CELESC, que envolveu os quatro instrumentos de financiamento e múltiplas parcerias, dentre as quais empresas de fabricação de painéis e a Fundação CERTI (instituição de ciência, tecnologia e inovação originada na UFSC); e b) o projeto da Steag Energy, que envolveu três instrumentos de financiamento (P&D da ANEEL, operação de crédito e FUNTEC do BNDES) e parceria com a USP.

### 5.2.2 Políticas públicas em energia eólica

O PROINFA foi central para a consolidação do setor eólico no Brasil, proporcionando um ambiente de baixo risco para os investimentos em uma tecnologia que, na época, era pouco conhecida no país (LUCENA; LUCENA, 2019). O programa estabeleceu a demanda inicial crítica para alavancar a indústria de geração de energia eólica praticamente do zero: sua *feed-in tariff* era alta, suficiente para atrair empresas de geração e financiadores, ainda que nenhum destes tivesse muita experiência em energia eólica (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015). Entretanto, dos 144 projetos, aprovados inicialmente pelo PROINFA, apenas um conseguiu iniciar operação antes de 2006, o que motivou a adoção de um sistema de leilões para a contratação de energia eólica (LUCENA; LUCENA, 2019).

Os leilões de longo prazo, por sua vez, incentivaram um grande *boom* na implementação de tecnologias eólicas e possibilitaram que essa fonte se tornasse competitiva com as convencionais, em termos de LCOE, em poucos anos após ser implementado (JUÁREZ *et al.*, 2014; MAZZUCATO; PENNA, 2016). Os projeto eólicos foram contratados em leilões específicos para fontes alternativas (LFA) e em leilões de energia de reserva

<sup>1</sup> Na linha 1 foram aprovados projetos de 37 empresas e na linha 3 de 10. O somatório das empresas selecionadas em cada linha não coincide com 58 pois houve empresas envolvidas em mais de uma linha temática.

(LER)<sup>2</sup>; e, posteriormente, com o ganho de competitividade, os projetos eólicos passaram a competir em leilões não específicos, concorrendo com as fontes convencionais de energia (LOSEKANN; HALLACK, 2018). Na medida em que os preços caíram, os participantes se tornaram mais especializados, e as empresas vencedoras têm crescido constantemente (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015). O ótimo desempenho da energia eólica nos leilões demonstra o seu recente potencial na concorrência, até mesmo sem subsídios, frente a outras fontes convencionais, o que seria improvável no Brasil, antes do PROINFA (AQUILA *et al.*, 2017).

Em dezembro de 2009, foi realizado o primeiro leilão de energia de reserva, direcionado, exclusivamente, para produtores de energia eólica. Desde então, a energia eólica participou de 22 leilões, englobando 741 empreendimentos e totalizando 19,1 GW de potência contratada. O investimento total, atualizado pelo IPCA, gira em torno dos R\$ 114 bilhões e estima-se que gerou 571.663 empregos na implantação dos empreendimentos. Segundo os últimos dados publicados, 515 empreendimentos, com potência de cerca de 13,2 GW (ou 69% do total licitado), já foram implementados e estão em operação comercial (ANEEL, 2020).

A maior parte desses empreendimentos se concentra na região Nordeste (aproximadamente 90%), de tal forma que, dos nove estados da federação que participaram dos leilões, oito são nordestinos<sup>3</sup> – destacando-se, em potência contratada, os estados da Bahia (31% do total nacional) e do Rio Grande do Norte (27%) (ANEEL, 2020). Do ponto de vista socioeconômico, portanto, verificam-se relevantes externalidades positivas, decorrentes da energia eólica, especialmente a geração de empregos e renda por, no mínimo, 20 anos, em regiões carentes e estagnadas, como o semiárido brasileiro (MELO, 2013). Essa relevância do Nordeste nos leilões de energia pode ser a explicação para a concentração dos fabricantes de componentes naquela região.

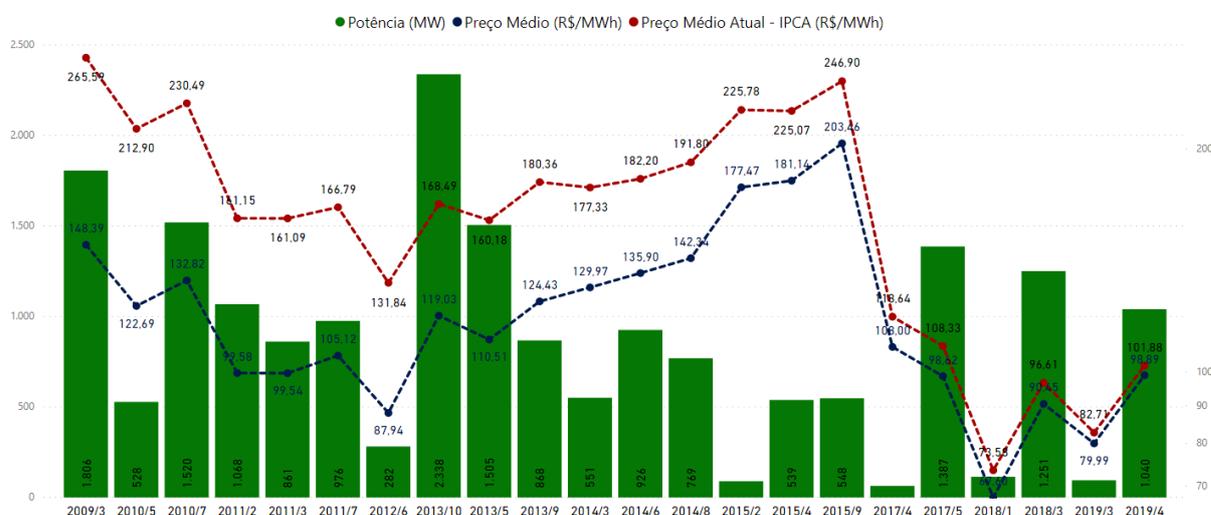
Na Figura 5.2, apresentam-se os resultados de todos os leilões de geração de energia eólica, realizados entre 2009 e 2019, tanto em termos de potência contratada quanto em termos de preço médio (nominal e deflacionado pelo IPCA). Observados os dados da figura, verifica-se que já no primeiro leilão (2009/3), foram contratados 1,8 GW de energia eólica, superando, em muito, o que foi contratado de energia eólica no âmbito do PROINFA (1,42 GW). O preço médio da energia eólica, contratada através dos leilões, se mostrou, ainda, significativamente menor do que o anteriormente contratado através do PROINFA (MELO, 2013; FURTADO; PERROT, 2015).

Observa-se no gráfico, também, uma expressiva queda nos preços médios da energia eólica a partir do leilão de 2017. Essa queda de preço demonstra a elevada competitividade

<sup>2</sup> Esses leilões têm como objetivo garantir a segurança do abastecimento de energia e nos quais são privilegiados as fontes alternativas.

<sup>3</sup> São eles, Bahia, Rio Grande do Norte, Piauí, Ceará, Pernambuco, Maranhão, Paraíba, Sergipe. Dos estados do Nordeste, apenas Alagoas não participou dos leilões. O outro estado a realizar leilões até a presente data foi o Rio Grande do Sul.

Figura 5.2 – Resultados dos leilões de geração de energia eólica por leilão em potência (MW, eixo esquerdo) e preço médio (R\$/MWh, eixo direito) – Brasil – 2009-2019



Fonte: ANEEL (2020).

da energia eólica perante as fontes de eletricidade convencionais no Brasil: relativo aos preços observados no leilão de energia elétrica 2019/4, enquanto o preço médio da fonte eólica foi de 101,9 R\$/MWh, o da hidrelétrica foi de 205,8; do gás natural, 188,9; e do bagaço de cana, 187,9 (ANEEL, 2020). Esses números colocam a energia eólica como a segunda mais competitiva, atrás apenas da solar fotovoltaica (84,4 R\$/MWh).

Entretanto, pode-se verificar irregularidade na realização dos leilões, assim como uma grande variação da potência contratada de um leilão para outro, não apresentando uma tendência definida – destaca-se, quanto a isso, os anos de 2012 (com 282 MW) e 2016 (com nenhuma nova capacidade) como os piores anos para a energia eólica no Brasil, desde 2009. Segundo Bayer (2018), isso se deve à inexistência de metas anuais de expansão eólica no Brasil, no sentido de que o volume contratado, em cada leilão, depende, principalmente, do crescimento esperado da demanda por energia elétrica. Para Diógenes *et al.* (2019), o problema da incerteza dos leilões, consequência da instabilidade macroeconômica, é reforçado pelo planejamento de expansão de energia elétrica inadequado, que considera somente a previsão da evolução da demanda no curto prazo, e não no longo prazo – e.g. em 2016, a crise política e econômica reduziu a demanda por eletricidade, o que levou ao cancelamento do leilão naquele ano. Dessa forma, apesar de ser o principal impulsionador da expansão da energia eólica no Brasil, a incerteza da ocorrência ou não dos leilões de energia influenciam, negativamente, os investimentos no desenvolvimento de projetos eólicos, e podem fazer com que produtores diminuam ou, até mesmo, encerrem a produção local (DIÓGENES *et al.*, 2019).

Analisando os oito leilões com prazo de implementação expirado, Bayer (2018) verifica que, ainda que a taxa de realização final seja alta – entre 89% e 98% –, poucos

projetos cumpriram os prazos originalmente estabelecidos – em média, apenas 14% da capacidade contratada. As principais razões para esse não cumprimento são: a) gargalos na oferta de equipamentos eólicos devido ao requerimento de conteúdo local, especialmente nos primeiros anos dos leilões, o que levanta um *trade-off* entre o cumprimento de prazos e a promoção do emprego e da produção local da indústria eólica; b) questões burocráticas, como atrasos nos estudos de impactos ambientais (requeridos para o financiamento pelo BNDES e para a participação nos leilões) e demora nas aprovações de financiamento pelo BNDES; c) atraso nas entregas de turbinas, em especial pela falência da multinacional *IMPESA*; d) mau gerenciamento dos projetos; e) prazos relativamente curtos para implementação, de dois a três anos; e f) por fim, com destaque, os atrasos na conexão à rede de distribuição, fator que afetou 31% dos projetos atrasados em 2016 (BAYER, 2018).

Sobre este último ponto, adiciona-se que, na medida que os projetos, contratados durante os três primeiros leilões, se aproximavam da conclusão, a indústria eólica começou a ter problemas associados à construção de linhas de transmissão (BRADSHAW, 2017). Antes da intensificação do desenvolvimento dos recursos eólicos, a construção das linhas de transmissão levavam cerca de dois anos; entretanto, conforme as linhas de transmissão foram estendidas às extremidades norte e sul do país, onde a produção eólica estava concentrada, longe dos centros de demanda na região Sudeste, esse período subiu para cerca de quatro anos (BRADSHAW, 2017). O resultado dessa demora na entrega de novas linhas de transmissão foi a ocorrência de severos gargalos, fazendo com que usinas eólicas, prontas para operar, ficassem paradas (MELO *et al.*, 2016; BRADSHAW, 2017; DIÓGENES *et al.*, 2019). De acordo com Diógenes *et al.* (2019), a precária infraestrutura de transmissão é a barreira de maior impacto negativo no setor eólico. Para lidar com esse problema, o governo brasileiro decidiu que as futuras participações em leilões de energia exigiria a comprovação de que os projetos possuíam acesso a linhas de transmissão (BRADSHAW, 2017). Sob as novas regulações, a partir de 2013, os planejadores de projetos eólica passaram a coordenar também a conexão à rede, assumindo os riscos de expansão das redes e de atrasos de conexão, antes sob responsabilidade da ANEEL, com impactos positivos na redução dos atrasos (BAYER, 2018).

Ademais, outro problema identificado no sistema de leilões brasileiro remete ao objetivo do menor preço oferecido no momento do leilão, que força os investidores a minimizarem o investimento, optando pela implantação de turbinas eólicas de menor porte ou de um menor número de turbinas por empreendimento (MELO, 2013). Turbinas menores, apesar de mais baratas, não maximizam o uso potencial do vento, fazendo com que operem com maior frequência perto da capacidade nominal do que turbinas maiores e mais eficientes (MELO, 2013) – o que pode ser uma explicação para o fato de o Brasil ocupar o 1º lugar em fator de capacidade no mundo (IRENA, 2020c). Nesse sentido, Melo (2013) afirma que o modelo de leilões brasileiro otimiza custos, mas não otimiza produção, como acontece no caso de mecanismos de *feed-in tariffs*, e sugere que o modelo de leilão,

que usa o critério único de preço, seja revisto para que a eficiência de longo prazo não seja comprometida.

No caso específico da energia eólica, as licitações vencedoras dos leilões sem política de conteúdo local explícita são, em geral, as que contam com o financiamento a taxas subsidiadas para geração eólica do BNDES – cerca de quatro pontos percentuais abaixo do mercado (MELO, 2013) –, que, por sua vez, tem sua própria política de conteúdo local (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015). Na prática, portanto, os planejadores dos projetos eólicos necessitam do financiamento favorável para assegurar preços competitivos e, dessa forma, precisam realizar mais investimentos em capacidades produtivas locais (BAYER, 2018). Segundo Losekann e Hallack (2018), essa política do BNDES, que teve início com a contratação de energia eólica pelo PROINFA, é a principal política orientada ao desenvolvimento da cadeia produtiva local de turbinas eólicas no Brasil.

