

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE ECONOMIA E RELAÇÕES INTERNACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA
CURSO DE MESTRADO EM ECONOMIA

GEOVANA GOMES FERREIRA

POLÍTICAS INDUSTRIAIS E SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO SOBRE A
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NOS ESTADOS UNIDOS, CHINA, ALEMANHA,
ÍNDIA, JAPÃO E BRASIL

UBERLÂNDIA-MG

2026

GEOVANA GOMES FERREIRA

POLÍTICAS INDUSTRIAIS E SUSTENTABILIDADE: UM ESTUDO SOBRE A
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NOS ESTADOS UNIDOS, CHINA, ALEMANHA,
ÍNDIA, JAPÃO E BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Economia.

Área de concentração: Desenvolvimento Econômico

Orientador: Professora Doutora Marisa dos Reis Azevedo Botelho

UBERLÂNDIA-MG

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F383p
2026 Ferreira, Geovana Gomes, 2002-
 Políticas industriais e sustentabilidade [recurso eletrônico] : um
 estudo sobre a energia solar fotovoltaica nos Estados Unidos, China,
 Alemanha, Índia, Japão e Brasil / Geovana Gomes Ferreira. - 2026.

 Orientadora: Marisa dos Reis Azevedo Botelho.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
 Programa de Pós-graduação em Economia.

 Modo de acesso: Internet.

 Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.5544>

 Inclui bibliografia.

 Inclui ilustrações.

 1. Economia. I. Botelho, Marisa dos Reis Azevedo, 1961-, (Orient.).
 II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em
 Economia. III. Título.

CDU: 330

 André Carlos Francisco
 Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Economia
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1J, Sala 218 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4315 - www.ppge.ie.ufu.br - ppge@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Economia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, Nº 341, PPGE				
Data:	29 de abril de 2026	Hora de início:	15:00	Hora de encerramento:	17:00
Matrícula do Discente:	12412ECO005				
Nome do Discente:	Geovana Gomes Ferreira				
Título do Trabalho:	Políticas Industriais e Sustentabilidade: um estudo sobre a energia solar fotovoltaica nos Estados Unidos, China, Alemanha, Índia, Japão e Brasil				
Área de concentração:	Desenvolvimento Econômico				
Linha de pesquisa:	Microeconomia, Economia Industrial e da Tecnologia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Indústria, política industrial e desenvolvimento econômico				

Reuniu-se a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Economia, assim composta: Prof. Dr. Daniel Caixeta Andrade - UFU; Profa. Dra. Rosa Livia Gonçalves Montenegro - UFJF; Profa. Dra. Marisa dos Reis Azevedo Botelho - UFU presidente da mesa. Ressalta-se que em conformidade com deliberação do Colegiado do PPGE e manifestação da orientadora, a participação da aluna e dos membros da banca ocorreu de forma remota. A Profa. Dra. Rosa Livia Gonçalves Montenegro participou desde a cidade de Juiz de Fora (MG). A aluna e os demais membros da banca participaram desde a cidade de Uberlândia (MG).

Iniciando os trabalhos a presidente da mesa, Dra. Marisa dos Reis Azevedo Botelho apresentou a Banca Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir a senhora presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Marisa dos Reis Azevedo Botelho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 17:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Caixeta Andrade, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/04/2026, às 17:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rosa Livia Gonçalves Montenegro, Usuário Externo**, em 30/04/2026, às 13:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7209318** e o código CRC **358FEEAE**.

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio, carinho e compreensão desde à infância.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, assim como toda a minha trajetória acadêmica, só foi possível graças ao apoio de muitas pessoas, especialmente da minha família, de Deus e de Nossa Senhora. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada e me ofereceram suporte para chegar até aqui, deixo registrada a minha profunda gratidão.

Agradeço à professora Marisa, pelo apoio, orientação e pelo cuidado que ultrapassa os limites da academia. Seu incentivo e dedicação foram fundamentais, ainda na graduação, para que eu escolhesse seguir este caminho. Sou igualmente grata por todo o conhecimento compartilhado e pelas lições que levarei para além deste trabalho.

Agradeço aos professores Germano e Daniel pelas valiosas e essenciais contribuições para a melhoria deste trabalho na banca de qualificação. Agradeço, ainda, ao professor Daniel e à professora Rosa Livia por comporem uma banca dedicada, cujas considerações foram fundamentais para o êxito desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Economia (PPGE-UFU), agradeço pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico, pelo compromisso com a formação de seus discentes e pelo suporte ao longo desta trajetória. Estendo meu agradecimento a todo o corpo docente, pelas reflexões e ensinamentos que contribuíram para a minha formação acadêmica. À coordenação e à secretaria, pelo ambiente construído, essencial à minha formação e como pessoa.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo suporte e oportunidade para a realização desta pesquisa. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço a concessão da bolsa de estudos, apoio financeiro que viabilizou a execução deste trabalho.

Agradeço de maneira especial à minha família, por todo esforço, dedicação, suporte e cuidado com a minha formação, desde a infância, até o meu último dia na pós-graduação.

Aos meus pais, Carlos e Cinara, aos meus avós, Carlos, Lúcia, Alan e Efigênia e ao meu irmão, Arthur, expresso minha eterna gratidão. Aos meus tios, Simone F., Wyllian, Maria, Santana, Lázaro, Simone G., Márcio e à Polly, Minnie e Mel, agradeço o incentivo, carinho, zelo e presença constante. Nada disso seria possível sem a participação singular de cada um de vocês em cada momento da minha vida e por serem o pilar que sustentou tudo o que hoje se concretiza.

Eu serei eternamente grata pela base que me proporcionaram, por tudo o que fizeram e continuam fazendo por mim. Eu amo profundamente todos vocês.

Aos meus amigos, Ana Laura, Lavínia, Larissa, Elis, Miguel, Natally, Anna Clara, Alana, Marianne, Victor, Iasmin, Mayk, Bárbara e Júlio, agradeço pela companhia dentro e fora da sala de aula, pelo apoio nos momentos difíceis e pela leveza compartilhada ao longo do caminho.

De modo especial, agradeço ao Lucas e à Sabrina, que caminham comigo desde o primeiro dia da graduação. Compartilhamos medos, angústias e conquistas, construindo uma amizade que se tornou parte fundamental da minha trajetória. Agradeço pela amizade que construímos e momentos que vivemos, pelo conhecimento compartilhado e por compor uma parte tão importante da minha vida. Eu amo vocês e espero que nossos caminhos jamais se separem, por mais distantes que a vida nos leve.

A conclusão deste trabalho representa mais do que o encerramento de uma etapa acadêmica, reflete uma trajetória construída com dedicação, renúncias e, sobretudo, com o apoio daqueles que estiveram ao meu lado. Cada página escrita carrega um pouco dessa história compartilhada. Mais do que um título, levo comigo as experiências, os vínculos e as transformações que esse percurso proporcionou. Sigo adiante com profunda gratidão, consciente de que nenhuma conquista é solitária e de que tudo o que foi construído até aqui é também resultado daqueles que fizeram parte deste caminho.

*"The world is changing. I feel it in the water, I
feel it in the earth, and I smell it in the air."*
J.R.R. Tolkien, *The Return of the King*, 1955.

RESUMO

A pesquisa analisa em que medida políticas industriais voltadas para o setor de energia solar fotovoltaica promoveram desenvolvimento tecnológico e encadeamentos produtivos nos Estados Unidos, China, Alemanha, Japão, Índia e Brasil, em um contexto de transição energética. Ancorado nos postulados teóricos de Chang, Andreoni, Rodrik, Mazzucato, Mathews e Altenburg, o estudo compreende a energia solar como vetor estratégico de transformação estrutural das economias. A metodologia combina análise documental de legislações, planos, programas e instrumentos de política energética e industrial com a análise de indicadores de capacidade instalada, geração, emprego, comércio exterior, a partir dos dados da IRENA, IEA, COMTRADE e WIPO. Os resultados indicam que países que estímulos à demanda com políticas de apoio direto à produção e à inovação, como os Planos Quinquenais chineses, as *Erneuerbare-Energien-Gesetz* alemãs e incentivos fiscais e regulatórios consolidaram cadeias produtivas robustas, maior atividade exportadora e capacidade inovativa, evidenciadas pela atividade patentária. Em contraste, Índia e Brasil avançaram na difusão da tecnologia via leilões e geração distribuída, mas mantiveram forte dependência de importações e baixa internalização tecnológica. A investigação sugere que a efetividade das políticas industriais verdes depende da capacidade estatal de coordenar instrumentos de política energética e industriais em uma estratégia de longo prazo. No caso brasileiro, conclui-se que transformar o potencial solar em vantagem industrial e tecnológica requer maior articulação entre apoio à produção, pesquisa e desenvolvimento, conteúdo local e estabilidade regulatória.

Palavras-chave: política industrial; energia solar fotovoltaica; transição energética; desenvolvimento tecnológico.

ABSTRACT

This study examines the extent to which industrial policies directed at the photovoltaic solar energy sector have promoted technological development and productive linkages in the United States, China, Germany, Japan, India, and Brazil within the context of the energy transition. Grounded in the theoretical contributions of Chang, Andreoni, Rodrik, Mazzucato, Mathews, and Altenburg, the study conceives solar energy as a strategic vector for the structural transformation of economies. The methodology combines documentary analysis of laws, plans, programs, and energy and industrial policy instruments with the analysis of indicators of installed capacity, generation, employment, and foreign trade, based on data from IRENA, the IEA, COMTRADE, and WIPO. The results indicate that countries that combined demand-side stimulus with direct support policies for production and innovation, such as the Chinese Five-Year Plans, the German Erneuerbare-Energien-Gesetz, and fiscal and regulatory incentives, consolidated robust productive chains, higher export activity, and innovative capacity, as evidenced by patenting activity. By contrast, India and Brazil advanced in the diffusion of the technology through auctions and distributed generation, but remained heavily dependent on imports and exhibited low levels of technological internalization. The study suggests that the effectiveness of green industrial policies depends on the state's capacity to coordinate energy and industrial policy instruments within a long-term strategy. In the Brazilian case, it concludes that transforming solar potential into an industrial and technological advantage requires stronger coordination among support for production, research and development, local content, and regulatory stability.

Keywords: industrial policy; solar photovoltaic energy; green industrial policy; energy transition; technological development.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais Políticas Implementadas pelos Estados Unidos	30
Quadro 2 - Principais Políticas Implementadas pela China	35
Quadro 3 - Principais Políticas Implementadas pela Alemanha.....	40
Quadro 4 - Principais Políticas Implementadas pelo Japão.....	45
Quadro 5 - Participação percentual de fontes renováveis de energia	48
Quadro 6 - Principais Políticas Implementadas pela Índia.....	49
Quadro 7- Principais Políticas Implementadas pelo Brasil	54
Quadro 8 - Apresentação da base de dados COMTRADE.....	64
Quadro 9 - Média do Total de Depósitos de Patentes a cada 5 anos (2000 - 2023).....	73
Quadro 10 - Pico de Publicações de Patentes entre 2000 e 2023	74
Quadro 11 - Síntese comparativa dos países analisados.....	75

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Capacidade Instalada em GW entre 2000 e 2024	59
Gráfico 2 - Geração Anual em GWh entre 2000 e 2024	60
Gráfico 3 - Emprego no Setor Fotovoltaico entre 2015 e 2024.....	61
Gráfico 4 - Evolução do Nível de Emprego entre 2000 e 2024 com exceção da China	63
Gráfico 5 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Estadunidense entre 2000 e 2021 ..	64
Gráfico 6 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Chinesa entre 2000 e 2021	65
Gráfico 7 -Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Alemã entre 2000 e 2021	66
Gráfico 8 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Japonesa entre 2000 e 2021	67
Gráfico 9 -Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Indiana entre 2000 e 2021	68
Gráfico 10 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Brasileira entre 2000 e 2021	68
Gráfico 11 - Total de Depósitos de Patentes entre 2000 e 2024.....	70
Gráfico 12 - Média Anual de Publicação de Patentes País entre 2000 e 2024.....	72
Gráfico 13 - Capacidade Instalada em GW entre 2000 e 2024	98
Gráfico 14 - Geração Anual em GWh entre 2000 e 2024	99
Gráfico 15 - Emprego no Setor Fotovoltaico entre 2015 e 2024.....	99
Gráfico 16 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Estadunidense entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica).....	100
Gráfico 17 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Chinesa entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica).....	100
Gráfico 18 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Alemã entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica).....	101
Gráfico 19 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Japonesa entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica).....	101
Gráfico 20 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Indiana entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica).....	102
Gráfico 21 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Brasileira entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica).....	102
Gráfico 22 - Total de Depósitos de Patentes entre 2000 e 2024.....	103
Gráfico 23 - Média Anual de Publicação de Patentes País entre 2000 e 2024.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD/CVD	<i>Antidumping / Countervailing Duties</i>
ALMM	<i>Approved List of Models and Manufacturers</i>
ANEEL	<i>Agência Nacional de Energia Elétrica</i>
ANRE	<i>Agency for Natural Resources and Energy</i>
ARRA	<i>American Recovery and Reinvestment Act</i>
BCD	<i>Basic Customs Duty</i>
BSW Solar	<i>Bundesverband Solarwirtschaft</i>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CEPS	<i>Center for Economic Policy Studies</i>
CEMAC	Órgãos do mercado elétrico (contexto indiano)
COMTRADE	<i>United Nations Commodity Trade Statistics Database</i>
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
CO ₂	Dióxido de carbono
DOE	<i>Department of Energy</i>
EEG	<i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>
EPE	<i>Empresa de Pesquisa Energética</i>
EPAct	<i>Energy Policy Act</i>
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i>
FIT	<i>Feed-in Tariff</i>
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases de Efeito Estufa
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	International Energy Agency
IEDI	Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IRA	<i>Inflation Reduction Act</i>
IREDA	<i>Indian Renewable Energy Development Agency</i>

IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
IRS	<i>Internal Revenue Service</i>
ITC	<i>Investment Tax Credit</i>
JNNSM	<i>Jawaharlal Nehru National Solar Mission</i>
LER	Leilão de Energia de Reserva
LEN	Leilão de Energia Nova
MDL	<i>Mecanismo de Desenvolvimento Limpo</i>
METI	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i>
MCMV	<i>Minha Casa Minha Vida</i>
MNRE	<i>Ministry of New and Renewable Energy</i>
NAPCC	<i>National Action Plan on Climate Change</i>
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>
NDRC	<i>National Development and Reform Commission</i>
NEDO	<i>New Energy and Industrial Technology Development Organization</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
OBBBA	<i>One Big Beautiful Bill Act</i>
OIES	<i>Oxford Institute for Energy Studies</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PADIS	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores
PLI	<i>Production Linked Incentive</i>
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PRODEEM	Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PRONASOLAR	Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica
PTC	<i>Production Tax Credit</i>
RBM	<i>Renminbi</i>
REL	<i>Renewable Energy Law</i>
REN	<i>Resolução Normativa</i>
RPS	<i>Renewable Portfolio Standard</i>
SAI	<i>Solar America Initiative</i>

SEIA	<i>Solar Energy Industries Association</i>
SIN	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
StrEG	<i>Stromeinspeisegesetz</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
UNIDO	<i>United Nations Industrial Development Organization</i>
USTR	<i>United States Trade Representative</i>
VGF	<i>Viability Gap Funding</i>
VPP	<i>Virtual Power Plant</i>
WIPO	<i>World Intellectual Property Organization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
3	PLANOS DE POLÍTICAS INDUSTRIAIS PARA OS PAÍSES SELECIONADOS	26
3.1	Estados Unidos	26
3.2	China.....	31
3.3	Alemanha.....	36
3.4	Japão	40
3.5	Índia	46
3.6	Brasil.....	50
3.7	Aplicação da análise documental à literatura	55
4	ANÁLISE DO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NOS PAÍSES SELECIONADOS POR MEIO DE INDICADORES DE COMÉRCIO EXTERIOR E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO	58
4.1	Evolução da capacidade instalada e dos empregos	58
4.2	Comércio exterior e expansão internacional	63
4.3	A relação entre políticas industriais e dinâmica de patentes fotovoltaicas.....	69
4.4	Uma breve síntese comparativa acerca da análise apresentada.....	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis, atrelada aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, tem incentivado países em todo o mundo a reavaliar suas matrizes energéticas com o auxílio da implementação de políticas industriais. Nos países do sul global, como Brasil, Índia e China, a transição para matrizes renováveis, especialmente a solar, é vista como uma estratégia fundamental para equilibrar o crescimento econômico com a preservação ambiental e reduzir desigualdades sociais. Entretanto, a aplicação dessas políticas se depara com inúmeros desafios, como a necessidade de infraestrutura adequada, adaptação tecnológica e questões econômicas.

As políticas industriais voltadas ao desenvolvimento de energias renováveis variam conforme a capacidade de financiamento, disponibilidade de recursos, *know-how* e objetivos estratégicos de cada nação. Assim, a efetividade dessas políticas está intrinsecamente ligada às especificidades econômicas e institucionais dos países para a formulação de seus respectivos planos. Essa assimetria sugere que os padrões observados em termos de capacidade produtiva e desenvolvimento tecnológico decorrem não apenas da magnitude dos recursos mobilizados, mas da natureza e articulação dos instrumentos adotados ao longo do tempo.

Diante disso, o presente trabalho busca compreender em que medida as políticas industriais voltadas para o setor de energia solar fotovoltaica promoveram encadeamentos produtivos e desenvolvimento tecnológico nos países analisados, e até que ponto esses países diferem ou convergem quanto às orientações adotadas e seus respectivos resultados. Assim, parte-se da premissa de que políticas industriais ativas sustentaram o desenvolvimento do setor fotovoltaico, especialmente em países que articularam instrumentos de estímulo à demanda com políticas de apoio direto à produção e à inovação. Contexto este que possibilita a configuração de cadeias produtivas mais sólidas e com maior capacidade inovativa, e que se expressa nos indicadores de comércio exterior e de atividade patentária.

Para isso, o trabalho analisará as políticas industriais voltadas para o desenvolvimento de matrizes energéticas renováveis, em especial a energia solar fotovoltaica, nos Estados Unidos, China, Alemanha, Japão, Índia e Brasil. Serão examinados os avanços nas políticas de incentivo, desafios tecnológicos, econômicos e estruturais e seus respectivos elos produtivos,

de modo a comparar as políticas adotadas e a evolução da indústria de energia solar fotovoltaica em cada país, a partir de indicadores de comércio exterior e de patentes.

Para o cumprimento desse objetivo, faz-se necessário examinar o potencial técnico e econômico da energia solar considerando fatores como a capacidade de geração, a ampliação da infraestrutura elétrica e a expansão da mão de obra. Assim, será possível comparar as políticas de incentivo à energia solar nos países selecionados e os avanços resultantes da sua implementação, considerando o impacto de eventos históricos sobre a difusão da energia solar fotovoltaica.

Destarte, diante do contexto global de transição energética, diversos países têm adotado estratégias distintas para diversificar suas matrizes energéticas e reduzir os impactos sobre o meio ambiente. A China, líder da indústria solar fotovoltaica, adotou uma política industrial robusta para expandir sua capacidade de geração solar. A Índia enfrenta desafios relacionados à demanda energética e visa mitigar a dependência de combustíveis fósseis. Nos Estados Unidos, o avanço do setor tem sido estimulado por meio de iniciativas fiscais e de medidas para reduzir a vulnerabilidade externa. Por sua vez, a Alemanha e o Japão representam casos de indústrias robustas e consolidadas com políticas igualmente sólidas, mas que perderam dinamismo ao longo do tempo.

Mesmo com grande potencial para geração de energia solar e para fabricação de componentes para os sistemas fotovoltaicos, o Brasil enfrenta desafios latentes para a adoção da tecnologia em larga escala. Obstáculos como instabilidade regulatória, custos elevados e infraestrutura limitada cerceiam o avanço do setor. No entanto, iniciativas como a expansão da geração distribuída e políticas de incentivo impulsionaram o avanço da energia solar no país.

Assim, este estudo se justifica pela necessidade de investigar em que medida os programas adotados possibilitaram o avanço do setor nos países analisados conforme a realidade e a estratégia local, além da importância de verificar a difusão e internalização do setor fotovoltaico no sistema produtivo de tais nações. A metodologia combina abordagens quantitativas e qualitativas para avaliar as políticas industriais direcionadas à geração de energia solar e os desafios econômicos e ambientais dos países selecionados, considerando seus diferentes níveis de desenvolvimento.

Para tanto, serão utilizados documentos e relatórios oficiais para construir o panorama das políticas industriais identificadas, em consonância com dados provenientes de bases internacionais de referência. Os dados de capacidade instalada, geração de energia e emprego

no setor foram obtidos junto à *International Renewable Energy Agency* (IRENA) — a partir dos relatórios *Renewable Energy Statistics* e *Renewable Energy and Jobs: Annual Review* — em paralelo com a *Our World In Data*. Os fluxos de comércio exterior de equipamentos e produtos fotovoltaicos foram extraídos da base *United Nations Comtrade Database* (COMTRADE), com recorte temporal de 2000 a 2021, limite imposto pela disponibilidade dos dados desagregados por produto. Por fim, os dados de patentes fotovoltaicas foram obtidos junto à *World Intellectual Property Organization* (WIPO) para o período de 2000 a 2024.

Diante disso, a pesquisa foi organizada em três capítulos. O primeiro se concentra em uma revisão da literatura acerca das políticas industriais e políticas sustentáveis, com base em teorias como as de Andreoni e Chang (2016, 2019), Aiginger e Rodrik (2020), Mazzucato (2014, 2018, 2019) e Mathews (2020). O segundo constrói um panorama da trajetória das políticas voltadas para a energia solar fotovoltaica para os seis países selecionados entre 2000 e 2025. Por fim, o último capítulo analisa o desenvolvimento do setor com base na evolução da capacidade instalada, geração total de energia, emprego e comércio exterior e, por último, tenta verificar o impacto inovativo das medidas implementadas a partir da evolução do depósito de patentes ao longo do período analisado.

Em síntese, a pesquisa realizada busca examinar o avanço da indústria fotovoltaica à luz das estratégias para o desenvolvimento industrial, em consonância com o referencial teórico apresentado.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

À luz dos postulados de Georgescu-Roegen, Cechin e Veiga (2010) apresentam a noção de “transformação” inerente ao processo produtivo, fundamentado na conversão de elementos da natureza em bens econômicos. Essas discussões marcam o prelúdio dos debates acerca da economia sustentável até a temática das políticas industriais verdes contemporâneas (Georgescu-Roegen, 1971).

A discussão referente às políticas industriais, como observam Andreoni e Chang (2019) remontam ao século XVIII, no contexto da Primeira Revolução Industrial na Inglaterra. Com o florescimento das indústrias, medidas tarifárias, de incentivo e de regulação tornaram-se mais recorrentes (Andreoni; Chang, 2019, 2016)

Em consonância com a literatura neoschumpeteriana exposta por Andreoni e Chang (2019, 2016), evidencia-se que a inovação é produto da relação entre o setor público e as esferas produtiva e social, o que demonstra a importância do papel de agentes distintos para o progresso tecnológico e reflete a necessidade de um arranjo normativo que possibilite a estruturação do potencial fabril. Posto isso, verifica-se ainda que tais estratégias para o desenvolvimento industrial podem impulsionar e alterar trajetórias sistêmicas, além de reconfigurar vantagens comparativas (Andreoni; Chang, 2019, 2016).

No século XXI, a formulação dessas políticas emerge de maneira mais complexa, especialmente com os requisitos para a coordenação adaptativa constante face aos entraves econômicos e normativos, um marco da quarta fase, após os anos 2000. Assim, evidencia-se que uma política industrial deve ser apta para estabelecer uma estratégia devidamente estruturada e ampla, com ênfase no progresso tecnológico inovativo, articulando o eixo governamental aos demais agentes econômicos, conforme apontado por Andreoni e Chang, (2019, 2016).

Por último, Andreoni e Chang (2019, 2016) reforçam a premissa de que a política industrial não se restringe a uma única medida, mecanismo ou instituição, porém envolve a concepção, estruturação, implementação e gestão dos chamados "pacotes de medidas interativas". Mecanismos voltados para assegurar incentivos e oportunidades para estruturar a base industrial e a estabilidade da relação entre Estado e mercado, de modo a viabilizar a formação do potencial produtivo e tecnológico. Esse arcabouço requer uma estrutura institucional coordenada, que não se limite à dimensão produtiva e que seja capaz de responder adequadamente aos gargalos ambientais e de fomentar o crescimento econômico de longo prazo.

Análogo a isso, Aiginger e Rodrik (2020) reconhecem a importância da intervenção estatal flexível e adaptativa das políticas industriais conforme às particularidades de cada país, o que pode fortalecer instituições estratégicas e a cooperação público-privada. Na perspectiva do desenvolvimento sustentável, verifica-se a urgência de desenvolver medidas com ênfase em inovações para setores estratégicos e em desenvolvimento, capazes de gerar efeitos multiplicadores na economia¹.

Nesse sentido, uma política industrial sustentável baseada na consolidação de uma economia de baixo carbono, articula estímulo ao aumento da eficiência produtiva e à transição energética, enquanto mantém o dinamismo econômico e ganhos de produtividade (Altenburg; Rodrik, 2017). Na literatura, a concepção de política industrial verde destaca dois eixos, “*green industry*” e “*greening industry*”. O primeiro versa sobre o desenvolvimento de indústrias com desempenho ambientalmente superiores ou tecnologicamente inovadores (UNIDO, 2011; Schwarzer, 2013).

Em consonância com o conceito anterior, o segundo eixo relaciona-se ao aumento da eficiência da utilização dos insumos produtivos, bem como sobre o “*resource decoupling*”, que consiste na diminuição da proporção de insumos utilizados na unidade fabricada. Assim, o “desacoplamento de recursos” trata sobre a desarticulação do crescimento econômico do uso de recursos naturais (UNIDO, 2011; UNEP, 2011; Schwarzer, 2013; Ari; Yikmaz, 2019).

O êxito de tais políticas depende de uma base institucional robusta sustentada por três pressupostos. A sinergia da relação entre o setor público por meio de agências reguladoras e das firmas, do conceito “*embeddedness*”, sustentado por legislações definidas, “*discipline*” e incentivos coerentes e pela transparência, possibilita mitigar riscos e incertezas, o que pode colaborar para a maior eficácia das estratégias aplicadas (Rodrik, 2013).

O terceiro critério é apresentado pelo autor como um elemento de conexão entre os dois anteriores. A “*accountability*” assegura a transparência da dinâmica do setor público, a responsabilidade com a prestação de contas orienta-se para a apresentação das implicações dos programas implementados. Em suma, a coordenação destes pressupostos pode ser fundamental para as decisões referentes à disponibilização, continuidade ou a retirada da assistência estatal (Rodrik, 2013).

Nas economias emergentes, o desafio reside em definir a orientação estratégica da política industrial, de acordo com Aiginger e Rodrik (2020), seguir modelos das economias

¹ Cabe ressaltar que Andreoni e Chang (2016) e Aiginger e Rodrik (2020) reconhecem a importância do papel do Estado, porém, divergem na intensidade, flexibilidade e adaptabilidade das políticas industriais. No entanto, ainda que tal comparação seja relevante, não é significativa para o presente estudo.

desenvolvidas ou adotar abordagens adaptadas à conjuntura interna. Essa discussão abrange novas prioridades globais de natureza social e ambiental, como a transição para tecnologias limpas em setores como habitação, agricultura e transporte (Aiginger; Rodrik, 2020).

No cerne de uma análise direcionada para países desenvolvidos e em desenvolvimento, identifica-se certas disparidades acentuadas, especialmente no caso das capacidades tecnológicas. Característica que pode refletir maiores vantagens e acesso a investimento e tecnologia das nações desenvolvidas, o que se expressa a partir da concentração industrial verde em economias com níveis de renda elevados (Dutz; Sharma, 2012).

Schwarzer (2013) expõe a dificuldade enfrentada por países emergentes em conciliar o crescimento econômico com a internalização de um arcabouço estratégico para inovação industrial com foco no desenvolvimento sustentável, devido à apreensão a respeito da produção, competitividade e renda. Conjuntura que pode resultar na relutância diante de determinados planos e se converter em um ponto de estrangulamento para o avanço industrial.

Mathews (2020) apresenta a premissa de que a escolha das fontes de energia é um fator essencial para a efetividade ou fracasso das estratégias industriais, especialmente em economias emergentes e de grande porte, como China e Índia, bem como de países de industrialização tardia.

O conceito de "esverdeamento" exposto por Mathews (2020) evidencia que esse processo deve ser visto como um vetor para o crescimento e o desenvolvimento técnico inovativo. Perspectiva sobre a industrialização verde que retrata a importância de centros industriais para o avanço da transição sustentável e para acelerar a difusão e internalização de tecnologias verdes.