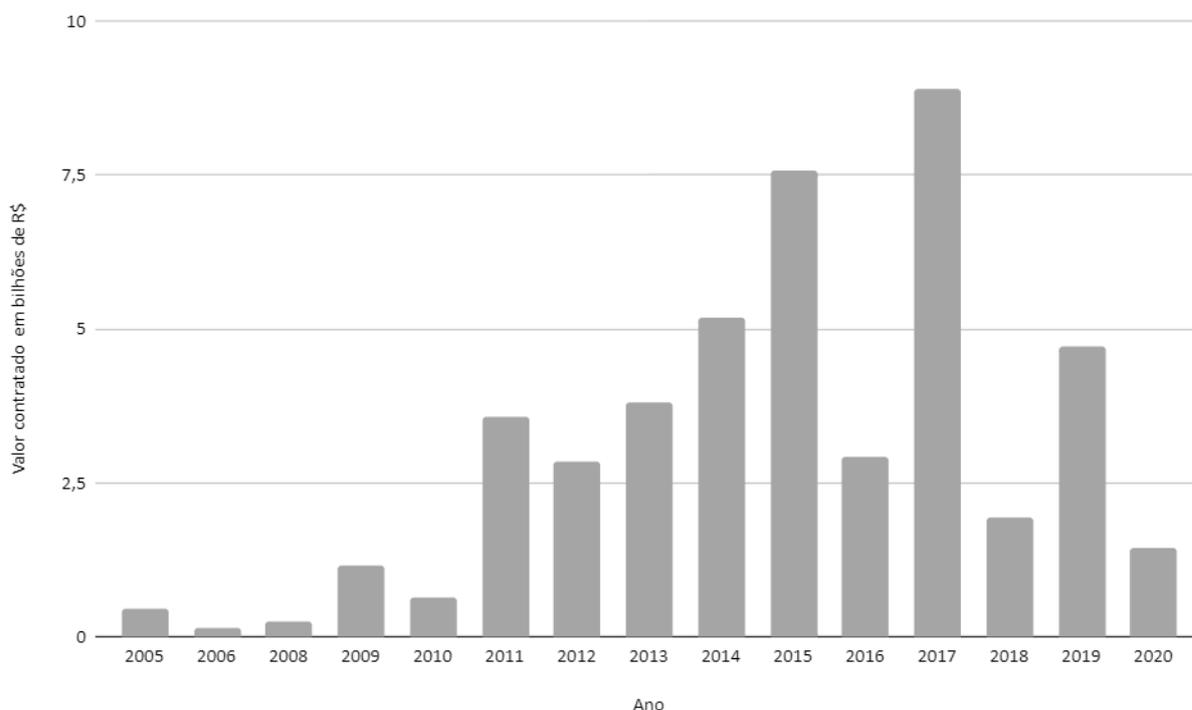
De acordo com a pesquisa conduzida por Ferreira (2017), o desenho da política de conteúdo local do BNDES, no setor eólico, segue boas práticas, como: a) não é compulsória, isto é, está atrelada ao financiamento do BNDES, e um empreendedor pode buscar outras fontes de financiamento que não exijam determinados níveis de conteúdo local; b) as metas são exequíveis; c) as regras são claras; d) o cronograma é previamente definido; e) há flexibilidade para cumprimento dos níveis de conteúdo local; e) é progressiva, isto é, os requisitos aumentam gradativamente, e são idealmente acompanhados do aumento da capacidade dos produtores locais.

Num primeiro momento, os requisitos eram os mesmos de outros setores econômicos, 60%; entretanto, por entender que esse critério não era suficiente para impulsionar a nacionalização de equipamentos de maior complexidade tecnológica, o BNDES passou a aplicar uma nova metodologia, a partir de 2013 (LOSEKANN; HALLACK, 2018). Essa nova política envolvia requerimentos de conteúdo local, que aumentavam, gradativamente, visando a internalização de componentes mais intensivos em tecnologia (MELO, 2013; LOSEKANN; HALLACK, 2018). A partir de 2015, por exemplo, o BNDES passou a financiar apenas naceles de produção nacional, que é o componente tecnologicamente mais avançado e de maior complexidade de uma turbina eólica, ainda que os preços desses componentes produzidos, domesticamente, sejam maiores do que os preços chineses ou europeus (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015).

O BNDES é a principal fonte de financiamento para a energia eólica no Brasil, financiando cerca de 60% do total entre o PROINFA e os leilões de 2015 (TORINELLI *et al.*, 2018). Na Figura 5.3, estão apresentadas as operações contratadas, de forma direta e indireta, não automática, no período entre 2005 e 30 de setembro de 2020 relacionadas com a implantação de projetos de energia eólica. No gráfico, verifica-se um importante crescimento no financiamento do BNDES no setor eólico, especialmente a partir do início da realização dos leilões para essa fonte, em 2009. Por outro lado, o ritmo foi substancialmente reduzido nos últimos anos, possivelmente por conta do recente processo de desmonte,

realizado nas operações do BNDES.

Figura 5.3 – Valor contratado das operações contratadas de forma direta e indireta não-automática no setor de energia eólica – Brasil – 2005-2020



Fonte: Dados obtidos a partir da filtragem pelo código CNAE D3511587 (Geração de energia elétrica – Eólica) da base de dados de operações contratadas de forma direta e indireta não-automática disponível em [BNDES \(2020\)](#).

Entretanto, no estudo realizado por [Diógenes \*et al.\* \(2019\)](#), diversos *stakeholders* relataram acesso inadequado ao capital por parte do BNDES, relacionado com o rigoroso processo de aprovação dos financiamentos, os atrasos nas transferências dos empréstimos, a inexistência de taxas atrativas desde 2015, e a redução na porcentagem dos custos dos projetos que podem ser financiados (de, entre 70% e 80%, para não mais do que 50%). Essa barreira dificulta o levantamento de recursos necessários para realizar os investimentos de altos custos iniciais, característicos da energia eólica ([DIÓGENES \*et al.\*, 2019](#)).

Os incentivos financeiros sob a forma de créditos subsidiados e a política de conteúdo local do BNDES – que, em 2010, era um dos maiores investidores em capacidade eólica do mundo – auxiliaram a atrair empresas de energia eólica internacionais a se estabelecerem no Brasil, e deram estímulo para que empresas domésticas iniciassem produção ([HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; FURTADO; PERROT, 2015; DIÓGENES \*et al.\*, 2019](#)). O objetivo de desenvolver a cadeia produtiva de turbinas eólicas, no Brasil, foi, em grande medida, atingido. O crescimento da demanda e as políticas de conteúdo local mudaram, significativamente, o panorama de fornecedores de energia eólica no Brasil, de apenas um produtor de componentes, em 2008, a alemã *Wobben* ([HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015](#)), para 25 produtores segundo os últimos dados da [ABDI \(2020a\)](#). Dentre

essas empresas, destaca-se a WEG, uma empresa catarinense de competitividade global em equipamentos elétricos, que iniciou a produção de turbinas em 2012 – cuja participação de mercado, ainda que pequena, cerca de 3,3% em 2016, é considerada promissora (LOSEKANN; HALLACK, 2018). Destacam-se, também, os importantes fornecedores de pás para turbinas, de capital nacional, que utilizam a capacitação tecnológica derivada de usos aeronáuticos, segmento no qual o Brasil é competitivo globalmente (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Adicionalmente, relacionado com a inovação tecnológica, em território nacional, destaca-se a realização da Chamada de Projeto de P&D Estratégico 17/2013, da ANEEL, que teve como objetivo principal incentivar a contínua pesquisa e inovação para enfrentar os desafios do setor elétrico (JUÁREZ *et al.*, 2014). Nesse sentido, essa iniciativa teve a finalidade de promover o desenvolvimento tecnológico nacional da cadeia produtiva da indústria de energia eólica, com foco: no estímulo à redução dos custos de equipamentos e componentes; na capacitação profissional e tecnológica; no aprimoramento regulatório; e na otimização dos recursos energéticos.

### 5.2.3 Políticas públicas em energia solar fotovoltaica

Um importante marco da energia solar fotovoltaica no Brasil foi a Chamada de Projeto de P&D Estratégico 13/2011, da ANEEL, que teve como objetivo principal propor arranjos técnicos e comerciais para a geração de energia solar fotovoltaica, criando condições para o desenvolvimento de infraestrutura e tecnologia para integração dessa fonte no sistema energético nacional (CARSTENS; CUNHA, 2019). Nesse sentido, essa iniciativa governamental tinha a finalidade de desenvolver a indústria nacional de módulos solares fotovoltaicos e de aumentar a capacidade de geração de energia dessa fonte no país (CARSTENS; CUNHA, 2019). Os 17 projetos aprovados no edital envolveram, diretamente, 62 instituições, 96 empresas e 584 pesquisadores (ROSA; GASPARIN, 2016).

Outro importante passo para o aproveitamento do imenso potencial solar no Brasil foi efetivado com a aprovação da Resolução Normativa Nº 482, em abril de 2012, pela ANEEL (ROSA; GASPARIN, 2016). Tal resolução e sua emenda, de novembro de 2015 (Nº 687), formalizaram as regras de compensação para sistemas de geração distribuída de até 5 MW, isto é, implementaram o sistema de *net metering*, no Brasil, através do qual os indivíduos podem instalar painéis fotovoltaicos – além de outras fontes<sup>4</sup> – e introduzir o excedente de energia na rede, gerando créditos que podem ser usados para abater as contas de energia (BRADSHAW, 2017; IEA, 2020c). Dados atualizados da ABSOLAR (2020) mostram que já são, ao todo, 381.479 unidades consumidoras (0,4% do total do país) recebendo créditos pelo sistema de compensação de energia elétrica. Ainda que seja uma iniciativa válida, Aquila *et al.* (2017) argumentam que não existem linhas de financiamento

<sup>4</sup> A fonte solar fotovoltaica, entretanto, representa 95,5% da potência instalada na geração distribuída (ABSOLAR, 2020).

adequadas para atrair e alavancar investimentos, central para a disseminação do modelo de geração de eletricidade no nível residencial. Buscando realizar melhorias na Resolução Nº 482 e criar novas linhas de crédito do BNDES, para impulsionar o desenvolvimento da geração distribuída, especialmente solar fotovoltaica, o governo brasileiro lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), através do Decreto ministerial Nº 538, de final de 2015 (MELO *et al.*, 2016).

Com relação à energia solar fotovoltaica centralizada, por sua vez, verifica-se, no Brasil, uma histórica falta de incentivos (AQUILA *et al.*, 2017), que pode explicar a posição de retardatário do país, nesse segmento – tendo sua primeira usina solar fotovoltaica instalada somente em 2011. O PROINFA, que foi central para promover a energia eólica, no Brasil, não incluiu energia solar fotovoltaica; além disso, poucas foram as políticas pelo lado da demanda estabelecidas para promover a energia solar fotovoltaica – apenas em outubro de 2014 foi realizado o primeiro leilão de reserva, exclusivamente, para a contratação de projetos de energia solar fotovoltaica centralizada (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015; AQUILA *et al.*, 2017). A inclusão da fonte solar fotovoltaica na realização desses leilões constituiu, assim como a aprovação da Resolução Nº 482, no caso da geração distribuída, um importante passo inicial para o efetivo aproveitamento do imenso potencial solar brasileiro (ROSA; GASPARIN, 2016).

Dado o sucesso experimentado na expansão da energia eólica, através dos leilões de energia, o governo brasileiro buscou seguir caminho similar para a energia solar fotovoltaica centralizada (SILVA *et al.*, 2019). Atualmente, o sistema de leilões é o principal meio de promoção da energia solar fotovoltaica centralizada no Brasil (AVELINO, 2020). Segundo os últimos dados, publicados pela ANEEL (2020): desde 2014, a energia solar fotovoltaica participou de sete leilões, englobando 159 empreendimentos e totalizando 4,9 GW de potência contratada; 102 empreendimentos com potência de cerca de 3 GW (ou 61% do total licitado) já foram implementados e estão em operação comercial; e o investimento total, atualizado pelo IPCA, gira em torno dos R\$ 29 bilhões, estimando-se que gerou 234.591 empregos na implantação dos empreendimentos.

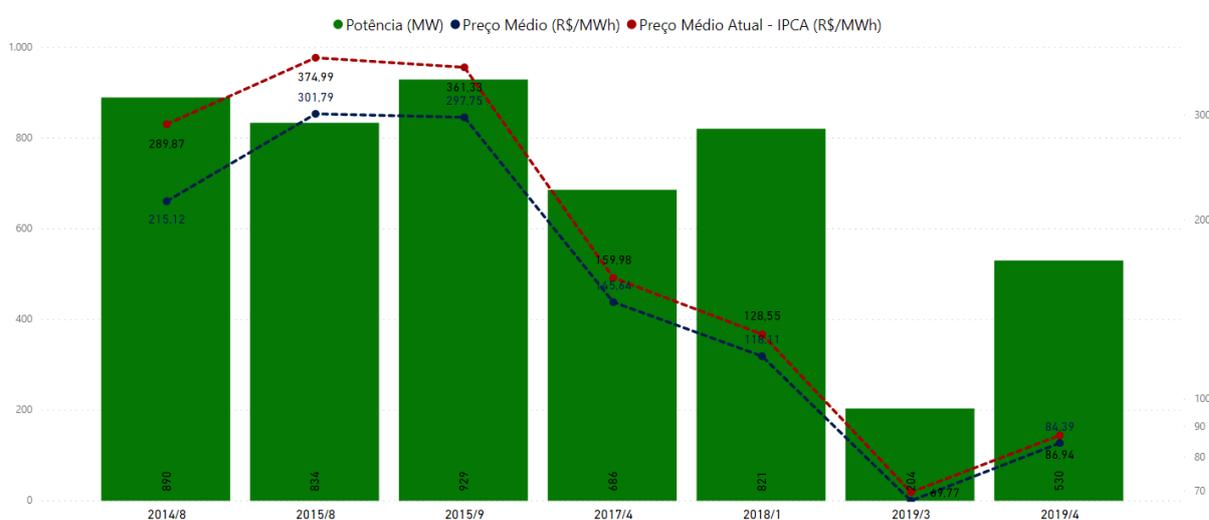
Novamente, assim como observado para a energia eólica, verifica-se significativa participação dos estados do Nordeste, em potência contratada em projetos solares fotovoltaicos centralizados (aproximadamente 74%) – com destaque para os estados da Bahia (24% do total), do Piauí (20%) e do Ceará (17%). Entretanto, no caso da energia solar fotovoltaica, apesar do menor número de leilões, os projetos contratados envolveram uma maior quantidade de estados, 10 ao total<sup>5</sup>, incluindo representantes de outras regiões, especialmente no Sudeste do país (ANEEL, 2020).

Na Figura 5.4, apresentam-se os resultados dos leilões de geração de energia solar fotovoltaica (de geração centralizada), realizados entre 2014 e 2019, tanto em termos

<sup>5</sup> São eles, Bahia, Piauí, Ceará, Minas Gerais, São Paulo, Rio Grande do Norte, Pernambuco, Paraíba, Tocantins e Goiás.

de potência contratada quanto em termos de preço médio (nominal e deflacionado pelo IPCA). Assim como verificado, anteriormente, para a energia eólica, verifica-se, em relação à energia solar fotovoltaica, uma importante queda nos preços médios, também a partir do leilão de 2017. O preço médio da energia solar fotovoltaica observado no leilão 2019/4, 84,4 R\$/MWh, coloca essa fonte como a mais barata dentre as fontes que participaram desse leilão, superando até mesmo a fonte eólica, que ficou em 2º lugar nesse quesito (ANEEL, 2020).

Figura 5.4 – Resultados dos leilões de geração de energia solar fotovoltaica por leilão em potência (MW, eixo esquerdo) e preço médio (R\$/MWh, eixo direito) – Brasil – 2014-2019



Fonte: ANEEL (2020).