Tal conjuntura possibilita que o "esverdeamento" se concretize de forma progressiva e ainda pode permitir a reestruturação das cadeias produtivas sem comprometer a competitividade das economias em termos globais (Mathews, 2020).

Ao longo das últimas décadas, o debate sobre políticas industriais verdes tem sido discutido em consonância com o arcabouço teórico de políticas orientadas por missões, em paralelo com a tese do Estado Empreendedor, desenvolvido por Mariana Mazzucato (2014, 2018). Teoria que caracteriza o Estado como um agente ativo na promoção da inovação e na estruturação do ambiente econômico.

Mazzucato (2018) analisa as políticas industriais e de inovação guiadas por missões, voltadas para problemas sociais e ambientais complexos e para tecnologias emergentes. Os pressupostos apresentados reforçam a capacidade de transformação da abordagem, ao passo

que reforça a exigência de estratégias definidas e articuladas com as demais, amplas e capazes de estimular investimentos em outros setores, de integrar o potencial técnico e de gerenciamento para as medidas em diversos contextos.

Para Mazzucato (2014), o papel da intervenção do Estado, nesse contexto, não se limita a corrigir falhas de mercado. Entretanto, por vezes trata-se do único agente disposto a enfrentar riscos e incertezas para estimular o processo inovativo, especialmente em setores baseados em inovação ou emergentes. A atuação do Estado como empreendedor, mesmo que indireta, fomenta iniciativas para modernização da produção. Assim, os investimentos geram efeitos de transbordamento para outros setores da economia e beneficiam aqueles com menor dinamismo produtivo.

Mazzucato *et al.*, (2019) propõe diretrizes para formular uma estrutura teórica referente às políticas de inovação, na qual se destaca a importância das transformações contínuas nas organizações públicas para o desenvolvimento de *dynamic capabilities*, a fim de torná-las mais eficientes e adaptáveis frente às demandas futuras para as estratégias orientadas por missões.

As missões podem ser utilizadas para estimular o desenvolvimento econômico sustentável e inclusivo como instrumentos institucionais para integrar setores distintos e fomentar a formação de novos arranjos produtivos, distribuição e consumo. Esse arcabouço visa estabelecer um cronograma com metas e indicadores para analisar o avanço, a integração inovativa com P&D e a coordenação entre as estratégias (Mazzucato *et al.*, 2019).

Neste contexto, as políticas industriais verdes se destacam ao priorizar medidas que, além das questões sociais e ligadas ao meio ambiente, estimulam a criação de novos modelos de negócios, com incentivo à inovação e segurança energética (Mazzucato *et al.*, 2019).

Alinhadas ao cenário de emergência climática vigente, as economias emergentes precisam se adaptar aos novos paradigmas ambientais, em conformidade com as medidas rigorosas implementadas em países desenvolvidos, para a sustentabilidade do comércio exterior. Nesse contexto, verifica-se a necessidade da constituição da base técnica, com investimentos direcionados para qualificação e constituição da relação entre empresas e consumidores (Altenburg, 2011).

De maneira conjunta, a teoria ratifica a problemática das mudanças climáticas, cujos impactos exigem uma postura rígida para reconfigurar e modernizar a dinâmica produtiva, qualificação da mão de obra e da assertividade na gestão dos recursos, ações que podem ser estimuladas por meio das políticas industriais verdes (Altenburg, 2011).

A esfera legislativa é fundamental para a difusão de estratégias sustentáveis, promover o desenvolvimento empresarial e para estabilizar a indústria, mediante a promoção de

transformações sustentáveis por meio de oportunidades de investimento e do desenvolvimento de vantagens competitivas. Todavia, é preciso superar o “aprisionamento” (*lock-in*), processo formado a partir de trajetórias tecnológicas baseadas em combustíveis fósseis, cenário que dificulta a dinâmica de transição sustentável e evidencia a necessidade da assistência estatal (Lustosa, 2018).

Em síntese, é essencial romper com a dinâmica histórica baseada em energia de origem fóssil, com um processo sustentado por uma nova estrutura cuja força motriz do desenvolvimento baseie-se na inovação tecnológica verde. Nessa perspectiva, instrumentos regulatórios e de incentivos podem ser vistos como mecanismos fundamentais para impulsionar a adoção e disseminação de tecnologias limpas e articular a preservação ambiental ao progresso técnico inovativo, conforme exposto por Lustosa (2018).

3 PLANOS DE POLÍTICAS INDUSTRIAIS PARA OS PAÍSES SELECIONADOS

A revisão teórica no que concerne às políticas industriais e políticas industriais verdes, desenvolvida com base em autores como Ha-Joon Chang, Karl Aiginger, Antonio Andreoni, Dani Rodrik, Mariana Mazzucato e John Mathews, que se articula com relatórios de instituições internacionais, publicações governamentais e trabalhos científicos, possibilita contextualizar o debate acerca da transição energética nos países analisados, além de identificar gargalos e avanços do setor fotovoltaico.

Em termos metodológicos, para aprofundar a compreensão das políticas implementadas para o setor de energia fotovoltaica, será realizada análise documental que inclui legislações, planos estratégicos e programas governamentais sobre incentivos à energia solar nos países selecionados. O estudo compreenderá políticas públicas voltadas para infraestrutura, inovação e impactos econômicos e ambientais da geração de energia solar nos países selecionados, as quais serão analisadas à luz da literatura revisada no capítulo anterior.

A seleção da China, Estados Unidos, Alemanha, Japão, Índia e Brasil obedece a critérios complementares. O grupo definido responde pelos maiores níveis de capacidade instalada, geração e emprego no mundo, o que confere à seleção abrangência suficiente para verificar padrões evolutivos em escala global. A amostra compreende países com níveis de desenvolvimento econômico e trajetórias de industrialização distintas, permitindo comparações entre economias com política industrial consolidada com estratégias de longo prazo, como Alemanha, Japão, Estados Unidos e China, e economias emergentes com mercados em expansão, como Índia e Brasil. Por último, os países selecionados adotaram diferentes modelos de política ao longo do recorte temporal analisado, o que torna a análise relevante para examinar a relação entre estratégia institucional, capacidade produtiva e desenvolvimento tecnológico no setor.

3.1 Estados Unidos

A trajetória da energia solar nos Estados Unidos remonta ao século XIX e se consolidou a partir de sucessivos marcos tecnológicos e regulatórios, desde o desenvolvimento dos sistemas fotovoltaicos até as células de silício em 1954 e dos primeiros modelos de baterias. Apesar do custo inicial, o avanço tecnológico e o uso em satélites impulsionaram a eficiência e a redução de custos dos módulos. A crise do petróleo na década 1970 intensificou os investimentos públicos e privados em fontes alternativas, como a energia fotovoltaica,

acelerando o desenvolvimento tecnológico e a redução de custos (*Department of Energy*, 2002; Green, 2005; Lincot, 2017).

Durante a gestão Carter, no contexto pós-crise do petróleo, emergiu uma articulação entre pesquisadores, ativistas e defensores ambientais em apoio à expansão das fontes renováveis, com ênfase na energia solar. Fundamentado na descentralização da geração e no controle local das companhias elétricas, esse movimento estabeleceu metas que previam que a energia fotovoltaica responderia por 25% do consumo até 2000. Nesse contexto, foram implementados sistemas de *net metering* e de portfólios de energia renovável (*Renewable Portfolio Standards* — RPS), mecanismos que se disseminaram progressivamente pelo país e se consolidaram no âmbito federal com o *Energy Policy Act* de 2005 (*Department of Energy*, 2002; Green, 2005; Dernbach; Tyrrell, 2011; Fraas, 2014; Hess, 2016).

O arcabouço regulatório dos EUA, marcado pelo *Solar Energy Research, Development and Demonstration Act* de 1974, é fundamentado predominantemente em incentivos fiscais, ponto que distingue o curso do desenvolvimento dos Estados Unidos dos demais países analisados. Instrumentos como o Crédito de Imposto Federal de Investimento permitiram 30% de redução no custo de equipamentos e instalações, sendo fundamentais para a consolidação da estrutura fiscal e para a competitividade da energia solar diante das fontes tradicionais (Kline, 2011; Wedy, 2020).

A *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC), fundada em 1977, em consonância com o Congresso e demais agências federais, responde pela construção da estrutura normativa que rege o setor. Neste viés, o país busca equilíbrio entre coordenação e autonomia entre as esferas nacional e estadual, especialmente no comércio interestadual de energia (Kline, 2011; Dworkin *et al.*, 2011; Fucci, 2011).

Para diversificar a matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, em 2006, o *Energy Policy Act* (EPAct) ampliou o *Investment Tax Credit* (ITC), incentivo que promoveu a redução de até 30% dos custos sobre o investimento em sistemas solares residenciais e comerciais. Além disso, foi lançado o *Production Tax Credit* (PTC), com créditos definidos a partir da produção de energia (Tabassum *et al.*, 2021; *Environmental Protection Agency*, 2025; *Congressional Research Service*, 2021).

A *Solar America Initiative* (SAI) foi criada em 2006 com objetivo de tornar a energia solar economicamente competitiva até 2015. O plano visava reduzir custos e estimular a

pesquisa e desenvolvimento, com a intenção de atenuar a dependência de combustíveis fósseis e ampliar o fornecimento de eletricidade, com a meta de implantar 100 GW de capacidade instalada até 2030. A iniciativa contemplou diversos atores além dos órgãos governamentais, como universidades, indústrias e as próprias concessionárias de energia, aquecendo o mercado e as estruturas do setor (*Department of Energy*, 2006, 2024; Grover, 2007).

Baseada em parcerias tecnológicas e na expansão da demanda, a *Solar America Initiative* (SAI) orientou-se para redução dos custos de produção, desenvolvimento de novas tecnologias e mitigar entraves técnicos e regulatórios com auxílio do departamento de energia e do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL). Entretanto, a coordenação federal e estadual foi essencial para o programa, uma vez que diversos estados concedem incentivos complementares para sistemas fotovoltaicos residenciais e empresariais (*Department of Energy*, 2006, 2024).

Iniciativas como o *President's Blueprint for a Secure Energy Future*, em paralelo com a *All-of-the-Above Energy Strategy*, contribuíram para o fortalecimento da segurança energética com redução da dependência externa através de ferramentas como a *American Recovery and Reinvestment Act* (ARRA), de 2009. A estratégia tinha como objetivo mitigar os efeitos da recessão pós-crise do *subprime*, em conjunto com outras metas voltadas para a manutenção do emprego e dos investimentos para energia renovável (*The White House*, 2011; Mundaca, Richter, 2014; Lin, 2014).

Conforme exposto por Bolinger *et al.*, (2010), a Seção 1603 do ARRA alterou o principal incentivo à energia solar no país, o ITC, em decorrência dos efeitos causados pela crise que levou à redução dos lucros das firmas e, por conseguinte, à eficiência do modelo. Desse modo, a Seção 1603 converteu o incentivo para o pagamento direto em dinheiro para manutenção do estímulo ao investimento (*Department of Treasury*, 2009).

Em 2011, a *SunShot Initiative* promoveu a redução de cerca de 70% nos custos dos sistemas fotovoltaicos e de conexão, a fim de estimular o desenvolvimento tecnológico, aumentar a competitividade e a acessibilidade da energia solar (*Department of Energy*, 2013).

A partir de 2012, os Estados Unidos adotaram medidas *antidumping* e de direitos compensatórios (AD/CVD) sobre células e módulos chineses, estendidos a produtos de Taiwan em 2014. Essas medidas retratam a apreensão com a crescente dominância chinesa na produção de equipamentos solares e com os impactos à cadeia produtiva nacional. Ações que marcaram uma reversão em direção a uma postura mais defensiva do país, cujo avanço das políticas de incentivo à energia solar tem apresentado papel fundamental para expandir a matriz renovável

nacional (*Department of Commerce*, 2012; Zeng, 2016; *International Trade Commission*, 2025).

Em 2018, o governo instituiu a redução progressiva dos créditos de imposto de renda para sistemas solares, o que aumentou a atratividade dos investimentos privados. No mesmo ano, a Seção 201 impôs tarifas globais de 30% para importação de módulos e células independente da origem e tarifas específicas para produtos chineses, para garantir a proteção da indústria nacional e para preservação do capital intelectual (USTR, 2018).

A expansão do setor até 2019 apresentou cerca de 2 milhões de sistemas instalados e 71,3 GW de capacidade fotovoltaica. No entanto, se deparou com entraves significativos, as tarifas de importação sobre painéis solares resultaram na perda de aproximadamente 62 mil empregos e cerca de US\$ 20 bilhões em investimentos, enquanto a redução progressiva do Crédito de Imposto sobre Investimentos (ITC) reduziu a atratividade de novos projetos residenciais e comerciais (Rhodes, 2020; Wedy, 2020; SEIA, 2019).

Em 2020, a *Energy Act* ampliou o ITC para 26% e os estímulos para pesquisa e desenvolvimento. Em 2025, houve a expansão da Seção 301 para todo o sudeste da Ásia, com a imposição de tarifas de 50% para componentes como células e semicondutores de origem chinesa e novas tarifas para o Vietnã, Malásia, Camboja e Tailândia, o que ilustra os esforços do país para garantir a manutenção da produção nacional (*Department of Commerce*, 2024, 2025).

O ano de 2022 configura um ponto de inflexão com a aprovação do *Inflation Reduction Act* (IRA), que redefiniu o foco da política fotovoltaica da ampliação da capacidade para a segurança da cadeia de suprimentos e a reindustrialização sustentável. Essa legislação ampliou e reformulou os créditos para investimentos e produção ao introduzir o Crédito de Produção de Manufatura Avançada (45X), responsável pela concessão de subsídios para fabricação de equipamentos, o que levou ao aumento das fábricas no país (IRS, 2022; *Department of Energy*, 2024; *Department of Treasury*, 2025)

Entretanto, a instabilidade política voltou a se manifestar em 2025, com o anúncio do *One Big Beautiful Bill Act* (OBBBA), que reverteu estratégias fundamentais da política anterior. A nova norma determinou o encerramento de créditos para projetos solares cuja construção se inicie após 2026 e impôs restrições aos incentivos à produção com a suspensão dos créditos 45Y (Crédito de Produção de Eletricidade Limpa) de 48C (Crédito para Projeto de Energia Avançada Qualificado) do IRA (IRS, 2022; *Department of Treasury*, 2024; *Federal Register*, 2025)

Em síntese, o quadro 1 apresenta a trajetória das políticas estadunidenses para o setor fotovoltaico, com ênfases à expansão e à consolidação do mercado por meio de incentivos fiscais, abordagem que, de certo modo, difere os Estados Unidos dos demais países analisados. Entretanto, apesar da linearidade dessa dinâmica, a adoção de medidas *antidumping* contra produtos chineses a partir de 2012 e as medidas de apoio promovidas pelo IRA em 2022, indicam períodos com foco na proteção da indústria nacional, o que exige estabilidade regulatória para reduzir assimetrias regionais e sustentar o desenvolvimento do setor a longo prazo, contudo, posto em xeque com a reversão em 2025 com o lançamento do OBBBA.