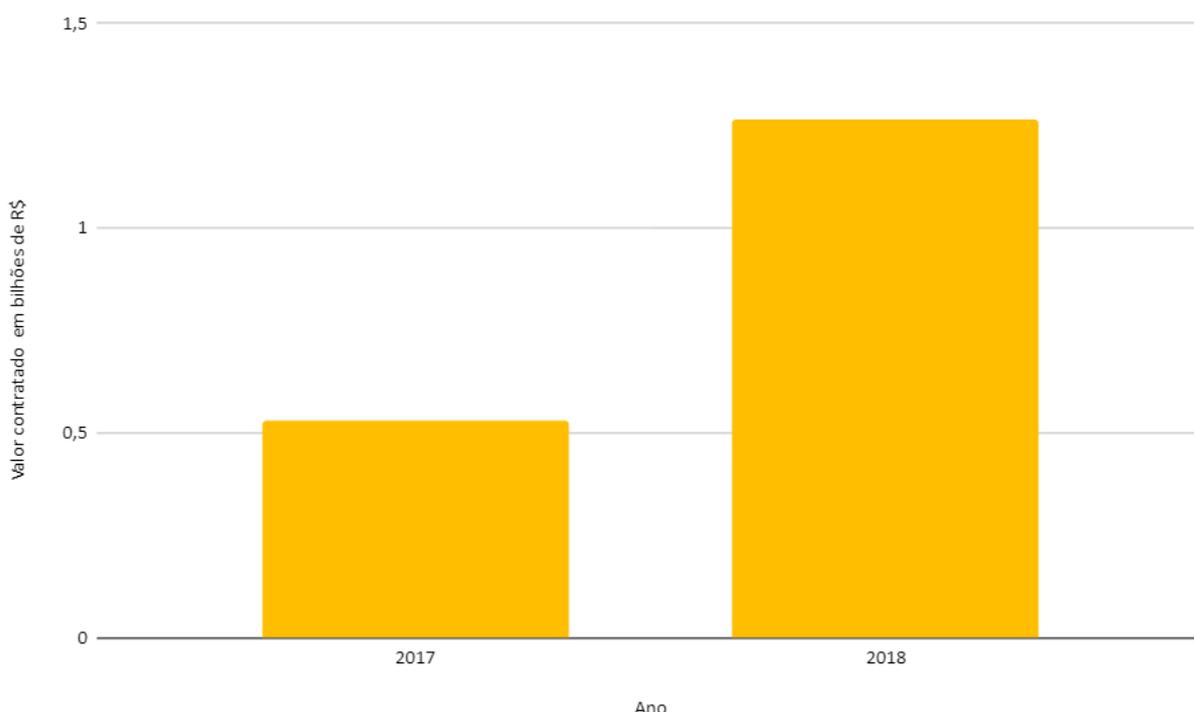
Além disso, assim como também verificado na contratação de energia eólica nos leilões, identificam-se importantes variações nas contratações de energia solar fotovoltaica centralizada – e.g. houve três leilões em 2014 e 2015 e nenhum em 2016. Conforme visto, anteriormente, o cancelamento do leilão de 2016 foi motivado pela crise econômica e pelo excesso de oferta de eletricidade (SILVA *et al.*, 2019), dado o menor consumo de energia elétrica em momentos de crise. Tal volatilidade dos leilões dificulta os investimentos e a implementação no setor solar fotovoltaico brasileiro (LOSEKANN; HALLACK, 2018). Aliado à imprevisibilidade do agendamento dos leilões, segundo adiciona Bradshaw (2017), as iniciativas descoordenadas do governo falham em estabelecer uma visão coerente e sinais críveis para atrair investimentos em energia solar fotovoltaica.

Com a realização de leilões específicos para promoção da energia solar fotovoltaica, o MME estabelece dois objetivos principais: aumentar a capacidade instalada de geração de eletricidade fotovoltaica, e formar um mercado com demanda em escala suficiente para desenvolver uma indústria nacional de células e módulos fotovoltaicos (CARSTENS; CUNHA, 2019). Ainda assim, conforme argumentam Carstens e Cunha (2019), no Brasil, constata-se a carência de políticas estáveis e de longo prazo, dedicadas ao desenvolvimento

de novas tecnologias e de uma indústria nacional de sistemas fotovoltaicos. Essa carência fica evidente, inclusive, no processo de pesquisa desta dissertação, isto é: a quantidade de publicações relacionadas com as políticas de promoção da energia solar fotovoltaica no Brasil é, significativamente, menor que a de energia eólica.

Enquanto a evolução da indústria de energia eólica mostrou grande efetividade na internalização de componentes, a aplicação da política de conteúdo local para energia solar fotovoltaica é ainda muito recente, sendo que o primeiro financiamento do BNDES – respeitando as regras de conteúdo local – foi aprovado apenas em 2017 (LOSEKANN; HALLACK, 2018). Na Figura 5.5, estão apresentadas as operações, contratadas de forma direta e indireta, não automática, no período entre 2017 e 30 de setembro de 2020, relacionadas com a implantação de projetos de energia solar fotovoltaica. No gráfico, fica clara a baixa relevância da energia solar fotovoltaica em termos de montante financiado, quando contrastado com a energia eólica (Figura 5.3). Ademais, verifica-se que 2018 foi o segundo e último ano no qual foram realizadas operações de financiamento do BNDES em energia solar fotovoltaica, demonstrando que o papel crucial que o banco dispensa à energia eólica não é visível também para essa fonte de eletricidade.

Figura 5.5 – Valor contratado das operações contratadas de forma direta e indireta não-automática no setor de energia solar fotovoltaica – Brasil – 2017-2018



Fonte: Dados obtidos a partir da filtragem pelo código CNAE D3511589 (Geração de energia elétrica – Solar) da base de dados de operações contratadas de forma direta e indireta não-automática disponível em BNDES (2020).

O modelo de aplicação do conteúdo local da energia solar fotovoltaica seguiu muitos princípios, aplicados, anteriormente, para a energia eólica, o que configura como uma espé-

cie de aprendizado institucional, posto que existem etapas progressivas a serem seguidas, as quais aumentam com a complexidade da internalização tecnológica. No entanto, atender os requerimentos de conteúdo local depende do potencial nacional e das características das indústrias, podendo-se identificar importantes dificuldades na internalização de algumas tecnologias na cadeia de produção das células e módulos fotovoltaicos – reflexos da própria inexistência de uma política de promoção da energia solar fotovoltaica estável e de longo prazo, e das características da indústria (e.g. alta concentração da produção na China e preços dos módulos em rápida queda) (LOSEKANN; HALLACK, 2018).

Um importante exemplo da deficiência da indústria solar fotovoltaica remete a que o Brasil, apesar de possuir abundantes quantidades de quartzo de alta qualidade, que podem ser refinados em silício, não possui capacidade técnica para realizar esse refino. Esse processo, caro e restrito a poucos países, é especialmente importante para a indústria fotovoltaica, dada a necessidade de silício com alto grau de pureza para produção das células e dos módulos fotovoltaicos. Para suprir essa lacuna na indústria brasileira, o BNDES tem financiado empresas para desenvolver processos de purificação, além de novas tecnologias que demandem menos eletricidade (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015).

### 5.3 ANÁLISE DAS POLÍTICAS E RECOMENDAÇÕES PARA O CASO BRASILEIRO

Conforme discutido no Capítulo 3, a perspectiva *mission-oriented* para políticas de inovação está acompanhada por importantes dificuldades, ainda em aberto, relacionadas a como avaliar os efeitos dinâmicos dessas políticas na criação e formação de novos mercados. Entendendo essas dificuldades, Kattel *et al.* (2018) sugerem três instrumentos, que podem ser importantes para auxiliar a análise de políticas *mission-oriented*: os marcos intermediários; os efeitos *spillover*; e a abordagem de portfólio. A aplicação desses instrumentos, entretanto, envolvem desafios, como: verifica-se no Brasil a inexistência da definição de uma missão relacionada com as energias renováveis, isto é, não há objetivos estratégicos de longo prazo, nem marcos intermediários; a mensuração de efeitos *spillover* envolve um foco mais específico em determinadas políticas, diferente da abordagem mais ampla, adotada nesta dissertação, que buscou apresentar um panorama geral das políticas aplicadas no caso brasileiro; por fim, a análise de portfólios de investimentos, e.g. Inova Energia, envolve a construção de ferramentas e métricas, o que também foge do escopo deste trabalho. Por esses motivos, nesta seção, propõe-se uma análise das políticas de inovação no âmbito das energias renováveis – especialmente, eólica e solar fotovoltaica – colocadas em prática, no caso brasileiro, a partir da construção teórica dos princípios essenciais realizada no Capítulo 3 para as políticas de inovação *mission-oriented*, as quais entende-se como adequadas para promover a transição energética renovável.

### 5.3.1 Aderência aos princípios essenciais das políticas *mission-oriented*

#### 5.3.1.1 Definir uma missão a ser cumprida

O primeiro princípio essencial das políticas de inovação *mission-oriented* tem relação com a escolha estratégica de uma direção concreta, em que se busca transformar a sociedade. A definição de uma missão tem relação com o estabelecimento de objetivos claros e de longo prazo, envolvendo grandes problemas sociais, a serem solucionados através de inovações radicais e de alto impacto em diversos setores da economia. Para tal, é central que a política de inovação *mission-oriented* seja estável ao longo do tempo. Além disso, destaca-se a importância de evitar que as intervenções do Estado, direcionadas para a emergência de novas tecnologias e setores, sejam obstruídas por interesses estabelecidos. Em especial, destaca-se a busca por solução dos problemas ambientais relacionados com o *carbon lock-in*, missão ambiciosa que demanda o desenvolvimento de soluções tecnológicas em diversos setores, particularmente relacionados com as energias renováveis.

O primeiro, e possivelmente o mais relevante, problema identificado, no caso das políticas de promoção das energias renováveis no Brasil, é a ausência de objetivos sustentáveis ou visão estratégica de longo prazo para o desenvolvimento do setor, vistos como cruciais para reduzir as incertezas e promover um ambiente favorável para os investimentos em tecnologias verdes. Sobretudo, destaca-se que não existem, no Brasil, metas de expansão ou indicadores específicos a serem alcançados pelas fontes renováveis de energia, na matriz de geração de eletricidade, seja eólica seja solar fotovoltaica. O mais próximo disso é o Plano Decenal de Expansão de Energia, mas o próprio documento deixa claro que o seu caráter é apenas informativo e indicativo, e não tem intenção de determinar as perspectivas de expansão futura do setor.

O maior exemplo dessa falta de visão estratégica de longo prazo são os leilões de energia, a principal política de introdução e expansão das energias renováveis no Brasil, que tem seu ritmo de contratação condicionado à demanda esperada por eletricidade no curto prazo. Isto é, no Brasil, os objetivos de desenvolvimento e difusão das fontes renováveis se encontram subordinados ao objetivo de expandir a capacidade instalada, para atender o crescimento da demanda por eletricidade no curto prazo. Em uma situação de crise econômica, como a que se arrasta no país, desde 2015, a demanda por eletricidade é menor e, por consequência, a contratação se encontra reduzida, nos últimos anos – o que confere, inclusive, um caráter pró-cíclico ao esquema de leilões. Ademais, isso resulta em baixa previsibilidade por conta da flutuação substancial dos volumes contratados (e.g. volume contratado de energia eólica variou de 0,28 GW, em 2012, para 4,7 GW, em 2013) e em cancelamentos frequentes de leilões programados (e.g. leilão de energia eólica e solar fotovoltaica, previstos para 2016, foram cancelados dias antes da data definida). O problema da incerteza dos leilões, consequência da instabilidade macroeconômica, pode colocar obstáculos aos investimentos no setor e ao desenvolvimento de uma cadeia de

produção nacional de equipamentos de energias renováveis – e.g. turbinas eólicas, e módulos fotovoltaicos.

Além disso, verifica-se que, ao mesmo tempo em que os leilões eram utilizados para contratação de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, eles eram realizados para fontes de energia baseada em combustíveis fósseis, especialmente gás natural, o que contribui para reforçar o *carbon lock-in* no país, e explica o crescimento da participação das fontes fósseis na matriz elétrica brasileira nos últimos anos. Isso demonstra que o objetivo primário desse instrumento é, de forma geral, garantir a segurança energética através da diversificação da matriz elétrica, e não a implementação das fontes renováveis em específico. Desse modo, conclui-se que a política de leilões – como instrumento primário da política de promoção das energias renováveis no Brasil – não está, sistematicamente, direcionada para o cumprimento de objetivos ambientais, essencialmente de longo prazo, mas para a solução de problemas de escassez no abastecimento de eletricidade no curto prazo. Nesse sentido, ainda que promova as energias renováveis, o Estado brasileiro não tem definida, estrategicamente, uma direção ou visão de longo prazo e, por conta disso, os sinais que emite são contraditórios. O próprio Plano Decenal de Expansão de Energia prevê crescimento tanto das fontes renováveis quanto do gás natural, na próxima década.

A superação do *carbon lock-in*, isto é, da trajetória tecnológica, historicamente, construída sobre os combustíveis fósseis, reforçada por fatores institucionais e políticos, será, ainda, um longo caminho a ser percorrido por todos os países do mundo. Nesse contexto, sem um comprometimento político, de longo prazo, para realizar a transição energética, no Brasil, é provável que as chances de aproveitar a janela de oportunidade sejam mais limitadas. Apesar de termos sugerido que, no caso brasileiro, o *carbon lock-in* pode ser menos intenso, devido à relativamente menor participação de fontes fósseis no país, ressaltam-se os importantes entraves à transição energética relacionados ao *carbon lock-in* no Brasil (FERRAÇO, 2016). Como visto no Capítulo 4, do lado tecnológico, destacam-se as trajetórias tecnológicas, construídas ao longo do século XX, enraizadas na Petrobras e na indústria automobilística, ambas de elevada relevância para a economia brasileira, nos dias atuais; do lado político e institucional, verifica-se estruturas de poder que dificultam mudanças no plano energético, como: a resistência política das multinacionais do setor automobilístico; a forte influência da Petrobras nos processos decisórios do MME; e a imensa estrutura de incentivos e subsídios à produção e ao consumo de combustíveis fósseis (1,36% do PIB, em 2019).