Quadro 1 - Principais Políticas Implementadas pelos Estados Unidos

Período	Principais Políticas	Objetivos/Instrumentos	Impactos
1990-2005	Metas para expansão da capacidade; RPS e <i>Net Metering</i> estaduais	Expansão da demanda e fomento à geração distribuída.	Aumento da demanda por sistemas fotovoltaicos e fortalecimento do mercado residencial.
2005-2009	EPAct 2005 (ITC 30%); SAI (2006); ARRA (2009) e <i>Section 1603</i> (2009)	Ampliação do ITC em até 30%; Isenção fiscal para geração solar, P&D para expandir o setor e diminuir a dependência externa; Suporte à crise de 2008.	Consolidação ITC como política federal; Auxílio durante a crise de 2008 para manutenção do emprego e investimento.
2010-2015	<i>SunShot Initiative</i> 2011; Extensões ITC; Tarifas AD/CVD	Reduzir 70% dos custos até 2020; Tarifas AD/CVD; Proteção da manufatura doméstica.	Quedas significativas dos custos e paridade rede; Aumento custos módulos; fuga produção chinesa para o Sudeste da Ásia.
2018-20202	Seção 201 (2018); Seção 301 (2018 e 2024)	Proteção da manufatura doméstica; Combate ao <i>dumping</i> (tarifas globais de 30%); Estimular P&D.	Aumento custos módulos; Fuga da produção chinesa para o Sudeste Asiático; Tarifas de 50%; 71.3 GW capacidade e 242 mil empregos (2019).
2020-2024	<i>Energy Act</i> 2020 com extensão do ITC; <i>Inflation Reduction Act</i> (IRA) (2022) e créditos 45X, 45Y e 48C	ITC ampliado; Garantia de segurança energética com integração das políticas climática e industrial com fomento à produção e à geração.	Ampliação dos incentivos fiscais; Tentativa de <i>reshoring</i> ; Boom de fábricas e reforço em P&D.
2025	<i>One Big Beautiful Bill Act</i> (OBBBA)	Encerrar subsídios pós-2026; Interrupção dos créditos 45Y e 48C.	Reversão da política; Incerteza estrutural pós-2027.

Fonte: Elaboração própria (2025), com base nas referências citadas no texto.

3.2 China

O desenvolvimento de energia de fontes renováveis na China data de meados da década de 1950 com as usinas maremotrizes e a instalação dos primeiros painéis fotovoltaicos em 1971, ainda em escala reduzida e voltadas para aplicações remotas. As reformas de 1978, como a “Política de Porta Aberta” no governo Xiaoping permitiram a entrada de capitais estrangeiros e a importante inserção aos Planos Quinquenais – de desenvolvimento econômico com duração de cinco anos – e ao arcabouço institucional e legislativo do país para o desenvolvimento de fontes renováveis, a partir de normativas como a Lei da Energia Elétrica (1995) e a Lei de Energia Renovável (REL) de 2005 (Liu *et al.*, 2011; *World Bank*, 2021; *China*, 2005, 2009).

O documento de 1995, *New Energy and Renewable Energy Development Outline for China* (1996-2010), estabeleceu um plano de desenvolvimento para impulsionar a economia e a proteção ambiental em áreas rurais. A iniciativa priorizou a energia fotovoltaica, com foco no desenvolvimento de sistemas solares para os cinco anos seguintes (Huang *et al.*, 2016).

O avanço continuou nos anos 2000, com as fontes de energia limpa se tornando mais relevantes. A articulação de políticas que combinavam subsídios, incentivos de mercado, cooperação internacional e mecanismos regulatórios como as legislações apresentadas, foi fundamental para o desenvolvimento do setor. Nesse contexto, destaca-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) apresentado no Protocolo de Kyoto, que possibilitou a transferência de recursos financeiros e tecnológicos para o país (Huang *et al.*, 2016; *World Bank*, 2021).

As políticas chinesas são majoritariamente delineadas nos Planos Quinquenais. O 10º Plano Quinquenal, de 2001 a 2005, estimulou o uso de energias de fontes renováveis e desenvolveu novos projetos para promover a eletrificação rural descentralizada, atrelada ao desenvolvimento do país. Estratégia que foi colocada em prática por meio de políticas industriais intersetoriais de apoio à produção, P&D e alta tecnologia. Diante disso, foram instituídos planos como o Programa 863² (1986) e o Programa de Eletrificação de Municípios (*Song Dian Dao Xiang*) de 2002, entre outras medidas de financiamento e suporte à exportação (*China*, 2024; Zhang *et al.*, 2020; *World Bank*, 2021)

A Lei de Energia Renovável (2005) representou o marco de institucionalização de um arcabouço regulatório que possibilitou a criação do Fundo de Desenvolvimento de Energia

² Plano de Desenvolvimento de Alta Tecnologia do Estado voltado para o desenvolvimento tecnológico, com vistas a reduzir a dependência externa do país e promover sua soberania.

(REDF), em um contexto em que a indústria fotovoltaica do país se firmava no mercado internacional, com 98% da produção destinada à exportação em 2008. Esse processo possibilitou a consolidação da indústria de energia renovável como eixo dinâmico e estratégico da economia e assim a China foi precursora na adoção de estratégia voltada para a fabricação nacional de equipamentos fotovoltaicos sob a premissa de estimular o desenvolvimento sustentável, sendo a base para o crescimento econômico e com para redução da dependência externa (Liu; Shiroyama, 2013; Cherni; Kentish, 2007).

Cao *et al.*, (2006) apontam que, ainda em 2006 foi lançado o “Guia Nacional para o Programa de Desenvolvimento de Ciência e Tecnologia de Médio e Longo Prazo” a fim de impulsionar a inovação, com vistas à criação de uma “sociedade orientada à inovação” até 2020, liderando a escala mundial de empresas intensivas em ciência e tecnologia até 2050 com investimentos progressivos em P&D conforme o crescimento do PIB.

Entre 2006 e 2010, o 11º Plano Quinquenal teve como objetivo integrar e ampliar a participação de renováveis na matriz energética, com fomento à inovação e com a meta de redução de 20% da intensidade energética, isto é, reduzir o dispêndio de energia, mantendo o nível de produção constante para redução da emissão de poluentes. Em consonância com a lei de energia renovável, o plano traçou metas nacionais de eficiência, planejamento e estímulos à expansão da energia solar, considerando o contexto ambiental e social (Chow, 2011; Lewis, 2013).

Em 2009, as fabricantes de componentes para sistemas fotovoltaicos, que respondiam por cerca de 95% das exportações, sofreram os efeitos da crise financeira global. Face à isso, o Ministério das Finanças, o Ministério da Ciência e Tecnologia e a Administração Nacional de Energia lançaram o Programa "*Golden Sun*" como um plano de emergência para estimular a demanda interna e evitar o colapso de milhares de empresas (Wang *et al.*, 2017; IEA, 2021).

Entre 2009 e 2012, o programa aprovou 655 projetos, alcançando uma capacidade de 5,9 GW. Resultado que ilustra a importância da política para preservação do mercado e alterar a dinâmica exportadora da indústria fotovoltaica para o mercado interno, que se verifica com a redução das exportações para 82,5% em 2012 (Wang *et al.*, 2017; IEA, 2021).

Em 2011, foi lançada a primeira *Feed-in Tariff* para energia solar, estabelecendo preços de compra fixos (1,15 RBM/kWh) para atenuar os riscos de mercado e expandir o investimento. Os mecanismos de precificação para o crescimento do setor foram destaque no relatório da NDRC (2013), com o estabelecimento de um sistema de zoneamento tarifário dividido em três zonas com tarifas decrescentes conforme a irradiação solar. Essas medidas, alinhadas ao 12º Plano Quinquenal, tinham como objetivo expandir a participação de fontes não fósseis na matriz

energética para 11,4% e ampliar a capacidade instalada de energia solar para 10 GW (*China*, 2011; IEA, 2013; Zhang *et al.*, 2013; Ye *et al.*, 2017).

A trajetória do setor não foi linear no final da década de 2010, a redução das tarifas *feed-in*, adotada em resposta à queda dos custos de produção, levou a desaceleração do ritmo de crescimento, o que poderia indicar uma transição gradual para uma operação menos dependente de mecanismos de apoio. Nesse contexto, a imposição de medidas *antidumping*, como as tarifas AD/CVD instituídas pelos Estados Unidos (2012) e pela União Europeia (2013) levaram a China a reorientar sua estratégia exportadora. No mesmo ano, regras de comércio de energia verde foram introduzidas para integrar a energia fotovoltaica ao mercado energético nacional, acompanhadas de ajustes nos incentivos domésticos e redução de custos (*Department of Commerce*, 2012; *European Commission*, 2013; Ye *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2020).

Em 2015, na Conferência de Paris, o país submeteu sua primeira Contribuição Nacional Determinada (NDC), com o compromisso de atingir o pico de emissões até 2030 e reduzir em 60 a 65% a intensidade de emissões de carbono em relação a 2005, além de expandir a participação de fontes renováveis e não-fósseis para 20% do consumo de energia (UNFCCC, 2015).

No mesmo ano, foi lançado o Programa *Top Runner*, baseado em cotas de instalação para módulos de alta eficiência, com intuito de fomentar o desenvolvimento industrial e a paridade de rede, associado à redução de custos. O programa impulsionou a transição para módulos mais eficientes e as reformas legislativas, como metas de instalação e redução tarifária (Zhang *et al.*, 2020).

Entre 2016 e 2020, o 13º Plano Quinquenal, teve como objetivo ampliar a capacidade instalada de energia renovável, com 105 GW solar fotovoltaica e aumentar para 15% a participação de não fósseis na matriz energética até 2020 e para 20% até 2030, com auxílio do programa *Top Runner* e da Política 531 de 2018, responsável pela redução das FITs e para desenvolvimento tecnológico de qualidade. Tais fatores estimularam a paridade de rede em consonância com outros projetos entre 2019 e 2020 (*China*, 2016; IEA, 2018; Zhang *et al.*, 2020, Yang *et al.*, 2024)

O programa *Whole-county Rooftop Solar* foi lançado em 2021 para estimular a geração distribuída por meio da instalação de sistemas em telhados residenciais e comerciais. No mesmo ano, a China atualizou a NDC com a introdução da meta de neutralidade de carbono até 2060, compromisso que se traduz na meta de ampliação da capacidade solar e eólica instalada para 1.200 GW até 2030 e no encerramento dos projetos de usinas de carvão no exterior. (*China*, 2021; OIES, 2023).

O 14º Plano Quinquenal, em conjunto com o Plano para Transição do Sistema Energético de 2021 a 2025 visavam aumentar a participação de energia de fontes de limpas na matriz energética até 2025, cumprir a meta de 20% de participação de energia não fóssil na matriz energética e ampliar a rede e a capacidade de armazenamento (China, 2022; IEDI, 2021).

As políticas industriais implementadas pelo país resultaram na consolidação de sua hegemonia na cadeia de suprimentos do setor. A China tornou-se a principal fornecedora de energia solar fotovoltaica, com a participação na produção global de matéria-prima, peças e equipamentos, como polisilício, lingotes e *wafers*, chegando a 98% (IEA, 2025; Cui *et al.*, 2025).

Em 2024, o governo manteve o estímulo à indústria com políticas de incentivo indireto, como planejamento para o desenvolvimento econômico sustentável. Em junho do mesmo ano, a participação das fontes renováveis na capacidade instalada total do país atingiu 53,8%. Ainda em 2024, houve a revisão da Lei de Energia (*Draft*) com ênfase na segurança e apoio à transição energética e proteção ambiental (China, 2024).

Já em 2025, foram apresentadas revisões das medidas de gestão fotovoltaicas, de ajuste de pico (*peak shaving*) e responsabilidade de custos de integração à rede. Nesse mesmo ano, o *Action plan for Green and Low-Carbon Transformation of Energy* (Plano de Ação da China para a Transformação Verde e de Baixo Carbono), emerge para reforçar a cadeia de abastecimento com fomento à P&D e a integração industrial, fomento à instalação em telhados e reajustes de incentivo (Shi *et al.*, 2025; IEA, 2025).

A hegemonia chinesa baseia-se em vantagens competitivas, como custos de produção reduzidos e complexos produtivos de grande porte. Estimou-se que, entre 2023 e 2026, a China será responsável por mais de 80% da capacidade global de produção de polissilício, *wafers*, células e módulos solares. Isso confere ao país uma posição quase monopolista, com custos que chegam a ser 65% menores que os dos EUA e 50% menores que os da Europa, o que favorece sua inserção nas cadeias internacionais (Wood Mackenzie, 2023).

O quadro a seguir sintetiza o processo de consolidação chinesa, especialmente por meio dos Planos Quinquenais de Desenvolvimento, com destaque a outras iniciativas e normativas responsáveis pela reorientação do viés exportador até a hegemonia na cadeia global de suprimentos de componentes solares. Programas como o *Golden Sun* e *Top Runner* estimularam o desenvolvimento da capacidade instalada, ao passo que revelam desafios para integração à rede e consolidação do setor com a redução gradual de subsídios em 2025. Dessa forma, o caso chinês exemplifica o poder de estratégias estatais orientadas para o desenvolvimento industrial estratégico e emergencial.

Quadro 2 - Principais Políticas Implementadas pela China

Período	Principais Políticas	Objetivos/Instrumentos	Impactos
2000-2005	10º Plano Quinquenal	Fomentar o uso de energias renováveis e desenvolver projetos voltados para eletrificação rural, em paralelo com outros planos (Programa 863 e <i>Song Dian Dao Xiang</i>).	Consolidação do setor, com formação da capacidade produtiva doméstica e para exportação; Redução dos custos produtivos e aumento da acessibilidade à energia elétrica.
2006-2010	11º Plano Quinquenal; <i>Golden Sun</i> (2009)	Aumentar a eficiência energética e a participação de energia limpa na matriz energética; Assegurar o funcionamento da indústria nacional no contexto da crise financeira global (2008).	Expansão da capacidade instalada; Reorientação e fortalecimento da indústria doméstica.
2011-2015	12º Plano Quinquenal	Aumentar a geração de energia não-fóssil e estimular novas indústrias; Introdução das FITs para redução de custos (2011); Zoneamento Tarifas (2013); <i>Top Runner</i> (2015).	<i>Boom</i> instalações com a consolidação da produção local; Reorientação devido a medidas de <i>antidumping</i> e avanço tecnológico.
2016-2020	13º Plano Quinquenal	Ampliar a capacidade instalada para renováveis até 680 GW, com 105 GW solar; Desenvolvimento do setor. Política 531 (2018).	Redução das FITs com reorientação para o desenvolvimento tecnológico qualitativo e redução gradual da dependência externa em tecnologias estratégicas.
2021-2025	14.º Plano Quinquenal	Aumentar para 20% a participação de não-fósseis na matriz e expandir a capacidade de armazenamento.	Integração produtiva; Expansão da capacidade instalada; Maior fornecedora de energia solar; Fortalecimento da infraestrutura.
2025-2026	Plano de Ação da China para a Transformação Verde e de Baixo Carbono	Reajustes de subsídios e incentivos; Integração industrial.	Encerramento de subsídios e da conexão automática e gratuita para GD e integração industrial com energia renovável.

Fonte: Elaboração própria (2025), com base nas referências citadas no texto.

3.3 Alemanha

A gênese da indústria fotovoltaica alemã nos anos 1980 foi marcada pelo pioneirismo na introdução de programas de apoio em larga escala, como a aprovação da *Stromeinspeisegesetz (Electricity Feed-in Law)* em 1988, considerada a primeira lei de *feed-in tariffs* (FIT) do mundo e com o programa “100.000 Telhados Solares” de auxílio à instalação. O país foi precursor na estruturação de apoio e fomento à energia de fontes renováveis, especialmente a solar, para estabelecer fontes alternativas à geração nuclear, consoante às preocupações ambientais e como medida de enfrentamento à crise do petróleo com esforços em P&D ainda na década de 1970 (Lauber; Mez; 2004; Palz, 2020)

Nesse período, foram implementadas iniciativas pontuais e limitadas de pesquisa e desenvolvimento em Energias Renováveis, além de ações estaduais e municipais. Contudo, o ponto de inflexão inicial ocorreu em 1990, com a *Electricity Feed-in Law* (StrEG). Lei que estabeleceu a obrigatoriedade da conexão das unidades geradoras à rede elétrica, bem como um regime de tarifação preferencial. Em 1999, o programa “1000.000 Telhados Solares” foi lançado a fim de expandir a instalação, o que estimulou o mercado doméstico (IEA, 2014; Lauber; Mez; 2004; *Clearingstelle EEG*, 2025).

A base para a ampliação do setor fotovoltaico no país foi consolidada nos anos 2000, com a Lei de Energias Renováveis (*Erneuerbare-Energien-Gesetz*, EEG) e com a introdução do mecanismo de tarifas *feed-in* (FIT) fixas, que assegurou a remuneração da energia gerada por vinte anos. Tais instrumentos foram cruciais para a institucionalização e para o desenvolvimento do setor (IEA, 2012; Palz, 2020; *Clearingstelle EEG*, 2025).

Determinados subsídios, como os instituídos pelas EEGs, são financiados por meio de uma divisão entre os consumidores através de uma tarifa adicional específica, a *EEG-Umlage* (EEG-Sobretaxa). Estratégia que combinou incentivo direto à produção com a socialização de seus custos para estimular o desenvolvimento do setor (Brüggemeier, 2015; *Clearingstelle EEG*, 2000).

Nos anos 2000, a *Renewable Energy Sources Act* substituiu a *Electricity Feed-in Law* introduziu tarifas específicas para fontes renováveis — como 0,51 €/kWh para solar geral em 2000, e para 0,57 €/kWh em sistemas após 2004, com ajustes anuais para novos sistemas. Mecanismo que, atrelado à previsibilidade de longo prazo, estimulou o investimento privado e a diminuição dos custos, conferindo a Alemanha posição entre os líderes mundiais na geração de energia solar fotovoltaica (*Clearingstelle EEG*, 2000; Hoppmann *et al.*, 2014;)

Diante desse cenário, Palz (2020) expõe que investimentos significativos para produção de componentes de sistemas fotovoltaicos foram fundamentais para o estabelecimento da cadeia produtiva e contribuíram para a diminuição dos custos de implantação. O êxito da política alemã desencadeou o aumento das instalações, elevando a capacidade instalada de 435 MW em 2003 para cerca de 6 GW em 2008. Tamanha expansão possibilitou que o país atingisse antecipadamente suas metas de energia renovável e estimulou a produção local, gerando empregos em toda cadeia produtiva fotovoltaica (Hoppmann *et al.*, 2014).

As sucessivas emendas da EEG ilustram um processo contínuo de aprendizado e ajustes regulatórios. A EEG de 2004 estabeleceu metas de expansão mais altas, como elevar para 20% a participação de renováveis até 2020 e introduziu tarifas diferentes de acordo com as faixas de potência, enquanto a EEG de 2009 aperfeiçoou a estrutura legal, com fomento ao autoconsumo e a comercialização direta obrigatória com controle remoto. Nesse período, o mercado alemão cresceu impulsionado pela redução de custos dos módulos, em decorrência do contexto pós-crise financeira global e da expansão chinesa. Todavia, com cortes progressivos a partir da década 2010, a expansão do mercado alemão desacelerou e o país perdeu a liderança para a China em 2013. As políticas seguintes reorientaram a direção da expansão e integração das renováveis e a transição energética priorizando um modelo de paridade com o mercado com incentivos para sistemas de armazenamento (*Clearingstelle EEG*, 2004, 2009; Lauber; Mez; 2004; Hoppmann *et al.*, 2014; Quitzow, 2015).

A política do país foi intensiva em pesquisa e desenvolvimento (P&D) para redução dos custos da tecnologia e fortalecimento da competitividade da indústria nacional. Nesse sentido, iniciativas como a "*Innovation Alliance PV*", lançada em 2010, foram responsáveis por investimentos conjuntos entre governo e setor privado. Tais recursos foram direcionados a projetos que contemplavam toda a cadeia de valor, desde as matérias-primas, produção e até esforços para o aumento da durabilidade e eficiência dos módulos fotovoltaicos. Como resultado, observou-se uma redução nos preços dos equipamentos, o que contribuiu para a disseminação da tecnologia e assim, tais políticas estimularam o crescimento expressivo da capacidade instalada de 45 MW em 2000 para 7.400 MW em 2010 (IEA, 2014; BSW *Solar*, 2013).

As EEGs de 2012 e 2014 com a *PV-Novelle* de 2012, reforma competente à EEG 2012 com foco na redução de subsídios, como 16% das FITs, integração ao mercado, novas disposições para remuneração, como sua redução paulatina e metas para ampliação mudaram a dinâmica de apoio ao setor ao se concentrarem na integração das fontes renováveis no mercado e no controle dos custos. Ademais, medidas como os "corredores anuais de expansão", além de

reformas do teto (*floating caps*) para a capacidade solar, que estabeleceu um teto de 52 GW para a concessão de subsídios a novas instalações e a obrigatoriedade de controles remotos para instalações com geração superior à 10 kW, contribuíram para a reconfiguração da indústria alemã (*Clearingstelle EEG*, 2012, 2014; *Stadtwerke Kusel*, 2012; Wirth, 2025).

A EEG 2014 deu início a substituição das FITs por novas medidas, como os prêmios de mercado e as vendas diretas, o que alterou os corredores de expansão, com aumento da capacidade instalada anual para fontes renováveis, com 2,5 GW, além da meta de alcançar a paridade de mercado até 2018, e da integração do autoconsumo o pagamento da EEG-*Umlage* de 30% em 2014 até 40% em 2017 (*Clearingstelle EEG*, 2014).

A partir de 2016, novas diretrizes estipularam diferentes formas de remuneração, além dos prêmios de mercado e dos leilões. Estas alterações marcaram a transição para um modelo mais competitivo e orientado ao mercado, porém ainda alinhado à sustentabilidade do dinamismo e da inovação do setor (Wirth, 2025).

A EEG de 2017 representa outro marco da política energética alemã ao substituir as tarifas *feed-in* por leilões para grandes projetos, indicando a maturidade do mercado. Posteriormente também foram introduzidos novos modelos de negócio, como "aluguel de energia elétrica" e "aluguel de telhados", com o objetivo de ampliar a participação dos agentes e otimizar o uso da infraestrutura existente. Tal processo representa a adaptação da política alemã, que evoluiu de um modelo baseado não apenas em incentivos tecnológicos, mas também com uma integração sustentável ao mercado e à rede (*Clearingstelle EEG*, 2017; Wirth, 2025).

Em comparação com a EEG de 2017, a atualização de 2021 foi um pouco menos agressiva, com ajustes voltados para leilões competitivos formais e corredores obrigatórios, para a flexibilização dos corredores de expansão para ampliar o setor. Essa atualização tinha como objetivo adaptar mudanças feitas em 2020, como partes da EEG de 2014 e 2017, com foco na competitividade e transição de mercado atreladas às metas de expansão de renováveis (40 a 45% até 2025) e manter o apoio legal, integração de sistemas fotovoltaicos e alcançar a meta de 65% renováveis até 2030, alinhando a política energética à neutralidade climática (*Clearingstelle EEG*, 2017, 2021; Alemanha; 2020).

A EEG de 2023 estabeleceu a meta de chegar a 400 GW de capacidade instalada até 2040 e declarou as renováveis como "interesse público primordial" e marcou o início do encerramento da remuneração durante preços negativos, isto é, períodos em que a oferta excede demanda e os produtores pagam para poder injetar energia na rede. E em 2024, o *Solarpaket* foi apresentado para tornar os sistemas solares de telhado e geração com uso de terras agrícolas

(Agri-PV) acessíveis, a fim de conciliar a geração de energia solar com a atividade produtiva agrícola no mesmo espaço (*Clearingstelle EEG*, 2023, 2024; Wirth, 2025; Fladung *et al.*, 2026).

Em 2025, foi encerrada a remuneração durante preços negativos, voltada para alinhar incentivos à estabilidade do sistema energético, o que ampliou a flexibilidade operacional e o financiamento, além da expansão das usinas de varanda (*Balkonkraftwerke*). No mesmo ano foi anunciado o *MiSpeL*, programa voltado para a integração dos sistemas elétricos de armazenamento ao mercado, além do *Smart Meters* para o controle remoto da geração (*Clearingstelle EEG*, 2025)

Em síntese, os resultados das políticas instituídas pela EEG foram representativamente significativos. Em 2024, mais de 50% da energia elétrica consumida na Alemanha era proveniente de fontes renováveis, com o setor de energia solar fotovoltaica respondendo por 13,9% do total. Outrossim, a trajetória do país expôs a viabilidade da integração em larga escala de fontes de energia renováveis, ao passo que apresentou desafios, como o aumento das tarifas e a necessidade de expansão da infraestrutura de transmissão e armazenamento (Fraunhofer ISE, 2025).

A experiência alemã apresentada no quadro a seguir, demonstra como políticas públicas consistentes e adaptáveis como a *Stromeinspeisegesetz* podem transformar rapidamente a matriz energética, ao mesmo tempo que evidenciam seus desafios, como o equilíbrio de incentivos estatais e a competitividade industrial. Desse modo, o caso alemão ilustra lições importantes tangentes ao potencial das políticas públicas para países que visam expandir sua capacidade solar fotovoltaica, mas ainda necessitam de políticas industriais e regulatórias igualmente robustas para a garantia da sua sustentabilidade.

Quadro 3 - Principais Políticas Implementadas pela Alemanha

Período	Principais Políticas	Objetivos/Instrumentos	Impactos
1990-2000	<i>Stromeinspeisegesetz</i> (StrEG) 1990; EEG 2000	Aumentar a participação das energias renováveis na geração de total para redução da energia nuclear; Tarifas mínimas com foco no desenvolvimento sustentável.	Precursora que firmou a <i>Energiewende</i> ; Modelo FIT replicado globalmente; Avanço tecnológico sem formação da base legal para expansão energética.
2000-2005	EEG 2000 & <i>Umlage</i> (sobretaxa); EEG 2004	Financiamento da política fora do orçamento federal; Ajuste nas FITs e meta de expansão de 20% até 2020.	Proteção contra cortes orçamentários; Ajuste tarifário mantendo suporte à energia solar e outras renováveis.
2005-2009	EEG 2009	Estímulo ao autoconsumo e ao desenvolvimento do setor; Ajuste tarifário automático.	Avanço legal e ampliação do mercado.
2010-2015	PV- <i>Novelle</i> 2010 e 2012; EEG 2012 e 2014	Investimentos público-privados em toda cadeia de valor e incentivo ao autoconsumo; Controle remoto obrigatório.	Redução dos preços dos equipamentos, FITs em 16%, seguida por redução progressiva; Desaceleração do setor; Marco inicial do sistema de leilões.
2016-2020	EEG 2017	Substituição das FITs por leilões; Introdução de novos modelos de negócio para aumentar a participação dos agentes na integração rede.	Integração sustentável ao mercado e a rede; Leilões como mecanismo de expansão e aumento da competitividade.
2021-2025	EEG 2021; <i>Solarpaket</i> ; EEG 2023	Metas de 65% eletricidade renovável, 400 GW até 2040; Renováveis como interesse primordial; Expansão das <i>Balkonkraftwerke</i> ; <i>Smart Meters</i> obrigatórios e armazenamento integrado ao mercado.	Aumento da geração distribuída; <i>Boom</i> das usinas de varanda.

Fonte: Elaboração própria (2025), com base nas referências citadas no texto.