Ademais, verifica-se uma elevada dependência da fonte hidrelétrica. Historicamente, também ao longo do século XX, o setor brasileiro de eletricidade foi estruturado em torno do planejamento centralizado da exploração dos recursos hidrelétricos do país, visando gerar energia para a industrialização e o desenvolvimento econômico, especialmente através da Eletrobras. As características do setor brasileiro de eletricidade sugerem que este apresenta estabilidade e continuidade da predominância de hidrelétricas, conduzindo a

uma espécie própria de *lock-in* (CARSTENS; CUNHA, 2019). Conforme visto também no Capítulo 4, do lado técnico, verifica-se que foram desenvolvidas, ao longo dos anos, capacidades tecnológicas na construção de usinas hidrelétricas, que refletem em vantagens de custos e dificultam a introdução de fontes alternativas; do lado político e institucional, tem-se a prática comum, historicamente herdada, de contínua expansão de hidrelétricas, a influência de empresas de distribuição de energia, contrárias ao modelo de geração distribuída e os interesses estabelecidos das grandes construtoras (tanto em hidrelétricas de grande porte quanto na exploração de petróleo do pré-sal).

Apesar disso, diversos fatores apontam que as energias renováveis (não hidrelétricas) são favoráveis no Brasil, como: o alto potencial eólico e solar; a limitada oferta de recursos fósseis de qualidade; e o caráter dinâmico e elevado grau de flexibilidade da matriz energética brasileira. Para tirar proveito dessas condições, bem como da janela de oportunidade em aberto, faz-se necessário, no Brasil, um planejamento energético de longo prazo, para minimizar tanto os problemas de escassez de oferta de energia, quanto para reduzir a dependência de hidrelétricas e de combustíveis fósseis e promover as fontes renováveis e suas indústrias associadas. O Inova Energia foi um grande avanço em termos de políticas de inovação no Brasil, que buscou alinhar objetivos e integrar diversos instrumentos financeiros e instituições federais na mesma direção (MENDONÇA *et al.*, 2018), de forma a impulsionar a inovação tecnológica em setores considerados centrais para a transição para um futuro paradigma techno-econômico, baseado em fontes renováveis. Entretanto, até a presente data, a iniciativa Inova Energia não teve continuidade, tendo selecionado projetos inovativos apenas em um único edital, faz diversos anos, em 2013.

### 5.3.1.2 Promover um portfólio de soluções tecnológicas

O segundo princípio tem relação com as novas oportunidades que se abrem com uma revolução tecnológica, que requer inovações radicais e em grande quantidade, em diversos setores, para entrar em pleno movimento, e em como tirar proveito delas. Dado que a inovação é, fundamentalmente, incerta e que muitos investimentos em novas tecnologias resultam em fracassos, tem-se que o Estado deve dar ênfase à experimentação e exploração de um portfólio de soluções tecnológicas, permitindo que diferentes abordagens coevoluam e concorram entre si, ao mesmo tempo que se mantém em prontidão para cessar apoio a projetos fracassados. É importante, entretanto, que um experimento não seja abortado prematuramente: o registro histórico mostra que diversas tecnologias energéticas precisaram e receberam apoio, a longo prazo, do Estado para se tornarem capazes de competir com as tecnologias estabelecidas.

O ímpeto político para realizar mudanças estruturais no setor de eletricidade surgiu tardiamente no país, somente com a crise energética, ocorrida no início dos anos 2000. Historicamente, as iniciativas foram direcionadas mais para o combate da elevada dependência da fonte hidrelétrica e para garantir a segurança energética no curto prazo, do que com

os objetivos ambientais – o que, inclusive, explica o aumento recente na participação de fontes fósseis. De maneira geral, portanto, as políticas brasileiras não têm a percepção das fontes renováveis como importantes oportunidades tecnológicas para garantir crescimento e desenvolvimento, posto que o principal instrumento de promoção dessas fontes, no país, é um sistema de leilões sem conteúdo local, isto é, sem estar conectado com uma política industrial ou de inovação. Uma percepção das oportunidades estratégicas das energias renováveis é visível somente no governo Lula, que buscou favorecer as energias renováveis como um elemento central de uma economia moderna, na qual o Estado apoiaria as capacidades de inovação e competitividade global do país, e na atuação do BNDES, a partir da qual pode-se observar a ideia de que as indústrias verdes seriam parte da economia do futuro (HOCHSTETLER; KOSTKA, 2015).

Pode-se dizer que o Brasil está, nesse sentido, na contramão de muitos países ao redor do mundo. Por exemplo, na China, desde o início dos anos 2000, houve um crescente consenso, nos círculos políticos, de que o sistema energético mundial estava à beira de uma grande transformação – dos combustíveis fósseis para as fontes renováveis –, e de que a China tinha uma oportunidade histórica de se posicionar na liderança econômica e tecnológica nessa transição (ZHANG *et al.*, 2013b). Documentos oficiais do governo chinês reforçam que o país deve aproveitar-se do seu *status* de recém-chegado em tecnologias e indústrias verdes, reconhecidas como “indústrias emergentes estratégicas”, para *leapfrog* as capacidades atuais nos países avançados, e seu grande mercado doméstico para alcançar rapidamente as economias de escala (ZHANG *et al.*, 2013b; ZHANG *et al.*, 2013a). Pode-se identificar uma atuação bastante ativa e estratégica do Estado chinês, a partir da Lei da Energia Renovável (2006), através de diversas iniciativas e políticas, ao longo de toda a cadeia de inovação, para promover as fontes renováveis.

A falta dessa percepção estratégica de oportunidades tecnológicas se reflete na insuficiência de políticas direcionadas ao desenvolvimento da indústria nacional e à promoção das inovações tecnológicas pelo lado da oferta. Uma exceção é o Inova Energia (2013), que buscou promover um portfólio de soluções tecnológicas, no setor de energia elétrica, para o problema da mudança climática. O Inova Energia teve como objetivo não apenas promover a implementação das energias renováveis no Brasil, mas também impulsionar as inovações e as cadeias de produção dessas indústrias e associadas, no país. O próprio modelo de seleção de projetos apresentava importantes características que favoreciam a criação de portfólios de soluções tecnológicas, através da centralização dos guichês do BNDES e FINEP, evitando duplicidade e promovendo sinergia entre ambas instituições, e da apresentação e defesa presencial de planos de negócios, que deu mais densidade e conteúdo aos pleitos e permitiu a análise comparada de uma carteira de planos de negócios, com finalidade similares. Entretanto, o Inova Energia é considerado como demasiadamente amplo, com uma linha dedicada a múltiplas fontes renováveis ao invés de tipos específicos de renováveis ou componentes tecnológicos (MAZZUCATO; PENNA, 2016).

### 5.3.1.3 Conduzir as políticas de forma holística

O terceiro princípio está relacionado com a condução, de forma “holística”, das políticas de inovação *mission-oriented*. Isto é, dado que o foco é a criação de novos mercados, tem-se, como necessária, a atuação do Estado através da utilização de diversos instrumentos, tanto de oferta quanto de demanda, ao longo de toda a cadeia de inovação, de forma coordenada entre si e com políticas setoriais e transversais. Incluir todo o processo da criação e desenvolvimento de novos conhecimentos até a sua difusão, implementação e exploração comercial na política de inovação é de particular importância no contexto de transição energética renovável, na qual as mudanças devem acontecer na prática e as alternativas devem ter adoção generalizada. Destacam-se, nesse sentido, as políticas direcionadas à criação e ao suporte de um nicho de mercado, para promover uma inovação com propósito específico e aumentar sua viabilidade econômica; e à expansão de mercado, para tirar proveito dos retornos crescentes. A criação de mercados e sinalização do potencial de mercados futuros para as novas tecnologias estimulam atividades do setor privado, posto que este possui tendência de só investir quando as oportunidades claras estão à vista.

No Brasil, verifica-se, ao longo dos anos, a utilização de diversos instrumentos para a promoção das energias renováveis, tanto de demanda – e.g. leilões de energia para geração centralizada e *net metering* para geração distribuída – quanto de oferta – e.g. políticas de financiamento subsidiado e requerimentos de conteúdo local, através do BNDES, e *feed-in tariff* por um curto período. Entretanto, percebe-se que o foco das políticas se encontra na difusão e implementação das tecnologias renováveis no mercado brasileiro, para lidar com os objetivos de segurança energética – em detrimento de oportunidades tecnológicas: o principal instrumento de expansão das energias renováveis no Brasil é um esquema de leilões de energia, sem requerimento de conteúdo local, pelo lado da demanda. Ainda que seja um instrumento importante para promover as tecnologias renováveis, aumentar sua viabilidade econômica e tirar proveito dos retornos crescentes, seu desenho e condução não enfatizam a nacionalização dessas indústrias. Isso fica evidente no caso específico da energia solar fotovoltaica: apesar do rápido crescimento da capacidade instalada nos últimos anos e de ter se tornado a fonte mais competitiva, em termos de preço, no último leilão realizado, a indústria fotovoltaica nacional possui deficiências, e.g. ainda que exista abundância de matérias-primas, a indústria nacional não possui capacidade técnica para realizar o refino do quartzo em silício com alto grau de pureza.

Pelo lado da oferta, a atuação do Estado brasileiro se mostrou mais limitada, refletindo num importante problema identificado no caso brasileiro, a saber, a ausência de uma grande base de produção de equipamentos para a geração de energia eólica e solar fotovoltaica, e a conseqüente dependência de tecnologias desenvolvidas em outros países. A principal política, direcionada para o desenvolvimento da indústria nacional de tecnologias renováveis, é o requerimento de conteúdo local, empregado desde o PROINFA (2002), como forma de compensar os custos adicionais da introdução das energias renováveis ao

sistema de eletricidade, com a nacionalização da produção e inovação tecnológica no setor. Losekann e Hallack (2018) alertam que, embora essa seja a principal política orientada ao desenvolvimento da cadeia produtiva de turbinas eólicas no Brasil, sua aplicação ainda é muito recente para a indústria solar fotovoltaica, apenas a partir de 2017. Outras políticas se mostraram, também, esporádicas: as Chamadas de Projeto de P&D Estratégico da ANEEL realizadas em duas ocasiões (13/2011, para energia solar fotovoltaica, e 17/2013, para energia eólica); e o Inova Energia, que financiou projetos ao longo de toda a cadeia de inovação, incluindo P&D, atividades de engenharia e absorção tecnológica, produção e comercialização de produtos, processos e serviços inovativos, foi realizado apenas uma vez (2013).

A coordenação entre os diferentes instrumentos e políticas, entretanto, é comprometida pela ausência de direção estratégica de longo prazo, por parte do Estado brasileiro, para o setor. O PROINFA (2002) surgiu articulando instrumentos de oferta e demanda, mas foi cancelado em favor de uma política de leilões sem requerimento de conteúdo local, isto é, apenas pelo lado da demanda, poucos anos depois (2008). Além disso, o Inova Energia, apesar do envolvimento de múltiplas agências de financiamento público e da agência reguladora do setor de eletricidade (ANEEL), limitou-se a instrumentos financeiros e careceu de coordenação formal com outras políticas, no âmbito das energias renováveis, e.g. leilões de energia e outras políticas de compras públicas, e demais esforços regulatórios e fiscais (MAZZUCATO; PENNA, 2016; MENDONÇA *et al.*, 2018). A desconexão entre o Inova Energia e o esquema de leilões pode ser explicada pelo fato de que, enquanto o primeiro tinha foco nas inovações tecnológicas, para repensar o setor elétrico nacional; o objetivo do segundo era garantir a segurança energética no país. Ademais, com relação aos instrumentos utilizados, a maior parte foi composta de empréstimos subsidiados, instrumento considerado como não totalmente apropriado para fomentar inovações radicais e de alto risco (MENDONÇA *et al.*, 2018).

Soma-se a isso o fato de que, no Brasil, as políticas macroeconômicas funcionam como um obstáculo às políticas de inovação, demonstrando outra importante instância de falta de coordenação das iniciativas governamentais. Desde o final dos anos 1990, com o tripé macroeconômico – metas de inflação, *superavit* primário e câmbio flexível –, especialmente com o pé fiscal, tem-se que as regras fiscais penalizam, desproporcionalmente, os investimentos públicos em infraestrutura, em momentos de ajuste nas contas públicas, sendo os primeiros a serem cortados nos períodos de crise. Em 2016, após a aprovação do teto de gastos, o cenário se deteriorou ainda mais, diminuindo o espaço para as despesas discricionárias e os investimentos públicos e acirrando os conflitos distributivos por fatias de um bolo cada vez menor, concentrando prejuízos em áreas com menos defensores e sem valor mínimo exigido, como a infraestrutura e a ciência e tecnologia. No caso específico desta dissertação, a instabilidade macroeconômica, que se arrasta desde 2015, no Brasil, é vista como um obstáculo para o desenvolvimento dos setores de energia eólica (DIÓGENES

*et al.*, 2019) e solar fotovoltaica (CARSTENS; CUNHA, 2019).

#### 5.3.1.4 Investir e estimular o investimento

O quarto princípio é uma ramificação do terceiro e está associado com as políticas de investimento e de financiamento público em inovações. Na transição efetiva para uma economia verde, ambos os investimentos, públicos e privados, são necessários. Através de investimentos estratégicos em toda a cadeia de inovação, o Estado é capaz de determinar a direção do crescimento econômico, criando novos mercados e impactando nas expectativas privadas, acerca das oportunidades futuras de crescimento. Dessa forma, os investimentos e as políticas do Estado possuem impacto positivo nos investimentos privados, através de efeitos multiplicadores e de *crowding-in*, especialmente em áreas de elevada incerteza, como as tecnologias verdes e as energias renováveis. Os bancos de desenvolvimento, em particular, são uma fonte com crescente importância no financiamento público estratégico, direcionando os investimentos para direções específicas, relacionadas com missões tecnológicas e grandes desafios sociais.

Nesse ponto, deve-se ressaltar o papel central desempenhado pelo BNDES, o qual, assim como os bancos de desenvolvimento em geral, possui potencial de ser central na atuação em políticas de inovação *mission-oriented*. Em especial, a existência do BNDES, um bolsão de excelência burocrática, como coloca Carvalho (2020), reforça a percepção de que é possível implementar, no Brasil, um modelo de desenvolvimento sustentável, centrado em estruturas produtivas, adequadas aos problemas sociais do século XXI, e.g. a transição energética renovável e a superação do *carbon lock-in* para combater as mudanças climáticas. A própria atuação do banco já evidencia a ideia de que as indústrias verdes podem ser elementos centrais da economia do futuro. Nos últimos anos, entretanto, o BNDES vem sendo desmontado e as suas atividades demonizadas em meio à frustrada busca pela tal “caixa preta”.

O banco de desenvolvimento brasileiro participou de, praticamente, todas as principais iniciativas do governo na promoção das energias renováveis realizadas até a presente data – desde o financiamento dos projetos contratados no PROINFA e nos leilões de energia, até os requerimentos de conteúdo local e o Inova Energia (em parceria com a FINEP, que pode ser considerada um banco de desenvolvimento para projetos de ciência, tecnologia e inovação). Ao aplicar requerimentos de conteúdo local, o BNDES vai além de simplesmente financiar projetos e definir condições para acesso ao capital, o que permite promover a criação de valor social e econômico relacionado com as energias renováveis para o país. Os dados das operações do banco, entretanto, sugerem que, na energia eólica, a presença do BNDES é muito mais forte do que na energia solar fotovoltaica: além do maior valor contratado nas operações, o banco financiou investimentos em energia eólica em todos os anos, entre 2005 e 2020, ao mesmo tempo que financiou investimentos em energia solar fotovoltaica, tardia e descontinuadamente, apenas entre 2017 e 2018.