3.4 Japão

O Japão distingue-se das demais nações analisadas por sua vulnerabilidade estrutural, fruto da escassez de recursos naturais e de sua condição insular, o que dificulta a integração

física com redes internacionais de fornecimento e torna o país suscetível a interrupções por catástrofes naturais. Neste viés, a segurança energética figura entre as prioridades do país. A priori, centrada no carvão e posteriormente em petróleo, a trajetória energética japonesa foi marcada pela perda de autonomia, consolidando a dependência de fontes externas (Kimura; Suzuki, 2006; Cherp *et al.*, 2017; Yoshida, 2018)

O avanço da energia solar fotovoltaica no Japão é resultado de cerca de três décadas de desenvolvimento tecnológico, articulado entre políticas públicas e de mercado. A crise do petróleo evidenciou a dependência de combustíveis fósseis importados, o que levou à criação do *Sunshine Program* (1974) para o fomento da expansão e a oferta de energia não-fóssil e para o desenvolvimento de iniciativas de pesquisa e inovação. Após 1979, fortaleceu tais medidas e levou à criação da “*Alternative Electric Act*”, normativa que aumentou os impostos sobre energia, para o financiamento dos programas e no desenvolvimento tecnológico. Ainda nesse período, foi criada a NEDO (*New Energy and Industrial Technology Development Organization*) para o desenvolvimento de novas fontes de energia não-fóssil, com foco em autonomia energética e inovação do setor para garantir estabilidade e acessibilidade do sistema energético (Kimura; Suzuki, 2006; Yoshida, 2018).

A dinâmica do setor de energia solar do Japão pode ser compreendida em três fases decenais. A primeira, entre de 1974 e 1984, foi baseada em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para energia fotovoltaica e térmica. A segunda fase, de 1984 a 1994, firmou o progresso técnico com sistemas demonstrativos e permitiu a aprendizagem produtiva das firmas locais (Kimura; Suzuki, 2006). Entretanto, frente aos desafios singulares do país, desde os anos 1970, a energia nuclear compõe a política energética japonesa com robusto programa de pesquisa e desenvolvimento (Cherp *et al.*, 2017).

A terceira fase, que durou de 1994 a 2004, foi marcada pela ampliação do setor em direção ao mercado residencial, com a implementação de subsídios para instalação dos sistemas fotovoltaicos, normativas para conexão com a rede e a iniciativa de *net metering* para estimular a demanda do setor. Como resultado, tais ações resolveram os entraves regulatórios, o que, por consequência, tornou o mercado mais atrativo para os consumidores e marca o início da difusão da energia solar no país (Kimura; Suzuki, 2006).

A estratégia japonesa para o setor fotovoltaico entre os anos 1990 e 2000 voltou-se para um modelo que combinava P&D e incentivos diretos para consolidar a tecnologia e reduzir custos, seguindo a orientação do programa *New Sunshine*. Foram implementadas ainda, medidas como a “*Field Test Program for PV Power Generation*” que consistia na instalação de sistemas em prédios públicos para coleta e análise de dados e o “*Monitoring PV Power*

Generation System for House” com subsídios que equivalentes à 50% do valor da instalação em domicílios, condicionados a participação dos consumidores no programa, que tinha como objetivo acompanhar o funcionamento e aprimorar tecnologias para uso residencial. Paralelamente, a introdução da Lei RPS (*Renewable Portfolio Standard*) impôs as maiores empresas do setor a obrigatoriedade de aquisição de uma cota mínima de energia limpa de aproximadamente 1,35% até 2010 (Tatsuta, 1996; Nishio; Asano, 2006).

Empresas como Sharp, Kyocera e Sanyo chegaram a deter cerca de 50% do mercado global de painéis fotovoltaicos nos anos 2000, consolidando a liderança japonesa em capacidade instalada e P&D. O lançamento do *Roadmap* PV2030 em 2004 estabeleceu diretrizes de planejamento tecnológico de longo prazo, com metas de 28 GW até 2020 e 100 GW até 2030. Contudo, o encerramento do programa de subsídios em 2005 e a desregulamentação do setor elétrico geraram incertezas sobre a continuidade da disseminação residencial e do *net metering*, tornando o setor vulnerável às oscilações políticas (Kimura; Suzuki, 2006; IEA, 2005).

No entanto, com o objetivo de retomar a liderança ambiental, o Plano de Ação para Sociedade de Baixo Carbono de 2008 foi lançado, reintroduzindo subsídios e o sistema de *Surplus Buyback* de remuneração por excedente, para coordenação da demanda doméstica com preços fixos, antecipando elementos que posteriormente consolidados com as FITs (*Japan*, 2008, 2009; Yoshida, 2018).

O acidente nuclear de Fukushima em 2011, representou uma ruptura na trajetória energética japonesa. A paralisação de usinas nucleares reorientou a estratégia do país e fortaleceu o papel das energias renováveis como alternativa para a dependência energética externa para cumprir metas de descarbonização e garantir a confiança no sistema energético nacional (Komiyama; Fujii, 2017)

A introdução da *Feed-in Tariff* em 2012 marcou o período de crescimento mais expressivo do setor, elevando a capacidade instalada de 6,6 GW para 28,4 GW até 2015. No entanto, o ritmo acelerado expôs os limites da infraestrutura de rede e como resultado, o excesso de geração resultou na necessidade de medidas de *curtailment*, e a suspensão de novas conexões em 2015 evidenciou a urgência de investimentos em transmissão e flexibilização do sistema. Em resposta, as tarifas foram progressivamente reduzidas — de 40 JPY/kWh em 2012 com meta de 7 JPY/kWh até 2030 —, a revisão de 2017 introduziu leilões para grandes usinas e o mecanismo de limpeza de *pipeline* para eliminar projetos inativos (Komiyama; Fujii, 2017; Yoshida, 2018).

O *Strategic Energy Plan* lançado em 2018 projetou para 2030 que a matriz energética seria composta por 22% a 24% de fontes renováveis e reafirmou o compromisso japonês com a meta de redução de 26% nas emissões de gases de efeito estufa em relação a firmada em 2013 (Ohta, 2020; *Strategic Energy Plan*, 2018).

Em 2021, o 6º Plano Estratégico de Energia elevou a meta de participação de renováveis na matriz energética de 36% a 38% até 2030. Tal programa sinalizou a transição do modelo de tarifas fixas (FIT) para o regime de integração de mercado VPP (Usina Virtual de Energia) baseado no modelo "*Feed-in Premium*", combinado com o estímulo à adoção de baterias para o sistema de armazenamento. Em paralelo, foram destinados 150 trilhões de ienes para Política Básica GX (*Green Transformation*), a fim de fortalecer a soberania tecnológica e industrial nacional. Ademais, foram desenvolvidas inovações como as células de Perovskita, cujos painéis flexíveis podem ser instalados em edificações para contornar limitações geográficas do país (Japan, 2025; Schilling, 2024).

A Perovskita trata-se de um material que permite a produção de células extremamente finas em comparação ao silício convencional, o que facilita a instalação em áreas urbanas, fator determinante diante das limitações geográficas japonesas. Sua adoção faz parte da estratégia nacional para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e alcançar a meta de 20 GW gerados em painéis de perovskita até 2040 (Japan, 2025; *Science Japan*, 2025).

O planejamento para o encerramento gradual do FIT até 2032 e a extinção dos subsídios para grandes usinas em 2027 indicam um plano de desoneração estatal. Paralelamente, políticas de descentralização urbana foram adotadas para fortalecer a geração distribuída, como o Mandato Solar de Tóquio (2025), que tornou obrigatória a instalação de painéis solares em novas construções, o que também já foi adotado em Kyoto em 2022 e tem potencial para expansão nacional. Com essa medida, o Japão vai além da intenção de contornar a escassez de espaço, mas também para consolidar a geração distribuída como o novo padrão de sustentabilidade pós-subsídios (Japan, 2025).

A norma se aplica a moradias com área inferior a 2.000 metros quadrados, o que exige uma potência mínima instalada de 2 kW. No entanto, ficam isentas edificações já existentes e aquelas com restrições estruturais, como telhados pequenos ou orientação desfavorável. A obrigatoriedade da normativa incidirá sobre grandes incorporadoras que constroem mais de 20.000 metros quadrados por ano na cidade, fator que limita seu alcance a cerca de metade das novas construções de Tóquio, entre 40.000 e 50.000 unidades por ano (*Energy Trend*, 2024; Canal Solar, 2025).

A experiência japonesa sintetizada no quadro abaixo, demonstra que a integração em larga escala de energias renováveis exige infraestrutura robusta, expansão da transmissão, capacidade de armazenamento e normativas bem delimitadas. A trajetória do país é marcada pela expressiva expansão da capacidade instalada impulsionada pelas FITs após o acidente de Fukushima e pela transição para um modelo de mercado competitivo com geração descentralizada. Desafios como o *curtailment* e as restrições territoriais demandam modernização contínua da rede. Por fim, o desenvolvimento de inovações adaptadas às limitações geográficas do país — como as células de Perovskita para fachadas urbanas — oferece lições relevantes para mercados com escassez de espaço e alta densidade populacional e exemplifica a importância da elaboração de programas focados nas especificidades intrínsecas de cada país.

Quadro 4 - Principais Políticas Implementadas pelo Japão

Período	Principais Políticas	Objetivos/Instrumentos	Impactos
2000-2010	Programa <i>New Sunshine; Renewable Portfolio Standard</i> (RPS) 2003; <i>Roadmap</i> PV; Plano de Ação para a Sociedade de Baixo Carbono; <i>Residential Surplus Electricity Purchasing Scheme</i>	Expandir o uso da tecnologia, reduzir custos de produção em escala em P&D; Obrigatoriedade de compra <i>utilities</i> ; Meta de 28 GW até 2020 e 100 GW até 2030; Coordenação da demanda doméstica com subsídios e obrigações de compra.	Alcança a liderança mundial; Marco do retorno do apoio governamental ao setor energia renovável. Recuperação do mercado residencial e antecipação das FITs.
2010-2015	<i>Feed-in Tariff</i> (FIT); <i>Renewable Energy Act</i> julho 2012; Suspensão de Conexões	Resposta ao acidente de Fukushima; Fomento a fontes renováveis para reduzir dependência nuclear.	A expansão da capacidade instalada de 6,6 GW em 2012 para cerca de 28,4 GW em 2020; Início do <i>curtailment</i> e do reconhecimento dos limites e necessidade de modernização.
2015-2020	Leilões; <i>pipeline cleaning; Strategic Energy Plan</i>	Leilões para grandes usinas; Normas de operação e manutenção para redução de custos; Redução de GEE.	Consolidação do mercado e transição para um padrão de competição; Eficiência operacional.
2020-2025	Política Básica GX (<i>Green Transformation</i>); Encerramento FIT; Descentralização urbana	Fomento à adoção de baterias para armazenamento e para fortalecer a indústria nacional; Redução de fósseis e meta de 20 GW de renováveis; transição do FIT até 2032.	Redução da dependência de grandes usinas; P&D; Tóquio e Kyoto implementam medidas de obrigatoriedade de sistemas em novas construções; Redução da dependência de subsídios e fortalecimento do mercado competitivo com escala e eficiência.

Fonte: Elaboração própria (2025), com base nas referências citadas no texto.

3.5 Índia

O desenvolvimento do setor de energia renovável na Índia, em um cenário de consumo energético alto e crescente baseado em fontes altamente poluentes, teve início na década de 1980 com a criação da Comissão de Fontes Energéticas Adicionais em 1981 e com o avanço do Ministério de Novas Energias Renováveis (MNRE) em entre 1982 e 2006. Nesse panorama, ainda em 1985, foi criada a *Indian Renewable Energy Development Agency* (IREDA) com a atribuição de financiar projetos voltados para o desenvolvimento de fontes de energia renováveis. Com esse arcabouço institucional combinado com incentivos fiscais, projetos-piloto e investimentos, a indústria indiana avançou e integrou o setor privado na geração de energia solar (Bhattacharya; Jana, 2009).

Em 2005, o *Ministry of New and Renewable Energy* (MNRE) direcionou esforços para programas de P&D com o objetivo de impulsionar o desenvolvimento tecnológico e da mão de obra para o setor fotovoltaico no país. Nesse contexto, a Índia contava com aproximadamente 1,3 milhão de sistemas solares instalados, voltados principalmente à iluminação e para sistemas de bombeamento de água (Bhattacharya; Jana, 2009; Sahoo, 2016; Sharma, 2019).

Em 2008, foi lançado o *National Action Plan on Climate Change* (NAPCC), um pilar para o estabelecimento do arcabouço de política climática nacional com foco em energias renováveis. O plano introduziu 8 missões nacionais, como a energia solar na *National Solar Mission*. Dessa forma, o NAPCC foi fundamental para a constituição da base institucional para políticas setoriais utilizando como instrumento para mitigar mudanças climáticas a energia solar (India, 2021; Sharma, 2019).

Na fase inicial de disseminação da energia solar, a tecnologia era majoritariamente empregada em projetos de pequeno porte e sem conexão com a rede elétrica. Neste período, grandes firmas indianas e multinacionais anunciaram aportes para ampliação produtiva, o que incluiu *joint ventures*, como a *Adani Power* para manufatura local de módulos e baterias, usados no setor de defesa e no sistema ferroviário. Ademais, a estratégia de 2010, *Jawaharlal Nehru National Solar Mission* (JNNSM), estabeleceu a meta de alcançar 20 GW de capacidade até 2020, 100 GW até 2030 e 200 GW até 2050, além de instalar 20 milhões de sistemas de iluminação solar em zonas rurais até 2022. Medidas que estabeleceram uma política de incentivo à indústria, com foco em tecnologia e regulação (Sharma, 2019).

Para atingir tais metas, o programa articulou subsídios governamentais, tarifas *feed-in*, leilões competitivos, além de metas *off-grid*. Entre 2010 e 2015, a combinação do *Viability Gap Funding* (VGF) com leilões reversos viabilizou os projetos iniciais, impulsionando a expansão

do setor. Nesse período, a projeção para capacidade instalada de energia renovável do país saltou de 45,92 GW em 2016 para 132,98 GW em 2023, com meta de 450 GW para 2033, com 72,31 GW de origem solar. Tais fatores colocam a Índia no mercado solar global, atraindo investimentos privados (IRENA, 2016; *India*, 2019; Sardar; Ray, 2024).

Em 2014, a *Jawaharlal Nehru National Solar Mission* foi revisada e priorizou projetos de larga escala e geração distribuída, além da ampliação da meta para 175 GW até 2022, sendo 100 GW exclusivamente solar. Essa alteração colaborou para a consolidação da Índia como um dos maiores mercados fotovoltaicos do mundo. No ano seguinte, diretrizes nacionais de energias renováveis da JNNSM reforçaram tais objetivos e promoveram a integração com o planejamento energético nacional, por meio da revisão de leis, novas emendas para reforçar a *Electricity Act* e de outras medidas de desenvolvimento (IRENA, 2015; *United Nations*, 2021; *India*, 2025).