### 5.3.1.5 Incorporar o aprendizado na governança

O quinto princípio, por fim, está ligado à necessidade de se incorporar o aprendizado institucional, isto é, as políticas de inovação devem ser conduzidas como um processo de exploração e descoberta das características que as agências governamentais devem possuir para lidar com a incerteza fundamental do processo inovativo. Nesse sentido, necessita-se de experimentação, aprendizado e inovação não apenas na economia, mas também na governança e na prática da condução de políticas. Um importante componente disso é a condução de políticas adaptativas às mudanças nos ambientes sociais e técnicos, o que permite um contínuo monitoramento e aprendizado no desenho e na condução de políticas. Ademais, uma interessante forma de o Estado lidar com a incerteza fundamental é a abordagem de portfólio, na qual o sucesso de alguns dos projetos podem fornecer recompensas suficientes para cobrir as inevitáveis perdas em outros, as quais são usadas como instrumento de aprendizado para melhorar as políticas futuras.

No caso brasileiro, verifica-se algum aprendizado na condução das políticas de promoção das energias renováveis ao longo dos anos, especialmente na aplicação de instrumentos de uma fonte de energia para outra. Por exemplo, dado o sucesso experimentado na expansão da energia eólica, por meio de um esquema de contratações de capacidade de geração de eletricidade, através de leilões exclusivos desde 2009, o governo brasileiro buscou seguir um caminho similar para a energia solar fotovoltaica centralizada, aplicando a política para essa fonte, a partir de 2014, nos mesmos moldes aplicados para a energia eólica. Outro exemplo que pode ser destacado refere-se ao papel do BNDES através dos requerimentos de conteúdo local, inicialmente aplicados para a energia eólica e, bastante recentemente, em 2017, para a energia solar fotovoltaica. Esse instrumento, inclusive, passou por evoluções ao longo dos anos, de forma a promover a nacionalização de componentes mais complexos e de maior intensidade tecnológica, e.g. a partir de 2015, o BNDES passou a financiar apenas nacelles de produção local, componente de maior complexidade da turbina eólica.

Ademais, destaca-se o aspecto de aprendizado institucional, incorporado no Inova Energia, plano que resultou da experiência adquirida pelo BNDES e pela FINEP em políticas de inovação. O PAISS, que serviu de modelo para o Plano Inova Empresa, aplicado em diversos setores (energias renováveis, telecomunicações, aerodefesa, petróleo, mineração, saúde, etc.), é considerado, em si mesmo, uma inovação, exigindo revisões, ao longo no tempo, na concepção e execução do plano. Essas iniciativas são, verdadeiramente, sistêmicas, e direcionadas para a promoção do desenvolvimento de tecnologias que endereçam desafios específicos, isto é, são exemplos de políticas de inovação *mission-oriented* aplicadas no Brasil. O Inova Energia, em particular, ainda que tenha resultados práticos limitados, representa, de acordo com [Mazzucato e Penna \(2016\)](#), esforços ambiciosos, a partir de instituições de financiamento público brasileiras, especialmente do BNDES, para a construção de um setor de eletricidade baseado energias em renováveis. Por fim, o Inova

Energia é um exemplo de programa que adotou a abordagem de portfólio e selecionou diversos projetos, contendo múltiplas soluções tecnológicas para os problemas selecionados pelo Estado.

### 5.3.2 Pelo resgate da atuação do Estado em políticas de inovação como estratégia de desenvolvimento no Brasil

Recapitulando o que foi discutido ao longo desta dissertação, as sucessivas revoluções tecnológicas dão origem a distintos grandes surtos de desenvolvimento, tornando necessário o estabelecimento de estratégias nacionais de desenvolvimento originais, capitaneadas pelo Estado, para o engajamento dos países nas fases iniciais de novos paradigmas tecno-econômicos. Historicamente, o Estado liderou o processo inovativo e forneceu direcionamento para novos paradigmas, que não teriam surgido espontaneamente, de forças de mercado. Portanto, entende-se que, para tirar proveito das janelas de oportunidades abertas por uma transição entre paradigmas tecno-econômicos, é central a participação de um Estado “forte”, exercitando sua liderança através da indução de ações convergentes, de vários atores, em determinadas direções (PEREZ, 2001). Aplicando essas ideias ao caso específico das tecnologias verdes (e.g. as energias renováveis) Perez (2013a) observa: a convergência e articulação de esforços, necessárias para conduzir a sinergias entre fornecedores e mercados, de maneira a aumentar a viabilidade econômica e a lucratividade dessas tecnologias, podem ser induzidas por meio do estabelecimento de uma clara direção comum por parte de um Estado ativo.

Em outro ponto, Perez (2001) defende, ainda, uma reformulação das políticas de inovação, na qual o componente tecnológico deve ser visto como central para as políticas de desenvolvimento. Desse modo, num momento de transição, a estratégia de desenvolvimento deve estar voltada para o enfrentamento de desafios e aproveitamento de oportunidades atuais, e não do passado, colocando as novas áreas de conhecimento no núcleo do pensamento de desenvolvimento (PEREZ, 1985; PEREZ, 2001). Ao longo do presente trabalho, argumentou-se que um dos maiores desafios e oportunidades da atualidade estão relacionados à mudança climática e às tecnologias verdes, especialmente no que tange à geração e ao consumo de energia, destacando a importância das energias renováveis na economia do futuro. Ressalta-se, assim, o papel central do Estado na identificação de setores-chave, que permitam realizar a transição para um emergente paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis, bem como na condução de políticas de inovação nessa direção. Se, por um lado, os esforços tecnológicos para a transição energética renovável envolvem maiores incertezas, tecnológicas e de mercado, por outro, têm potencial de permitir o *catch-up* e, até mesmo, o *forge ahead*, nos países em desenvolvimento.

Nesse contexto, baseando-se na ideia de estratégia de desenvolvimento produtivo e tecnológico, orientada por missões, isto é, políticas de inovação *mission-oriented* (MAZZUCATO, 2014b; MAZZUCATO, 2015; MAZZUCATO, 2016; MAZZUCATO, 2018; FAGER-

BERG, 2018b; BUSCH *et al.*, 2018), propõe-se, nesta dissertação, orientar as políticas de desenvolvimento tecnológico ativo e estratégico para a solução dos grandes problemas sociais do século XXI, sobretudo os urgentes problemas ambientais, decorrentes da emissão de gases do efeito estufa no setor energético. De acordo com Carvalho (2020), o fato de o Brasil (ainda) possuir alguns “bolsões” de excelência burocrática, como o BNDES, contribui para o enfrentamento desses desafios. Por outro lado, o Estado brasileiro, apesar de possuir os instrumentos necessários para pôr em ação políticas, visando o desenvolvimento de uma estrutura produtiva, capaz de atender os desafios do século XXI, esses instrumentos vem sendo desmontados nos últimos anos; a própria plataforma eleitoral, que elegeu o atual presidente, aproveitou-se da percepção de que a corrupção era a causa da crise econômica para colocar a população contra o próprio Estado (CARVALHO, 2020). O processo de desconstrução do Estado virou projeto, com desdobramentos sobre a Petrobras, Eletrobras, BNDES etc.

A adoção de uma política de inovação, como estratégia de desenvolvimento, é, portanto, objeto de decisão política. Até o final da década de 1970, o desenvolvimento brasileiro foi, fortemente, estimulado pelo que Suzigan e Furtado (2010) chamam de políticas industriais – conceito que também enfatiza o papel das inovações –, efetivamente implementadas, com méritos e problemas, por uma organização institucional do Estado, construída a partir da década de 1930. No Brasil e, em certa medida, na América Latina como um todo, verificou-se, em meados do século passado, uma grande influência do pensamento cepalino, no qual o Estado possuía papel ativo e protagonista e no qual a ampliação e o fortalecimento do aparelho estatal foi o instrumento básico da política econômica (IGLESIAS, 2010). Na década de 1980, entretanto, esse modelo heterodoxo da CEPAL entrou em colapso por conta da crise econômica ocorrida naquela década, especialmente em relação à dívida pública, que acelerou a inflação e destacou a perda de competitividade das economias latino-americanas (IGLESIAS, 2010).

A partir de 1980, portanto, o Brasil praticamente deixa de implementar políticas industriais – e muitas das tentativas acabam frustradas –, tanto por conta da instabilidade macroeconômica típica do período posterior a 1980, quanto de uma “destruição não criadora” das instituições: dos anos 1980 até final dos anos 1990, verifica-se que muitas das principais instituições de política industrial e de ciência e tecnologia passaram por um contínuo processo de esvaziamento, perdendo recursos e pessoal técnico e desvirtuando funções (SUZIGAN; FURTADO, 2010). Nesse contexto, Iglesias (2010) argumenta que os problemas macroeconômicos de curto prazo, resultantes da crise da dívida, monopolizaram a atenção das políticas da maior parte dos países latino-americanos – e.g. o tripé macroeconômico no Brasil –, de tal forma que as perspectivas de longo prazo, na formulação da política de desenvolvimento, se perderam. No limite, abandonou-se o modelo heterodoxo e adotou-se o modelo ortodoxo do Consenso de *Washington*, baseado nas regras de jogo do mercado e num conceito de Estado minimizado e menos intervencionista, o que significou

o fechamento de instituições, a eliminação de instrumentos de política e um movimento generalizado de privatizações (IGLESIAS, 2010).

O diagnóstico de Suzigan e Furtado (2010), com relação às instituições brasileiras de políticas industriais, identifica diversos fatores que impõem dificuldades na implementação de políticas industriais e tecnológicas para realizar o *catch-up* no país: a) não atuam de forma sistêmica ou articulada, com base em visão compartilhada quanto aos objetivos, o que gera conflitos de competência, superposição de funções e ineficiência; b) estão, em muitos casos, envelhecidas e marcadas por suas missões do passado – por isso, têm dificuldades para responder aos desafios impostos, seja pela dinâmica do crescimento econômico impulsionado por inovações, seja por uma visão de futuro da indústria e da tecnologia; c) constituem um conjunto extremamente complexo, fragmentado, com grande dispersão e desarticulação de instrumentos que, por vezes, geram conflitos de competências; d) operam com quadros técnicos que ainda não têm todas as capacitações requeridas por missões mais qualitativas e sofisticadas da atualidade, relacionadas a visões prospectivas de política industrial e tecnológica; e) geram grandes dificuldades em termos de articulação entre instituições e instrumentos, da política industrial com outras políticas e com o setor privado; e f) o maior problema e a questão central a ser resolvida, as instituições têm um frágil comando político e uma séria deficiência de coordenação.

No início dos anos 2000, o governo se esforçou, com resultados limitados, para reviver a política industrial e para criar instrumentos e programas para promover o *catch-up* industrial e tecnológico (SUZIGAN *et al.*, 2020). Nos dias atuais, entretanto, a situação vem se deteriorando ainda mais, e a política de desenvolvimento e de inovação se encontra “demonizada” no Brasil, em parte, segundo Carvalho (2020), em decorrência de políticas frustradas no passado recente. Na administração da presidente Dilma, por exemplo, foi adotada uma série de medidas para redução dos custos de produção do empresariado brasileiro. Essa agenda incluiu a redução dos juros – e a conseqüente desvalorização do real, conforme defendido pelo novo-desenvolvimentismo brasileiro – e uma série de desonerações. Os resultados foram negativos: a produção industrial, os investimentos privados e as exportações de manufaturados não reagiram conforme o esperado, e as desonerações funcionaram apenas para aumentar as margens de lucros das empresas; esse fracasso agravou a desaceleração da economia – que se encontrava em um cenário internacional desfavorável – e a deterioração das contas públicas, o que abriu espaço para a defesa do corte de gastos e para a implementação de uma agenda de austeridade a partir de 2015 (CARVALHO, 2020).

O mesmo empresariado que demandou políticas de redução de impostos e de desvalorização cambial no governo Dilma, apoiou também a agenda de flexibilização das relações trabalhistas e outras medidas voltadas à diminuição dos custos com a mão de obra, contidas nas reformas trabalhistas de Temer e, depois, do atual presidente; mais uma vez, os resultados foram frustrantes: as reduções de custos com mão de obra, trazidas pela reforma

trabalhista de 2017, se mostraram ineficazes para a manutenção do nível de emprego e, sobretudo, para o aumento da competitividade da indústria nacional. Vale ressaltar que todas essas agendas são voltadas para o acirramento da concorrência via preços, que perde peso e importância para a concorrência via qualidade e domínio de tecnologias pouco disseminadas, conforme aumentam-se o grau de sofisticação dos produtos manufaturados (CARVALHO, 2020).

A inércia criada pelos fracassos do passado, segundo Perez (1985), pode fazer com que os países em desenvolvimento percam as janelas de oportunidade em aberto. É nesse mesmo sentido que Suzigan e Furtado (2010) argumentam que a política industrial, no Brasil, deve assumir, como tarefa mais importante, a reconquista do seu espaço ao lado das políticas macroeconômicas e demais políticas, especialmente após o longo período de falta de legitimidade, de ostracismo, e de condenação pelos males produzidos ou atribuídos – que, inclusive, contribuíram para apagar as suas conquistas históricas no país. Portanto, antes que uma política ativa e estratégica, mirando a transição para um novo paradigma tecno-econômico, seja possível ou viável, um grande nó precisa ser desatado: deve-se restaurar o Estado e recuperar a política de inovação como elemento central na estratégia de desenvolvimento no Brasil, a partir de uma perspectiva de longo prazo.

Para Suzigan e Furtado (2010), uma reforma institucional é essencial para que a política industrial seja executada de forma eficaz: o Estado deve ser organizado, e os mecanismos e instrumentos devem ser moldados, em função das políticas que se pretende implementar e dos objetivos que se deseja alcançar, baseando-se em metas, etapas, cronogramas, definição de responsabilidades, mobilização de competências existentes e desenvolvimento de novas, e o estabelecimento de mecanismos de acompanhamento e monitoramento. Nesse contexto, um dos fatores centrais é o problema da coordenação, isto é, a compatibilização de objetivos, metas e instrumentos de política entre si e com a política macroeconômica e de investimentos públicos, que se desdobra em dois: do lado técnico, implica dotar o sistema de uma instituição de comando e coordenação, que tenha poder de articular ministérios, órgãos públicos e setor privado; do lado político, isso significa uma nova distribuição de poderes, redefinição de funções e realinhamento em torno de uma estratégia comum, de forma que o sistema opere de forma articulada e com base numa visão compartilhada de estratégia de política industrial, o que, entretanto, enfrenta resistência política, técnica e burocrática (SUZIGAN; FURTADO, 2010). Argumenta-se que esses pontos – e.g. objetivos comuns e visões compartilhadas, acompanhamento e monitoramento constante das políticas e, especialmente, a necessidade de coordenar os instrumentos e as políticas – estão em concordância com as políticas de inovação *mission-oriented* (Capítulo 3).