De 2015 a 2020, a ampliação dos leilões em larga escala impulsionou a expansão da capacidade instalada. Em 2017, a adoção de leilões *bidding* competitivos substituiu gradualmente as tarifas *feed-in*, o que contribuiu para a redução dos custos da energia solar (*India*, 2015, 2018; Venkatesh, 2025).

Em 2018, a Índia adotou uma estratégia protecionista por meio da *Safeguard Duty*, que instituiu tarifas de importações de sistemas solares da China e Malásia em até 25% e ofereceu subsídios de 20 a 25% em zonas econômicas especiais (ZEEs) para fabricação doméstica através do *Modified Special Incentive Package Scheme*. O M-SIPS também concedeu isenções fiscais, fortalecendo a indústria interna e incentivando o investimento privado (*India*, 2012, 2018).

Em 2019, a criação da *Approved List of Models and Manufacturers* (ALMM) estabeleceu padrões obrigatórios para módulos e fabricantes em projetos públicos, reforçando a política industrial doméstica no setor solar. Em 2021, o governo lançou o programa *Production Linked Incentive* (PLI) voltado para fabricação de módulos solares de alta eficiência, com o objetivo de estimular a manufatura nacional. Implementado em duas fases, a iniciativa viabilizou a criação de aproximadamente 48 GW de capacidade produtiva no país, ampliando a base industrial doméstica contribuindo para redução da dependência de importações (*India*, 2019, 2021, 2024).

O aumento da capacidade instalada de geração de energia elétrica de cerca de 79,23 GW ao longo do período de 2016 a 2023 reflete o potencial do país e evidencia o fluxo de entrada de investimentos estratégicos para a diversificação da matriz energética indiana. Neste cenário, em 2023, o setor de energia solar atingiu 72,31 GW de capacidade instalada, responsável por

54,5% dos 132 GW da capacidade renovável nova³ total, que desconsidera “hidrelétricas grandes”, isto é, com capacidade acima de 25 MW conforme o total da geração elétrica renovável apresentada no quadro a seguir. Resultado que firmou a posição da Índia entre os principais mercados emergentes em energias renováveis. (Mahida, 2024; *India*, 2024).

Quadro 5 - Participação percentual de fontes renováveis de energia

Categoria	GW	Participação percentual das renováveis novas
Solar	72,31	54,5%
Eólica	42	31,6%
Biomassa	10	7,5%
Hidrelétrica pequena*	5	3,8%
Total renováveis novas	133	100%

Fonte: Elaboração Própria; *Down to Earth*, 2025.

Em 2024, o *Pradhan Mantri Surya Ghar Muft Bijli Yojana* 3 foi anunciado com o objetivo de viabilizar o acesso à energia elétrica gratuita para cerca de 10 milhões de moradias por meio da instalação de painéis solares nos telhados residenciais. A normativa prevê que cada família seja beneficiada com subsídio de até 60% por sistema solar. Entre 2024 e 2025 também foram implementados os *Basic Customs Duty* como estratégia para substituição de importações, com tarifas de 25% a 40% sobre produtos importados (*India*, 2024)

Em suma, o quadro 6 apresenta a trajetória de desenvolvimento e expansão do setor na Índia, impulsionada por estratégias como a JNNSM e leilões, com medidas protecionistas como ALMM e PLI fortalecendo a manufatura local. Políticas como *Pradhan Mantri Surya Ghar* ampliam a disseminação e o acesso à tecnologia residencial no país com viés social, porém enfrentam gargalos no que tange à transmissão e armazenamento. O modelo indiano ilustra o potencial de leilões competitivos e dos esforços para equilibrar o rápido crescimento com equidade social e industrialização nacional em um contexto emergente com a urgência da transição energética.

³ Terminologia usada na *Jawaharlal Nehru National Solar Mission* para metas de diversificação energética, como a especificação “hidrelétrica pequena” desconsiderando “grandes” para novos projetos.

Por fim, Sareen e Kale (2018) analisam a transição energética indiana sob uma ótica sociopolítica, abordagem que permite compreender a expansão do setor fotovoltaico. Essa perspectiva amplia o estudo ao incorporar elementos como equidade, acessibilidade e participação social, o que se alinha à teoria orientada por missões discutida por Mazzucato (2018).

Quadro 6 - Principais Políticas Implementadas pela Índia

Período	Principais Políticas	Objetivos/Instrumentos	Impactos
2000-2010	<i>National Action Plan on Climate Change</i> (NAPCC); <i>Jawaharlal Nehru National Solar Mission</i> (JNNSM) 2010; <i>Viability Gap Funding</i> .	Consolidar o arcabouço de política climática nacional com 8 missões nacionais, como a energia solar na <i>National Solar Mission</i> ; Cumprir a meta de meta 20 GW solar até 2020, 100 GW 2030; 20 milhões de sistemas <i>off-grid</i> rural.	Base do setor para combater mudanças climáticas, expansão setorial; FIT de 25 anos; Aumento da atratividade do setor.
2010-2015	JNNSM Revisão 2014 (100 GW meta); Diretrizes Nacionais Renováveis 2015	Expansão da política focada no setor fotovoltaico, meta de capacidade instalada de 175 GW (100 GW solar); Planejamento integrado nacional.	Consolidação da Índia um dos maiores mercados; Previsibilidade regulatória e alinhamento entre as políticas.
2015-2020	Expansão Leilões Solares em Larga Escala; Adoção Plena Leilões 2017. <i>Safeguard Duty</i> (SGD); SIPS; ALMM (2019)	Aumentar a capacidade instalada com menor custo; Substituição das FITs para o modelo de leilões; Proteção industrial com tarifas à importação; Subsídios nas ZEEs e incentivos para produção doméstica.	Recordes constantes de tarifas; Proteção nacional com fomento ao investimento privado e o fortalecimento da indústria; Ampliação de barreiras à importação, estimulando à produção nacional, porém, com aumento de custos
2020-2025	PLI; <i>Pradhan Mantri Surya Ghar Muft Bijli Yojana</i> ; <i>Basic Customs Duty</i>	Incentivos à produção doméstica, com tentativa de substituição de importações; Subsidiar a energia solar com eletricidade gratuita em 10 milhões de residências para estimular a rede doméstica.	Fomentou a produção local, porém com aumento de custos; Expansão da capacidade instalada (48 GW); Expansão da geração distribuída residencial com políticas energética e social.

Fonte: Elaboração própria (2025), com base nas referências citadas no texto.

3.6 Brasil

Shimomaebara e Peyerl (2022) apontam que, apesar dos debates relacionados à temática da energia solar fotovoltaica remeterem à década de 1970, em decorrência dos impactos causados pela primeira Crise do Petróleo, os primeiros interesses voltados para pesquisas acadêmicas datam da década de 1950. O II Plano Nacional de Desenvolvimento ilustra uma das primeiras tentativas de tratar do setor fotovoltaico como forma de mitigar a dependência externa. Entretanto, os resultados do plano foram limitados para o setor, uma vez que a prioridade estava voltada para outras fontes, como a hídrica e para o desenvolvimento do Proálcool (Shimomaebara; Peyerl, 2022).

Lançado na década de 1990, o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEEM), representou uma grande iniciativa governamental de uso em larga escala da energia solar fotovoltaica. A política tinha como objetivo levar energia elétrica para regiões isoladas não atendidas pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), utilizando sistemas fotovoltaicos, com foco direcionado para escolas de zonas rurais, unidades de saúde e para o bombeamento de água (Galdino, 2002).

A iniciativa ampliou a disseminação dos sistemas fotovoltaicos em áreas isoladas, somando mais de 7.500 deles até 2002. No entanto, os resultados ficaram aquém do esperado devido à falta de coordenação com as demais políticas vigentes, como as políticas de reformas do sistema elétrico com foco em sistemas interligados e o programa Luz no Campo, focado na extensão da rede com o desenvolvimento do setor. Outrossim, a ausência de uma estratégia voltada para o financiamento e manutenção, limitou a efetividade do programa (Shimomaebara; Peyrel, 2022).

No âmbito tributário, o Convênio CONFAZ nº 101/1997 concedeu isenção do ICMS para componentes de sistemas fotovoltaicos e eólicos, medida prorrogada posteriormente, que contribuiu para dinamizar o comércio do setor no país. O PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), foi lançado em 2002 para fomentar o uso de renováveis com um sistema de remuneração baseado em tarifas-prêmio (FIT). O programa Luz no Campo (1999) que mais tarde formou a política Luz Todos de 2003, viabilizou o acesso à energia elétrica em regiões isoladas por meio de sistemas fotovoltaicos *off-grid* (Brasil, 1997, Elgamal; Demajorovic, 2020; Shimomaebara; Peyerl, 2022).

A Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), de 2009, com foco principal na preservação ambiental e na redução da emissão de poluentes, usou da energia solar como alternativa para geração energética para colaborar com as metas de redução da emissão dos

gases de efeito estufa. Porém, mesmo tendo contribuído para o avanço do setor, enfrentou dificuldades no que se refere à governança e ao monitoramento (Brasil, 2009; Santos; 2021).

A Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL introduziu o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (*net metering*) permitindo que o consumidor-gerador injetasse excedentes na rede e recebesse créditos para abatimento em faturas futuras, instituindo o marco regulatório da geração distribuída no país. A REN nº 687/2015 aprofundou esse arcabouço ao incorporar o autoconsumo remoto e a geração compartilhada, estender a validade dos créditos 60 meses e elevar a potência máxima por unidade para 5 MW, medidas que, somadas à isenção de ICMS concedida pelos estados em 2015, fortaleceram o setor e estimularam novos modelos de negócio (ANEEL, 2012, 2015; Leite *et al.*, 2024; Dantas, Pompermayer, 2018).

Em 2015, o Convênio ICMS nº 16/2015 (CONFAZ) autorizou os estados a concederem isenção do ICMS sobre a energia elétrica compensada na rede, zerando impostos referentes ao total fornecido, porém não consumido, ou seja, sobre o consumo líquido (Brasil, 2015). A medida reduziu os custos dos sistemas de microgeração e minigeração distribuída e estimulou a adoção de sistemas fotovoltaicos (Brasil, 2015; Silva, 2015; Leite *et al.*, 2024).

A Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (PRONASOLAR) de 2018, instituiu um programa nacional voltado à inovação tecnológica para o desenvolvimento do setor fotovoltaico com foco na segurança energética e na capacitação técnica. No mesmo período, os leilões LEN (Leilão de Energia Nova) e LER (Leilão de Energia Reserva) consolidaram a energia solar como fonte competitiva na matriz elétrica nacional, com destaque para o LEN-A6 de 2019, que movimentou cerca de R\$ 11,2 bilhões em contratos (Brasil, 2018, 2019; Dantas, Pompermayer, 2018; CCEE, 2018).

Em complemento, a análise por segmentos de mercado reflete a alta expansão da geração centralizada, bem como da geração distribuída. Em 2020, a capacidade instalada fotovoltaica no Brasil contava com 7,7 GW, distribuídos entre os segmentos de geração distribuída (5,1 GW, cerca de 61% do total) e geração centralizada (3,2 GW, aproximadamente 39%), enquanto em 2015 somava-se apenas 42 MW no total (Pereira; Rütther, 2021).

Em 2021, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) anunciou financiamento para a construção do maior complexo de energia solar da América Latina, composto por 14 usinas fotovoltaicas com capacidade instalada de 700 MW (0,7 GW), suficiente para atender 933 mil domicílios e gerar cerca de 1.265 empregos. O aporte totalizou R\$ 1,47 bilhão, representando 72% do investimento total. No ano seguinte, a instituição lançou empreendimento semelhante para financiar a implantação de 11 usinas em seis estados e no Distrito Federal com capacidade para suprir o consumo de mais de 27 mil residências. Nesse

caso, o investimento da organização responde por 55% do valor total. Iniciativas que exemplificam esforços para ampliar a participação de renováveis na matriz energética brasileira, em paralelo com estratégias de proteção ambiental e desenvolvimento nacional. Assim, tais medidas convergem com a premissa do Estado empreendedor (Mazzucato, 2014) para estimular o avanço do setor, em termos de capacidade, geração total e de postos de trabalho (BNDES, 2021, 2022).

Políticas de apoio à indústria solar continuam em curso. O PADIS, Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (como células fotovoltaicas), instituído em 2007 e ampliado para o segmento fotovoltaico pelo Decreto nº 11.456/2023, fomenta a produção nacional de semicondutores e equipamentos solares por meio de isenções de IPI e PIS/COFINS (Brasil, 2007, 2023).

Por fim, o Convênio ICMS 101/97, com vigência prorrogada para 2028 concede a redução do ICMS sobre equipamentos importados em geral, contribuindo de forma indireta para redução dos custos de painéis e inversores e para o estímulo à adoção de sistemas fotovoltaicos (Brasil, 1997, 2017)

Entre 2024 e 2025, o PL 671/2024 vedou a atuação de distribuidoras ou subsidiárias no segmento de micro e minigeração distribuída a fim de evitar concentrações de mercado. Paralelamente, o cronograma de transição da Lei nº 14.300/2022 estabeleceu, para 2025, a cobrança de 45% do encargo Fio B para novas unidades consumidoras (Brasil, 2022, 2024).

No mesmo período, o PL 624/2023 — Programa de Renda Básica Energética (REBE) — avançou em tramitação no Congresso Nacional com foco na inclusão do consumidor de baixa renda na geração solar distribuída. O projeto sinaliza a reorientação da política energética brasileira com viés social em direção à geração descentralizada urbana e rural, com medidas para atenuar barreiras técnicas de acesso à rede (Brasil, 2023, 2024).

O programa Nova Indústria Brasil (NIB) de 2024, se assemelha às políticas japonesas de Tokyo e Kyoto apresentadas anteriormente, que, em consonância com a Lei 14.620/23 prevê a instalação de painéis solares nos empreendimentos do programa Minha Casa Minha Vida (MCMV). A Missão 3⁴ do NIB orienta investimentos em infraestrutura, saneamento, moradia

⁴ Infraestrutura, saneamento, moradia e mobilidade sustentáveis para a integração produtiva e o bem-estar nas cidades.

e mobilidade no país, e que vai de encontro à noção das políticas orientadas por missões de Mazzucato (2018) (Brasil, 2023, 2024).