Para Carvalho (2020), adicionalmente, a atuação ativa e empreendedora do Estado está também conectada com a capacidade do Estado de desempenhar as funções de estabilizador, investidor, protetor e prestador de serviços. Dessa forma, a superação das carências

identificadas no Estado brasileiro, nas suas funções: de estabilizador – impossibilitada pela meta de *superavit* primário –, de investidor – restringida, especialmente, após a aprovação do teto de gastos –, de protetor – que vem se deteriorando com a precarização das relações trabalhistas, previdenciárias etc. – e de prestador de serviços – limitada também pelo teto de gastos, inclusive em saúde e educação –, permitiria colocar, novamente, o Estado em posição ativa e estratégica no desenho dos incentivos à inovação e à produção local, isto é, para cumprir sua função de empreendedor no Brasil. Nesse sentido, as políticas de inovação dependem de outras políticas públicas, de forma sistêmica.

Outro importante passo nesse processo de recuperação das políticas industriais está ligado à formulação e implementação de políticas, cujos objetivos sejam amplamente compreendidos e assimilados como sendo de interesse geral – “capazes de tocar as sensibilidades e as razões, o imaginário e o concreto, com casos que possam ser erigidos à condição de símbolos e exemplos” (SUZIGAN; FURTADO, 2010, p. 31) –, de forma a reunir apoios e ampliar adesões. Inclusive, um amplo apoio é necessário para que os objetivos e as metas possam ser mantidos pelo tempo necessário para que possam ser alcançados. Argumenta-se, aqui, que, organizar a atuação da política de inovação, a partir do estabelecimento de missões orientadas à solução de problemas sociais e ambientais, pode, inclusive, se tornar uma nova forma de construir apoio popular às políticas de inovação, através da geração de melhorias no bem-estar e nos benefícios sociais diretos, de médio e longo prazos, e atendendo demandas democráticas da sociedade brasileira – legitimando a política de inovação, tão desacreditada no Brasil.

### 5.3.3 Recomendações de políticas

Ainda que fique clara a falta de qualquer intenção do governo atual de implementar um plano na direção de buscar soluções para os grandes problemas sociais da atualidade, sobretudo os urgentes problemas ambientais, decorrentes da emissão de gases do efeito estufa no setor energético, isso não deveria nos isentar de traçá-lo (CARVALHO, 2020). Nesta subseção, portanto, busca-se elencar algumas recomendações de políticas que se acredita serem essenciais para guiar as políticas brasileiras, no sentido de promover, de maneira mais efetiva, a transição energética renovável – tendo como requisito, claro, o resgate das políticas industriais e de inovação no Brasil:

1. Definir uma direção estratégica e de longo prazo, na qual se busca transformar o sistema elétrico brasileiro, levando em conta os aspectos sociais, econômicos e ambientais, de forma aberta e transparente, enfatizando a superação do *carbon lock-in* através de inovações tecnológicas em energias renováveis – sem perder de vista iniciativas para desestabilizar o *lock-in*, e.g. redução e eventual cessação dos subsídios aos combustíveis fósseis. Sendo estratégica e de longo prazo, devem-se transformar as políticas de governo, efetivamente, em políticas de Estado. Nesse planejamento,

diversos objetivos sociais, ambientais e econômicos podem ser compatibilizados e endereçados – e.g. difusão das energias renováveis, redução das emissões de gases do efeito estufa, criação de novos mercados de energia, criação de empregos verdes, investimentos em inovação, desenvolvimento tecnológico –, de forma a obter amplo apoio na sociedade brasileira;

2. Utilizar o já existente esquema de leilões de energia para promover a expansão das energias renováveis de forma independente ao nível de crescimento econômico, isto é, de forma mais estratégica. Dessa forma, mesmo em momentos em que a demanda por energia caia ou não aumente, como no período recente de crise econômica e política, os leilões para fontes renováveis podem ser utilizados para reduzir a participação de fontes fósseis e a forte dependência das hidrelétricas, além de promover a cadeia nacional de produção e inovação em tecnologias renováveis de forma mais estável ao longo do tempo. Desse modo, pode, inclusive, conferir um caráter anticíclico à política, promovendo investimentos e criando empregos (verdes) também, e especialmente, em momentos de crise;
3. Aliar o aprimoramento desse instrumento pelo lado da demanda com uma maior utilização de instrumentos de política, direcionados para o desenvolvimento da indústria nacional e da inovação em tecnologias renováveis, também pelo lado da oferta, de forma a promover a geração de soluções tecnológicas a serem implementadas na prática pelas políticas de demanda. Por exemplo, sugere-se a utilização de requerimentos de conteúdo local de forma bem ajustada para internalizar a cadeia produtiva das tecnologias renováveis de fronteira, evitando criar um viés no uso de tecnologias já maduras e internalizadas;
4. Dentre os instrumentos pelo lado da oferta, destaca-se o Inova Energia. O plano alinhou objetivos e integrou diversos instrumentos financeiros e instituições federais na mesma direção, porém selecionou projetos em apenas uma ocasião, diversos anos atrás (2013). Sugere-se que o modelo aplicado, já possuindo diversas características desejáveis em uma política *mission-oriented* – e.g. alinhamento de objetivos estratégicos, abordagem de portfólio de soluções tecnológicas, coordenação entre diferentes instituições –, pode ser aprimorado – e.g. integrando também instrumentos não financeiros, como compras públicas e regulação, e com foco mais específico nas energias renováveis – e repetido no futuro;
5. Reformar a estrutura institucional existente, de forma a dotar uma instituição de comando sobre as políticas de promoção das energias renováveis no Brasil, identificando ações e atribuindo responsabilidades, de modo a compatibilizar os objetivos, as metas e os instrumentos, e aprimorar a coordenação – inclusive com as políticas macroeconômicas, de caráter menos restritivo –, além de desempenhar um contínuo

processo de monitoramento, melhoria e revisão das iniciativas. Uma importante instituição brasileira que poderia cumprir esse papel é o próprio BNDES, que participou de, praticamente, todas as iniciativas relacionadas com as energias renováveis no Brasil, além de possuir vasta experiência e capacidade, bem como potencial para conduzir políticas de inovação *mission-oriented*. Como banco de desenvolvimento, têm uma estrutura institucional apropriada para lidar com os grandes desafios, inclusive em termos de coordenação entre políticas e com os diversos atores do sistema;

6. Em relação às diferentes fontes renováveis, em específico, verifica-se a necessidade de dar maior ênfase à energia solar fotovoltaica, fonte que se configura como uma das mais importantes no mundo, por conta de seu grande potencial (centralizada e distribuída), e por ainda possuir um grande espaço para melhorias em sua eficiência. Ademais, identifica-se uma ausência de iniciativas para a promoção da energia eólica *offshore* em larga escala: além do elevado potencial totalmente inexplorado, o fato de a maior parte da população brasileira viver em região próxima ao litoral favorece a exploração de ventos *offshore* próximos às áreas de maior consumo. Potencialmente, esse desenvolvimento pode se aproveitar do *know-how* da Petrobras, relacionado com plataformas sobre mar (que, inclusive, já vem implementando um projeto-piloto em pequena escala);
7. Por fim, acredita-se ser estratégico enfatizar o componente de desenvolvimento regional das políticas de promoção das energias renováveis. Posto que o Nordeste, uma das regiões menos desenvolvidas do país, concentra em seu território grande parte do potencial eólico e solar brasileiro, entende-se que essa região, historicamente carente e estagnada, pode se beneficiar socialmente – e.g. segurança energética – e economicamente – e.g. geração de empregos verdes – de forma ainda mais evidente do que outras regiões do país.

#### 5.4 SÍNTESE CONCLUSIVA

Neste capítulo, realizou-se uma análise do papel do Estado em políticas de inovação em energias renováveis – especificamente eólica e solar fotovoltaica – no caso brasileiro. Para tomar proveito do elevado potencial das fontes eólica e solar fotovoltaica, verificam-se iniciativas públicas, associadas com diversas instituições governamentais – ministérios, agência reguladora, empresa estatal e instituições de financiamento. Dentre as principais iniciativas, destacam-se: o PROINFA; os leilões de energia; as políticas de financiamento público e requerimentos de conteúdo local do BNDES; as chamadas de P&D estratégico da ANEEL; a Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482; e o Inova Energia. A análise dessas políticas, com base na literatura das políticas de inovação *mission-oriented*, sintetizadas nos cinco princípios essenciais, apresentados no Capítulo 3, demonstra que as iniciativas brasileiras não possuem certas características importantes para promover, de forma efetiva, uma tran-

sição energética renovável, e que podem restringir a sua contribuição para o enfrentamento dos desafios e o aproveitamento das oportunidades. Destacam-se, em particular: a ausência de uma visão estratégica, de longo prazo, para o desenvolvimento do setor renovável; a insuficiência de políticas direcionadas para o desenvolvimento da indústria nacional e da inovação em tecnologias renováveis, pelo lado da oferta; e a falta de coordenação dos diferentes instrumentos de promoção das energias renováveis – entre si e com as políticas macroeconômicas.

Antes que uma política ativa e estratégica, mirando a transição para um novo paradigma tecno-econômico, seja possível ou viável, deve-se restaurar o Estado e recuperar a política de inovação, como elemento central na estratégia de desenvolvimento no Brasil, a partir de uma perspectiva de longo prazo. Adicionalmente, fazem-se algumas recomendações de políticas específicas para o setor de energias renováveis no Brasil. São elas: a) definir uma direção estratégica e de longo prazo para guiar a transição energética renovável, no setor elétrico brasileiro, aliando objetivos sociais, ambientais e econômicos; b) utilizar a política de leilões de forma independente ao nível de crescimento econômico, promovendo o setor de forma mais estratégica e estável; c) aprimorar e utilizar, de forma mais extensiva, instrumentos para promoção da indústria nacional e das inovações tecnológicas, pelo lado da oferta; d) em especial, destaca-se a realização de iniciativas similares ao Inova Energia, porém aprimoradas, para desenvolver a indústria e promover a inovação pelo lado da oferta; e) uma reforma institucional, que estabeleça uma instituição governamental de comando – e.g. BNDES –, de forma a alinhar objetivos, aprimorar a coordenação e desempenhar um contínuo processo de monitoramento, melhoria e revisão das iniciativas; f) dar maior ênfase às fontes solar fotovoltaica e eólica *offshore* nas iniciativas; e g) por fim, ressaltar os aspectos de desenvolvimento regional das políticas de promoção das energias renováveis no Nordeste. Acredita-se que essas sugestões possam ser úteis para a condução mais efetiva de políticas de inovação para a transição para um paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral desta pesquisa consistiu em analisar a atuação do Estado brasileiro, por meio de políticas de inovação orientadas a promover a transição energética renovável – especialmente, no tocante às energias eólica e solar fotovoltaica –, a fim de enfrentar os desafios da mudança climática e do *carbon lock-in*, e de tirar proveito da potencial janela de oportunidade em aberto, que as energias renováveis podem representar.

O primeiro passo para alcançar esse objetivo e responder a pergunta de pesquisa foi no sentido de trabalhar, com base na literatura neo-schumpeteriana, o argumento de que as energias renováveis – aliada às TIC – podem ser entendidas como um conjunto de insumos-chave de uma emergente revolução tecnológica. Destacam-se, entre as energias renováveis, especialmente, as fontes eólica e solar fotovoltaica, por serem as fontes renováveis de maior relevância no presente e expectativa no futuro – em termos de investimentos, capacidade instalada e potencial de geração –, e, por apresentarem rápidos avanços em suas características de eficiência e custos nos anos recentes – centrais para que obtenham vantagens de custo relativo. A percepção de que o *carbon lock-in* pode ser, relativamente, menos restritivo em países em desenvolvimento, aliado com a ideia de que a transição entre paradigmas tecno-econômicos abre uma janela de oportunidade para realizar o *catching up* ou o *forging ahead*, coloca os países em desenvolvimento em posição favorável para aproveitar o grande surto de desenvolvimento que as energias renováveis têm potencial de gerar, dado que os países avançados também estão aprendendo. Ressaltou-se, entretanto, que o aproveitamento dessa janela de oportunidade não é automático, mas depende de iniciativas e ações direcionadas do Estado, e de uma reformulação das políticas de inovação, colocando a ciência e a tecnologia, relacionadas com as novas oportunidades tecnológicas, no centro das políticas de desenvolvimento.

Esse fato tornou necessária a exploração das políticas de inovação orientadas pela missão de realizar a transição energética. A literatura das políticas de inovação *mission-oriented* ressalta a necessidade de um Estado forte, ativo e empreendedor para lidar com a magnitude e a complexidade do processo de transição entre paradigmas. Com base nessa literatura, portanto, foram ressaltados cinco princípios essenciais, que devem guiar a atuação do Estado na criação e formação de novos mercados, os quais são entendidos como adequados para promover a transição energética renovável: a) definição de uma missão a ser cumprida; b) promoção de um portfólio de soluções; c) condução holística das políticas de inovação; d) estímulo do investimento privado; e) incorporação do aprendizado na governança. Avaliar o impacto dinâmico das políticas de inovação, entretanto, envolve desafios, como: descartam-se, como inadequadas, as análises *ex ante* de custo-benefício estáticas, baseadas na concepção de falhas de mercado; e chama-se atenção para a importância de abordagens alternativas – que levem em consideração fatores como a incerteza fundamental, *path dependence*, desproporcionalidade entre causa e efeito, emergência e

ausência de um ponto de ótimo.

Na análise do contexto do caso específico do Brasil, identificou-se um caso peculiar: apesar da baixa participação dos combustíveis fósseis e do sucesso das energias renováveis, este se resume principalmente à fonte hidrelétrica. Ainda assim, 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, 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, inexplorados. Contudo, a taxa de crescimento da capacidade instalada dessas fontes e o crescimento da participação dessas fontes, no total de energia elétrica gerada nos anos recentes no país, demonstram importantes avanços na penetração dessas fontes, no setor de eletricidade, em grande medida, frutos de uma série de políticas governamentais. Essas iniciativas estão associadas com diversas instituições governamentais – ministérios, agência reguladora, empresa estatal e instituições de financiamento – e foram/são aplicadas em um contexto de políticas macroeconômicas adversas às políticas de inovação – o tripé macroeconômico e, depois de 2016, o teto de gastos –, que impactam, negativamente, o desenvolvimento dos setores de energia eólica e solar fotovoltaica.

Com base num estudo de caso, construído sobre os princípios essenciais e recomendações de políticas da teoria das políticas de inovação *mission-oriented*, pode-se afirmar que o Estado brasileiro realizou, historicamente, diversas iniciativas para a promoção de fontes renováveis, com foco maior em energia eólica do que energia solar fotovoltaica. Dentre as principais iniciativas, destacam-se: o PROINFA (2002), um marco importante para a energia eólica, sem, no entanto, incluir a energia solar fotovoltaica; os leilões de energia, primeiro para eólica (2009) e, posteriormente, para solar fotovoltaica (2014); as políticas de financiamento público e os requerimentos de conteúdo local para obtenção de crédito, disponibilizados pelo BNDES, importantes para a energia eólica, ao longo de todo o período, e tardiamente aplicadas ao caso solar fotovoltaico (2017); as chamadas de P&D estratégico da ANEEL, em 2011, para solar fotovoltaica, e em 2013, para eólica; a Resolução Normativa N<sup>o</sup> 482 (2012) para geração distribuída e *net metering* de energia solar fotovoltaica; e o Inova Energia (2013).

Por outro lado, essas políticas apresentam certas limitações, isto é, não possuem certas características importantes para promover, de forma efetiva, uma transição energética renovável. Destacam-se, em particular: a) a ausência de uma visão estratégica de longo prazo para o desenvolvimento do setor renovável: que é reflexo da inexistência de qualquer indicador ou meta a ser alcançado pelas fontes renováveis e, especialmente, pelo fato de a principal política, os leilões de energia, ser condicionada por variáveis e diretrizes de curto prazo, além de não estar, sistematicamente, direcionada à promoção das fontes renováveis,

contratando, também, capacidade de fontes fósseis; b) a insuficiência de políticas direcionadas para o desenvolvimento da indústria nacional e da inovação em tecnologias renováveis, pelo lado da oferta: reflexo da ausência de uma visão estratégica das energias renováveis como oportunidades tecnológicas, de tal forma que a principal iniciativa para a promoção das fontes renováveis no Brasil é uma política, pelo lado da demanda, os leilões de energia, enquanto a atuação pelo lado da oferta se mostrou mais limitada – o requerimento de conteúdo local, importante para a energia eólica, e ainda muito recente para a solar fotovoltaica – e esporádica – chamadas de P&D da ANEEL (2011 e 2013) e Inova Energia (2013); c) a falta de coordenação dos diferentes instrumentos de promoção das energias renováveis, tanto entre si quanto com as políticas macroeconômicas adversas, que colocam obstáculos à inovação: reflexo da ausência de uma direção estratégica de longo prazo, e que implica desarticulação e descoordenação entre os instrumentos e políticas, os quais, como no exemplo do Inova Energia e dos leilões, possuem objetivos distintos, reforçado, ainda, pela descoordenação entre as políticas de inovação e as políticas macroeconômicas adversas.

Essas limitações podem restringir a efetiva contribuição das políticas brasileiras para o enfrentamento dos desafios e o aproveitamento das oportunidades relacionadas às energias renováveis. De tal forma, os resultados obtidos nesta dissertação sugerem que, embora o Brasil apresente grande potencial eólico e solar – em específico, dentre as energias renováveis –, a estrutura de políticas de ciência, tecnologia e inovação, no país, tem dificuldade em avançar de forma mais audaciosa na direção do desenvolvimento de tecnologias relacionadas com essas fontes e no aproveitamento da janela de oportunidade em aberto pela revolução tecnológica das energias renováveis. Nesse sentido, a situação do Brasil é diferente do que vem acontecendo em outros países do mundo (e.g. Alemanha, EUA e, como país também em desenvolvimento, a China) e pode significar a perpetuação do atraso tecnológico e econômico num próximo paradigma tecno-econômico.

Entretanto, antes que uma política ativa e estratégica, mirando a transição para um novo paradigma tecno-econômico, seja possível ou viável, um grande nó precisa ser desatado: deve-se restaurar o Estado e recuperar a política de inovação, como elemento central na estratégia de desenvolvimento no Brasil, a partir de uma perspectiva de longo prazo. Isso é visto como extremamente necessário, pois considerando que houve, no Brasil, a partir da década de 1980, um abandono das políticas industriais e de inovação, além da adoção de um modelo de desenvolvimento baseado nas regras de jogo do mercado e num conceito de Estado minimizado e menos intervencionista, o que significou o esvaziamento ou o fechamento de instituições, a eliminação de instrumentos de política e um movimento generalizado de privatizações. Após um breve período de tentativas de reviver as políticas industriais e de inovação no Brasil no início dos anos 2000, no governo do Presidente Lula, esse cenário se deteriorou ainda mais nos últimos anos. A inércia criada por esses fracassos pode fazer com que o país perca as oportunidades em aberto, implicando a perpetuação

do atraso tecnológico e econômico num próximo paradigma tecno-econômico.

É com esse debate em mente que foram elaboradas algumas recomendações de políticas, específicas para o setor de energias renováveis no Brasil. São elas: a) definir uma direção estratégica e de longo prazo para guiar a transição energética renovável no setor elétrico brasileiro, aliando objetivos sociais, ambientais e econômicos; b) utilizar a política de leilões de forma independente ao nível de crescimento econômico, promovendo o setor de forma mais estratégica e estável; c) aprimorar e utilizar, de modo mais extensivo, instrumentos para promoção da indústria nacional e das inovações tecnológicas, pelo lado da oferta; d) em especial, destaca-se a realização de iniciativas similares ao Inova Energia, porém aprimoradas, visando desenvolver a indústria e promover a inovação, pelo lado da oferta; e) porpor uma reforma institucional que estabeleça uma instituição governamental de comando – e.g. BNDES –, de forma a alinhar objetivos, aprimorar a coordenação e desempenhar um contínuo processo de monitoramento, melhoria e revisão das iniciativas; f) dar maior ênfase às fontes solar fotovoltaica e eólica *offshore* nas iniciativas; e g) por fim, ressaltar os aspectos de desenvolvimento regional das políticas de promoção das energias renováveis no Nordeste. Acredita-se que essas sugestões possam ser úteis para a condução, mais efetiva, de políticas de inovação para a transição para um paradigma tecno-econômico baseado em energias renováveis.

Além das recomendações de políticas, fazem-se, aqui, algumas recomendações para estudos posteriores. Do lado teórico, podem-se explorar, em maiores detalhes, as características que as instituições governamentais e as políticas de inovação *mission-oriented* devem possuir para promover, de forma mais bem-sucedida, a transição para um paradigma tecno-econômico baseado em fontes renováveis de energia, enfatizando tanto o desenvolvimento e a difusão de novas tecnologias quanto a superação da inércia institucional e a oposição de interesses estabelecidos – *carbon lock-in*. Esse esforço deve levar em conta, também, a necessidade de desenvolver uma nova estrutura de avaliação e indicadores para capturar os resultados dinâmicos dos investimentos *mission-oriented*, realizados pelo Estado, visto que os indicadores baseados nas análises de custo-benefício da teoria das falhas de mercado fracassam em capturá-los.

Do lado empírico, entende-se que há dois caminhos promissores para a condução de novos estudos de casos em políticas de inovação *mission-oriented* em energias renováveis. Primeiro, pode ser útil definir categorias de análise mais delimitadas, em detrimento de um escopo amplo de “políticas de inovação” como um todo, conforme aplicado nesta dissertação – e.g. políticas de financiamento público e a atuação dos bancos de desenvolvimento, ou o papel regulatório de agências e ministérios –, sem que se perca de vista a importância da atuação ativa do Estado, em todas as etapas do processo inovativo. Segundo, entende-se que é importante realizar estudos de casos com objetivo de comparar experiências e trajetórias históricas de diferentes países, especialmente de países com diferentes contextos institucionais e distintos níveis de desenvolvimento econômico e tecnológico. Futuros

estudos, que levem em conta essas recomendações, teóricas e empíricas, podem confirmar, aprofundar, enriquecer e dar continuidade às conclusões apresentadas neste estudo.

Entende-se, por fim, que a presente dissertação contribuiu para o conhecimento no campo da economia da inovação. Por um lado, mais teórico, abordar a questão climática e ambiental, a partir do viés da teoria neo-schumpeteriana da inovação, se mostrou frutífero tanto em aprofundar o entendimento dos desafios envolvidos na transição energética renovável, quanto em ressaltar as possibilidades e oportunidades abertas nesse processo, para os países em desenvolvimento – este último ponto, ainda pouco explorado na literatura. Por outro lado, mais empírico, o estudo de caso das políticas de inovação, colocadas em prática no caso concreto brasileiro, construído sobre as bases da teoria das políticas de inovação *mission-oriented*, se mostrou útil e produtivo para aprofundar o conhecimento sobre o estado atual e a trajetória histórica das políticas energéticas renováveis, aplicadas no país, bem como a identificação de suas forças e fraquezas, de modo a produzir uma análise da experiência brasileira e fornecer algumas recomendações de políticas para o futuro.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. **Energia Eólica**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2020. Disponível em: <<http://sitesinteligencia.abdi.com.br/sites/energia-eolica/>>. Acesso em: 16 set. 2020.
- ABDI. **Energia Solar Fotovoltaica**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2020. 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 Nº 24**. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, 2020. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html/>>. Acesso em: 17 nov. 2020.
- ALLIANZ GLOBAL INVESTORS. The sixth kondratieff – long waves of prosperity. **Allianz Global Investors**, Frankfurt, 2010.
- AMARANTE, O. A. C. d.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. d. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), 2001.
- ANEEL. **Resultados de Leilões de Geração**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>>. Acesso em: 29 out. 2020.
- ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2020: Conhecer, avaliar, reformar**. São Paulo: Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2020.
- AQUILA, G.; PAMPLONA, E. de O.; QUEIROZ, A. R. de; JUNIOR, P. R.; FONSECA, M. N. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 70, p. 1090–1098, 2017.
- ARROW, K. J. Economic welfare and the allocation of resources for invention. In: **The rate and direction of inventive activity: economic and social factors**. Princeton: Princeton University Press, 1962. p. 609–626.
- 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.
- ARTHUR, W. B. **Increasing returns and path dependence in the economy**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1994.
- 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.

- BAYER, B. Experience with auctions for wind power in brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 81, p. 2644–2658, 2018.
- BLOOMBERGNEF. Global trends in renewable energy investment 2019. **Frankfurt School of Finance and Management**, 2019.
- BNDES. **Transparência: Central de Downloads**. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2020. Disponível em: <[www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/centraldedownloads/](http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/transparencia/centraldedownloads/)>. Acesso em: 16 nov. 2020.
- BOWEN, A.; HEPBURN, C. Green growth: an assessment. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press UK, v. 30, n. 3, p. 407–422, 2014.
- 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.
- BUSCH, J.; FOXON, T. J.; TAYLOR, P. G. Designing industrial strategy for a low carbon transformation. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, Elsevier, v. 29, p. 114–125, 2018.
- 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.
- CARVALHO, L. **Curto-circuito: O vírus e a volta do Estado**. São Paulo: Todavia, 2020.
- CASSIOLATO, J. E.; LASTRES, H.; SOARES, M. C. The brazilian national system of innovation: challenges to sustainability and inclusive development. In: DUTRÉNIT, G.; SUTZ, J. (Ed.). **National Innovation Systems, Social Inclusion and Development**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2014.
- COADY, D.; PARRY, I.; LE, N.-P.; SHANG, B. *et al.* 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.
- COHEN, W. M.; LEVINTHAL, D. A. Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. **Administrative science quarterly**, v. 35, n. 1, p. 128–152, 1990.
- DAVID, P. A. Clio and the economics of qwerty. **The American economic review**, JSTOR, v. 75, n. 2, p. 332–337, 1985.
- DEVABHAKTUNI, V.; ALAM, M.; DEPURU, S. S. S. R.; GREEN II, R. C.; NIMS, D.; NEAR, C. Solar energy: Trends and enabling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 19, p. 555–564, 2013.
- DIÓGENES, J. R. F.; CLARO, J.; RODRIGUES, J. C. Barriers to onshore wind farm implementation in brazil. **Energy Policy**, Elsevier, v. 128, p. 253–266, 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.
- DOSI, G.; NELSON, R. R. The evolution of technologies: an assessment of the state-of-the-art. **Eurasian Business Review**, Springer, v. 3, n. 1, p. 3–46, 2013.
- EBNER, A. Entrepreneurial state: the schumpeterian theory of industrial policy and the east asian “miracle”. In: GAFFARD, J.-L.; NESTA, L.; CANTNER, U. (Ed.). **Schumpeterian Perspectives on Innovation, Competition and Growth**. Berlin: Springer, 2009. p. 369–390.
- 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.
- ELETRORBRAS. **Relatório anual**. Ministério de Minas e Energia, 2018. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Relatorio-Anual.aspx>>. Acesso em: 17 mar. 2020.
- 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.
- EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2020.
- FAGERBERG, J. Innovation policy: rationales, lessons and challenges. **Journal of Economic Surveys**, Wiley Online Library, v. 31, n. 2, p. 497–512, 2017.
- FAGERBERG, J. **Mission (im)possible? The role of innovation (and innovation policy) in supporting structural change & sustainability transitions**. Centre for Technology, Innovation and Culture, University of Oslo, 2018.
- FAGERBERG, J. Mobilizing innovation for sustainability transitions: a comment on transformative innovation policy. **Research Policy**, Elsevier, v. 47, n. 9, p. 1568–1576, 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.
- 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**, Elsevier, v. 81, p. 181–191, 2018.
- FERREIRA, W. C. **Política de conteúdo local e energia eólica: a experiência brasileira**. Tese (Doutorado em Economia) — Faculdade de Economia, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2017.
- FLANAGAN, K.; UYARRA, E. Four dangers in innovation policy studies—and how to avoid them. **Industry and Innovation**, Taylor & Francis, v. 23, n. 2, p. 177–188, 2016.

- FORAY, D.; MOWERY, D. C.; NELSON, R. R. Public r&d and social challenges: what lessons from mission r&d programs? **Research Policy**, v. 41, n. 10, p. 1697–1702, 2012.
- FOXON, T.; PEARSON, P. Overcoming barriers to innovation and diffusion of cleaner technologies: some features of a sustainable innovation policy regime. **Journal of cleaner production**, Elsevier, v. 16, n. 1, p. S148–S161, 2008.
- 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.
- FREEMAN, C.; PEREZ, C. Structural crises of adjustment: business cycles. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; NELSON, R.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (Ed.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter, 1988. p. 38–66.
- 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.
- GIELEN, D.; BOSHELL, F.; SAYGIN, D.; BAZILIAN, M. D.; WAGNER, N.; GORINI, R. The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, Elsevier, v. 24, p. 38–50, 2019.
- GRILLITSCH, M.; HANSEN, T.; COENEN, L.; MIÖRNER, J.; MOODYSSON, J. Innovation policy for system-wide transformation: The case of strategic innovation programmes (sips) in sweden. **Research Policy**, Elsevier, v. 48, n. 4, p. 1048–1061, 2019.
- 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.
- IBGE. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=P13&uf=00>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- IEA. **Data and statistics**. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/>>. Acesso em: 26 out. 2020.
- IEA. **Energy subsidies**. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/energy-subsidies/>>. Acesso em: 2 mar. 2020.
- IEA. **Policies database**. International Energy Agency, 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/policies/>>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- IGLESIAS, E. V. O papel do estado e os paradigmas econômicos na américa latina. **Revista de la CEPAL**, p. 45–53, 2010.
- INESC. **Incentivos e Subsídios aos Combustíveis Fósseis no Brasil em 2019: Conhecer, avaliar, reformar**. Brasília: Instituto de Estudos Socioeconômicos, 2020.

IRENA. Global energy transformation: A roadmap to 2050 (2019 edition). **International Renewable Energy Agency**, 2019.

IRENA. Renewable power generation costs in 2018. **International Renewable Energy Agency**, 2019.

IRENA. **Data and Statistics**. International Renewable Energy Agency, 2020. Disponível em: <<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>>. Acesso em: 8 ago. 2020.

IRENA. Renewable capacity highlights: 31 march 2020. **International Renewable Energy Agency**, 2020.

IRENA. Renewable energy and jobs: Annual review 2020. **International Renewable Energy Agency**, 2020.

IRENA. Renewable power generation costs in 2019. **International Renewable Energy Agency**, 2020.

JUÁREZ, A. A.; ARAÚJO, A. M.; ROHATGI, J. S.; FILHO, O. D. Q. de 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.

KATTEL, R.; MAZZUCATO, M.; RYAN-COLLINS, J.; SHARPE, S. The economics of change: policy and appraisal for missions, market shaping and public purpose. **UCL Institute for Innovation and Public Purpose, Working Paper Series**, 2018.

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.

KEYNES, J. M. The end of laissez-faire. In: **Essays in persuasion**. Cambridge: Royal Economic Society, 2010. p. 272–294.

KIVIMAA, P.; KERN, F. Creative destruction or mere niche support? innovation policy mixes for sustainability transitions. **Research Policy**, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 205–217, 2016.

KLINE, S. J.; ROSENBERG, N. An overview of innovation. In: ROSENBERG, N.; LANDAU, R. (Ed.). **The positive sum strategy: harnessing technology for economic growth**. Washington D. C.: National Academies Press, 1986. p. 275–305.

KNIGHT, F. H. **Risk, uncertainty and profit**. North Chelmsford: Courier Corporation, 2012.

KONDRATIEFF, N. D. The long waves in economic life. **The Review of Economics and Statistics**, JSTOR, v. 17, n. 6, p. 105–115, 1935.

KUMAR, Y.; RINGENBERG, J.; DEPURU, S. S.; DEVABHAKTUNI, V. K.; LEE, J. W.; NIKOLAIDIS, E.; ANDERSEN, B.; AFJEH, A. Wind energy: Trends and enabling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 53, p. 209–224, 2016.

LAM, A. Tacit knowledge, organisational learning and innovation: a societal perspective. **DRUID Working Paper**, v. 98, n. 22, 1998.

- LEE, K.; MATHEWS, J. A. Toward new rules for science and technology policy for sustainable development. In: A., A. J.; OCAMPO, J. A. (Ed.). **Global governance and rules for the post-2015 era: addressing emerging issues in the global environment**. London: Bloomsbury Publishing, 2015. p. 107–137.
- LIU, H.; LIANG, D. A review of clean energy innovation and technology transfer in china. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 18, p. 486–498, 2013.
- 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.
- LUNDVALL, B.-Å. National systems of innovation: towards a theory of innovation and interactive learning. In: LUNDVALL, B.-Å. (Ed.). **The learning economy and the economics of hope**. London: Anthem Press, 2016. p. 85–106.
- LUNDVALL, B.-Å.; JOHNSON, B. The learning economy. In: LUNDVALL, B.-Å. (Ed.). **The learning economy and the economics of hope**. London: Anthem Press, 2016. p. 107–129.
- MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L. D.; COLLE, S. Brazilian atlas for solar energy resource: Swera results. In: GOSWAMI, D. Y.; ZHAO, Y. (Ed.). **Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I–Vol. V)**. Berlin: Springer, 2008. p. 2651–2655.
- MATHEWS, J. A. The renewable energies technology surge: A new techno-economic paradigm in the making? **Futures**, Elsevier, v. 46, p. 10–22, 2013.
- MATHEWS, J. A. The sixth technoeconomic paradigm. In: **35th DRUID Celebration Conference**. Barcelona: DRUID, 2013. v. 19.
- MATHEWS, J. A. Schumpeter in the twenty-first century: creative destruction and the global green shift. In: BURLAMAQUI, L.; KATTEL, R. (Ed.). **Schumpeter's Capitalism, Socialism and Democracy: A Twenty-First Century Agenda**. London: Routledge, 2018. p. 233–254.
- 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. Financing innovation: creative destruction vs. destructive creation. **Industrial and Corporate Change**, Oxford University Press, v. 22, n. 4, p. 851–867, 2013.
- MAZZUCATO, M. A mission-oriented approach to building the entrepreneurial state. **Innovate UK**, 2014.
- MAZZUCATO, M. **O Estado Empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado**. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2014.

- MAZZUCATO, M. The green entrepreneurial state. In: SCOONES, I.; LEACH, M.; NEWELL, P. (Ed.). **The politics of green transformations**. London: Routledge, 2015. p. 152–170.
- MAZZUCATO, M. From market fixing to market-creating: a new framework for innovation policy. **Industry and Innovation**, Taylor & Francis, v. 23, n. 2, p. 140–156, 2016.
- MAZZUCATO, M. Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. **Industrial and Corporate Change**, Oxford University Press, v. 27, n. 5, p. 803–815, 2018.
- MAZZUCATO, M.; PENNA, C. C. R. The rise of mission-oriented state investment banks: the cases of Germany's KfW and Brazil's BNDES. **SPRU Working Paper Series**, 2015.
- MAZZUCATO, M.; PENNA, C. C. R. **The Brazilian innovation system: a mission-oriented policy proposal**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2016.
- MAZZUCATO, M.; PEREZ, C. Innovation as growth policy: the challenge for Europe. In: FAGERBERG, J.; LAESTADIUS, S.; MARTIN, B. R. (Ed.). **The triple challenge for Europe: Economic development, climate change, and governance**. Oxford: Oxford University Press, 2015. p. 229–264.
- MAZZUCATO, M.; SEMIENIUK, G. Public financing of innovation: new questions. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press, v. 33, n. 1, p. 24–48, 2017.
- MAZZUCATO, M.; SEMIENIUK, G. Financing renewable energy: who is financing what and why it matters. **Technological Forecasting and Social Change**, Elsevier, v. 127, p. 8–22, 2018.
- MELO, C. A. de; JANNUZZI, G. de 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.
- MELO, E. Fonte eólica de energia: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. **Estudos Avançados**, SciELO Brasil, v. 27, n. 77, p. 125–142, 2013.
- MENDONÇA, H. L.; MACEDO-SOARES, T. D.; FONSECA, M. V. Working towards a framework based on mission-oriented practices for assessing renewable energy innovation policies. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 193, p. 709–719, 2018.
- 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.
- MOWERY, D. C. Federal policy and the development of semiconductors, computer hardware, and computer software: a policy model for climate change R&D? In: **Accelerating energy innovation: insights from multiple sectors**. Chicago: University of Chicago Press, 2011. p. 159–188.

- MOWERY, D. C.; NELSON, R. R.; MARTIN, B. R. Technology policy and global warming: why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won't work). **Research Policy**, Elsevier, v. 39, n. 8, p. 1011–1023, 2010.
- NORTH, D. **Institutions, institutional change and economic performance**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- NYKO, D.; VALENTE, M. S.; DUNHAM, F. B.; MILANEZ, A. Y.; COSTA, L. M. d.; PEREIRA, F. d. S.; TANAKA, A. K. R.; RODRIGUES, A. V. P. Planos de fomento estruturado podem ser mecanismos mais eficientes de política industrial? uma discussão à luz da experiência do país e seus resultados. **BNDES Setorial**, v. 38, p. 55–78, 2013.
- 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.
- PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. **Research policy**, Elsevier, v. 13, n. 6, p. 343–373, 1984.
- PEGELS, A.; LÜTKENHORST, W. Is Germany's energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV. **Energy Policy**, Elsevier, v. 74, p. 522–534, 2014.
- 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.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de; RÜTHER, R.; ABREU, S. L. de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; GONÇALVES de S. J. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2017.
- 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. Technological change and opportunities for development as a moving target. **CEPAL Review**, v. 75, p. 109–130, 2001.
- PEREZ, C. **Technological revolutions and financial capital: the dynamics of bubbles and golden ages**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.
- PEREZ, C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. **Cambridge journal of economics**, Oxford University Press, v. 34, n. 1, p. 185–202, 2010.
- 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.
- PEREZ, C. Unleashing a golden age after the financial collapse: Drawing lessons from history. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, Elsevier, v. 6, p. 9–23, 2013.

- PEREZ, C. **A green and socially equitable direction for the ICT paradigm**. Globelics – Global Network for Economics of Learning, Innovation, and Competence Building Systems, 2014.
- PEREZ, C. Capitalism, technology and a green global golden age: the role of history in helping to shape the future. In: JACOBS, M.; MAZZUCATO, M. (Ed.). **Rethinking Capitalism: Economics and Policy for Sustainable and Inclusive Growth**. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2016.
- PEREZ, C. Transitioning to smart green growth: lessons from history. In: FOUQUET, R. (Ed.). **Handbook on Green Growth**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2019. p. 447–463.
- PEREZ, C.; SOETE, L. Catching up in technology: entry barriers and windows. In: DOSI, G.; FREEMAN, C.; NELSON, R.; SILVERBERG, G.; SOETE, L. (Ed.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter, 1988. p. 458–479.
- PIRES, M. **Observatório de Política Fiscal atualiza as estatísticas históricas de investimento público: 1947-2019**. Observatório de Política Fiscal, 2020. Disponível em: <<https://observatorio-politica-fiscal.ibre.fgv.br/posts/observatorio-de-politica-fiscal-atualiza-estatisticas-historicas-de-investimento-publico-1947>>. Acesso em: 8 fev. 2021.
- POLANYI, K. **The Great Transformation: The Political and Economic Origins of Our Time**. Boston: Beacon Press, 2001.
- REN21. **RENEWABLES 2019 GLOBAL STATUS REPORT**. Paris: REN21, 2019. Disponível em: <<http://www.ren21.net/gsr-2019/>>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- REN21. **RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT**. Paris: REN21, 2020. Disponível em: <<http://www.ren21.net/gsr-2020/>>. Acesso em: 8 ago. 2020.
- RHODES, A.; SKEA, J.; HANNON, M. The global surge in energy innovation. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 7, n. 9, p. 5601–5623, 2014.
- RITCHIE, H.; ROSER, M. **Energy**. Our World in Data, 2018. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/renewable-energy/>>. Acesso em: 8 mai. 2020.
- RODRIK, D. Green industrial policy. **Oxford Review of Economic Policy**, Oxford University Press UK, v. 30, n. 3, p. 469–491, 2014.
- ROSA, A. R. O. da; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 140–147, 2016.
- SCHOT, J.; STEINMUELLER, W. E. Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. **Research Policy**, Elsevier, v. 47, n. 9, p. 1554–1567, 2018.
- SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico**. São Paulo: Editora Nova Cultural, 1997.
- SCHUMPETER, J. A. **Capitalismo, socialismo e democracia**. São Paulo: Editora UNESP, 2017.

- SEMIENIUK, G.; MAZZUCATO, M. Financing green growth. In: FOUQUET, R. (Ed.). **Handbook on Green Growth**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2019. p. 240–259.
- 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.
- STERN, N. **Why are we waiting?: the logic, urgency, and promise of tackling climate change**. Cambridge: MIT Press, 2015.
- SUZIGAN, W.; FURTADO, J. Instituições e políticas industriais e tecnológicas: reflexões a partir da experiência brasileira. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, SciELO Brasil, v. 40, n. 1, p. 7–41, 2010.
- SUZIGAN, W.; GARCIA, R.; FEITOSA, P. H. A. Institutions and industrial policy in brazil after two decades: have we built the needed institutions? **Economics of Innovation and New Technology**, Taylor & Francis, v. 29, n. 7, p. 799–813, 2020.
- TESKE, S.; NAGRATH, K.; MORRIS, T.; DOOLEY, K. Renewable energy resource assessment. In: TESKE, S. (Ed.). **Achieving the Paris Climate Agreement Goals**. New York: Springer, 2019. p. 161–173.
- TORINELLI, V. H.; JUNIOR, A. F. D. A. D. S.; ANDRADE, J. C. S. Wind power energy in brazil: public financing and future perspectives. **Latin American Journal of Management for Sustainable Development**, Inderscience Publishers (IEL), v. 4, n. 1, p. 41–54, 2018.
- 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.
- WEBER, K. M.; ROHRACHER, H. Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive ‘failures’ framework. **Research Policy**, Elsevier, v. 41, n. 6, p. 1037–1047, 2012.
- 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.
- YAP, X.-S.; TRUFFER, B. Shaping selection environments for industrial catch-up and sustainability transitions: a systemic perspective on endogenizing windows of opportunity. **Research Policy**, Elsevier, v. 48, n. 4, p. 1030–1047, 2019.

YIN, R. K. **Case study research and applications: design and methods**. London: SAGE, 2017.

ZHANG, S.; ANDREWS-SPEED, P.; ZHAO, X. Political and institutional analysis of the successes and failures of china's wind power policy. **Energy Policy**, Elsevier, v. 56, p. 331–340, 2013.

ZHANG, S.; ANDREWS-SPEED, P.; ZHAO, X.; HE, Y. Interactions between renewable energy policy and renewable energy industrial policy: A critical analysis of china's policy approach to renewable energies. **Energy Policy**, Elsevier, v. 62, p. 342–353, 2013.