Destarte, Nascimento (2017) aponta que a matriz energética brasileira é majoritariamente composta por fontes renováveis, característica que pode reduzir as exigências e o apoio político para incentivos mais pujantes para a energia elétrica sustentável. Nesse cenário, evidencia-se a necessidade de uma política industrial mais assertiva para o desenvolvimento da produção tecnológica interna, sobretudo considerando que o Brasil dispõe de reservas significativas de quartzo — matéria-prima para células de silício — sem capacidade produtiva para seu tratamento, o que configura um dos principais gargalos à redução de custos e à consolidação do setor fotovoltaico nacional (Elgamal; Demajorovic, 2020).

Nessa direção, o Plano Decenal de Expansão de Energia (2029) indica perspectivas expansionistas para a ampliação do setor em 1 GW por ano, com expectativa de investimentos massivos para geração e transmissão de energia. Ademais, o Plano aponta a necessidade de metodologias mais avançadas para o planejamento, integração e transmissão sistemas de armazenamento (Pereira; Rüther, 2021; Brasil, 2020, 2024).

Por fim, as projeções do Plano Nacional de Energia (2050) indicam que a energia fotovoltaica poderá alcançar entre 27 e 90 GW de capacidade instalada no país. Contudo, a concretização desse avanço depende da ampliação do financiamento acessível, da expansão das tecnologias de armazenamento, da integração tecnológica ao sistema elétrico e do fortalecimento das redes de transmissão, fatores essenciais para viabilizar a incorporação da fonte solar em larga escala (Brasil, 2020, 2024).

Em suma, o quadro abaixo sintetiza a trajetória do setor fotovoltaico brasileiro, cujos esforços iniciais — voltados à eletrificação rural — aproximam o país das experiências da China e da Índia, característica de países em desenvolvimento e de industrialização tardia (Mathews, 2020). A expansão do setor foi impulsionada pelo *boom* da geração distribuída, que fomentou o autoconsumo, a mini/microgeração e isenções fiscais, complementado por leilões que consolidaram a energia solar como fonte competitiva na matriz elétrica nacional. Instrumentos recentes como o Fio B, o REBE e o avanço do PL 624/2023 evidenciam uma reorientação da política energética em direção à dimensão social e à descentralização. A trajetória brasileira evidencia viabilidade de mecanismos como *net metering* em matrizes renováveis e a necessidade de políticas industriais orientadas à soberania tecnológica e à consolidação de uma cadeia produtiva doméstica para o setor fotovoltaico nacional.

Quadro 7- Principais Políticas Implementadas pelo Brasil

Período	Principais Políticas	Objetivos/Instrumentos	Impactos
1990-2000	PRODEEM	Levar energia elétrica a regiões isoladas fora do SIN por sistemas fotovoltaicos <i>off-grid</i> .	Mais de 7.500 sistemas instalados até 2002, mas baixo impacto industrial em razão da pouca manutenção e articulação.
2000-2005	Programa Luz para Todos; Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)	Ampliar acesso à eletricidade com alternativas e renováveis; Reduzir emissões de GEE, com a energia solar como alternativa complementar.	Uso de sistemas fotovoltaicos isolados (<i>off-grid</i>) em regiões remotas, expandindo o acesso à energia; Resultados limitados por falhas de governança e monitoramento.
2010-2015	REN 482; Política de Geração Distribuída (<i>Net Metering</i>); Convênio ICMS 16/2015; REN 687	Criação do Sistema de Compensação para geração distribuída; Isenção de ICMS; Fomento ao autoconsumo remoto e geração compartilhada.	Marco do mercado solar; Redução de <i>payback</i> e custo efetivo; Estímulo à adoção de sistemas solares; Expansão do mercado de GD.
2015 — 2020	PRONASOLAR; Consolidação dos leilões	Promover desenvolvimento do setor; Contratação de energia via leilões.	Efeitos limitados; Barreiras estruturais para ampliação setorial. Bilhões em contratos; Energia solar se consolida como fonte competitiva.
2020-2025	Renovação do PADIS; Introdução do “Fio B”	Incluir equipamentos solares no PADIS; Internalizar custos de uso da rede pela GD.	Isenção tributária para produção nacional de módulos e componentes; Redução de incentivos fomento ao autoconsumo remoto.
2023-2025	PL 624/2023 – Programa de Renda Básica Energética (REBE)	Incluir consumidores de renda na geração solar, priorizando instalações em edifícios para aproveitar infraestrutura e tecnologia.	Expansão da GD social; Redução de barreiras técnicas à conexão por distribuidoras e maior integração urbana de energia fotovoltaica (MCMV).

Fonte: Elaboração própria (2025), com base nas referências citadas no texto.

Em síntese, a análise comparativa das políticas industriais para energia solar fotovoltaica nos seis países analisados, sintetizada nos Quadros 1 a 7, revela trajetórias historicamente distintas, mas convergentes quanto à centralidade da intervenção estatal na transição para fontes renováveis. O pioneirismo regulatório alemão, materializado na EEG e

nas tarifas *feed-in*, a coordenação estatal de larga escala expressa nos Planos Quinquenais chineses e os instrumentos fiscais e protecionistas estadunidenses, como as medidas *antidumping* e o IRA, contribuíram para a redução dos custos de produção e a expansão da capacidade instalada em escala global. Em paralelo, modelos adaptados aos contextos locais, como os leilões competitivos na Índia e o *net metering* no Brasil, ampliaram o acesso à tecnologia fotovoltaica em economias em desenvolvimento, evidenciando que a eficácia dos instrumentos de política depende, em grande medida, de sua adequação às estruturas institucionais e às condições econômicas de cada país.

A despeito dos avanços registrados, emergem desafios estruturais comuns, como a concentração e dependência da cadeia de suprimentos em relação à indústria chinesa, a instabilidade regulatória exemplificada pelas reversões promovidas pelo *One Big Beautiful Budget Act* nos Estados Unidos, os gargalos de transmissão e armazenamento identificados no Japão, Alemanha e Brasil, a recorrente tensão entre a manutenção de subsídios e a conquista da paridade de mercado. Tais desafios evidenciam a necessidade de estratégias coordenadas que articulem pesquisa e desenvolvimento, proteção industrial, integração à rede elétrica e iniciativas de inclusão social e energética, como a eletrificação rural na China e Índia e a instalação de sistemas fotovoltaicos em programas habitacionais, experiências já em curso no Japão e no Brasil.

As trajetórias da Alemanha e da China ilustram o impacto da consistência e da continuidade regulatória sobre os resultados setoriais, em contraste com as volatilidades observadas em outros contextos. Em suma, este capítulo demonstra que políticas públicas robustas e adaptáveis são determinantes para a transformação das matrizes energéticas. Sob essa perspectiva, as experiências internacionais analisadas oferecem ao Brasil lições essenciais para fortalecer a manufatura local, estabilizar a estrutura de incentivos e consolidar a inovação como vetor de soberania tecnológica e industrial no setor fotovoltaico.

3.7 Aplicação da análise documental à literatura

A literatura apresentada no capítulo anterior inaugura a compreensão da vital importância das políticas industriais para o avanço da energia solar fotovoltaica. A estrutura regulatória estabelecida e adaptada ao longo dos anos para o desenvolvimento industrial, cerne de tais políticas, conforme a teoria de Andreoni e Chang (2019), se materializa no início da trajetória dos países analisados, especialmente nos Estados Unidos, China, Alemanha e Japão, cuja base institucional é mais robusta, sob a perspectiva de Rodrik (2013).

Os fundamentos de Rodrik (2013) para a efetividade das políticas industriais a partir do enraizamento, disciplina e transparência para prestação de contas, podem ser observados em alguns casos com diferentes perspectivas. A articulação entre Estado e setor produtivo manifesta-se de modo mais nítido nos casos em que a resposta à crise de 2008 envolveu intervenção direta e coordenada, a exemplo dos Estados Unidos e China. A crise teve efeitos diretos no setor fotovoltaico e de modo a atenuá-los e preservar a indústria, os países implementaram medidas como ITC, Seção 1603 e o *Golden Sun*, respectivamente. Tais medidas utilizaram instrumentos como subsídios e crédito direto para empresas do setor. Em contrapartida, a limitação de esforços e programas brasileiros como do PRODEEM e da PNMC, podem ser associadas à carência nacional não apenas pela interação entre o governo e as companhias, mas também pela configuração estrutural e pelo arcabouço administrativo.

A teoria de Aiginger e Rodrik (2020) destaca que políticas industriais não devem se limitar à eficiência econômica, mas também devem incorporar inclusão social, avanço de setores como agrícola habitacional, considerando as especificidades institucionais de cada país. Essa noção, em paralelo com as teorias do Estado empreendedor e das políticas orientadas por missões de Mazzucato (2014, 2019), refletem o caráter essencial do investimento público com viés social em áreas “economicamente inviáveis”. Nesse contexto, o PRODEEM, as iniciativas Luz no Campo e Luz para Todos, medidas para o MCMV e REBE no Brasil, além dos programas de eletrificação rural na China e Índia podem exemplificar a aplicação de tais estratégias.

A noção de Estado Empreendedor (Mazzucato, 2014) pode ser associada a outros planos, como as iniciativas de fomento à pesquisa e desenvolvimento no Japão, com as *Feed-in-Tariffs* após o acidente nuclear de Fukushima voltadas para a diversificação da matriz e transição energética. Essa situação também vai ao encontro da noção de esverdeamento, proposto por Mathews (2020), e o processo de industrialização verde, especialmente na China e Índia.

Em suma, a comparação entre os países evidencia que instrumentos similares como as tarifas *feed-in*, subsídios e leilões competitivos apresentaram resultados distintos conforme o arcabouço institucional em que foram inseridos. Essa assimetria remete aos pressupostos de Rodrik (2013), de que a efetividade da política industrial depende do enraizamento, da disciplina e da prestação de contas, condições que se manifestaram de forma distinta entre os casos analisados. A robustez institucional que sustentou a continuidade dos Planos Quinquenais ou das sucessivas EEGs contrasta com a fragmentação e a instabilidade regulatória observadas no Brasil e, em certos períodos, nos Estados Unidos, o que sugere que a capacidade estatal de

formular, implementar e sustentar políticas ao longo do tempo é variável explicativa tão relevante quanto os próprios instrumentos adotados.

A partir desse referencial, o capítulo seguinte examina em que medida os indicadores de capacidade instalada, comércio exterior e patentes confirmam as trajetórias delineadas pela análise documental, permitindo avaliar o grau em que cada país converteu suas estratégias de política industrial em desenvolvimento tecnológico efetivo.

4 ANÁLISE DO SETOR DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NOS PAÍSES SELECIONADOS POR MEIO DE INDICADORES DE COMÉRCIO EXTERIOR E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO

A partir do panorama evolutivo das políticas industriais implementadas pelos países selecionados construído no capítulo anterior, este capítulo examinará empiricamente a evolução do setor. Para isso, serão analisados diferentes indicadores distribuídos em 3 seções.

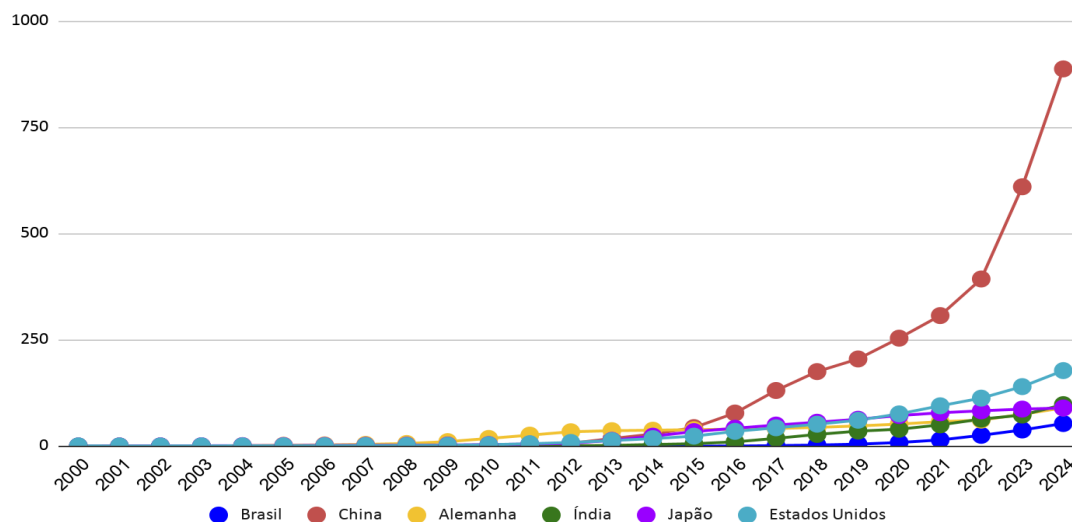
A primeira examina a evolução da capacidade instalada, da geração de energia e do emprego no setor, com vistas a avaliar em que medida as estratégias nacionais se refletiram sobre a expansão da tecnologia e o desenvolvimento da cadeia produtiva. A segunda seção se voltará para comércio exterior, a fim de verificar a expansão internacional da indústria fotovoltaica dos países em nível mundial. A terceira avalia o desenvolvimento tecnológico por meio de dados de patentes como *proxy* para inovação.

A comparação entre os países permite evidenciar padrões e caminhos diferentes, assim como avaliar a tendência das políticas industriais voltadas para o setor e sua influência sobre formação e fortalecimento de capacidades produtivas e tecnológicas em setores estratégicos.

Todavia, a dimensão da indústria chinesa — expressa em todos os indicadores analisados — pode mascarar a evolução dos demais países. Para contornar esse efeito, o Apêndice A apresenta os mesmos indicadores excluindo a China, de modo a tornar mais legível a trajetória dos demais países analisados.

4.1 Evolução da capacidade instalada e dos empregos

A expansão da energia solar fotovoltaica ao longo do período analisado não ocorreu de forma homogênea entre os países selecionados. Embora todos tenham registrado crescimento da capacidade instalada, as trajetórias diferem substancialmente em ritmo, escala e nas condições que as viabilizaram. Nesse contexto, os gráficos de 1 a 4 permitem observar essa dinâmica.

Gráfico 1- Capacidade Instalada em GW entre 2000 e 2024

Fonte: *Our World in Data*; IRENA, 2025; Elaboração própria, 2025.

O gráfico 1 evidencia que a expansão da capacidade instalada ocorreu após 2015, movimento que é resultado do planejamento de longo prazo na China a partir dos Planos Quinquenais e de medidas de incentivo constantes, como subsídios e programas sociais para garantir o acesso à energia elétrica em zonas rurais e remotas. Iniciativas como o *Energy Policy Act*, a *Solar America Initiative* e o ARRA representam um padrão similar nos Estados Unidos no que se refere à formação da base do setor.

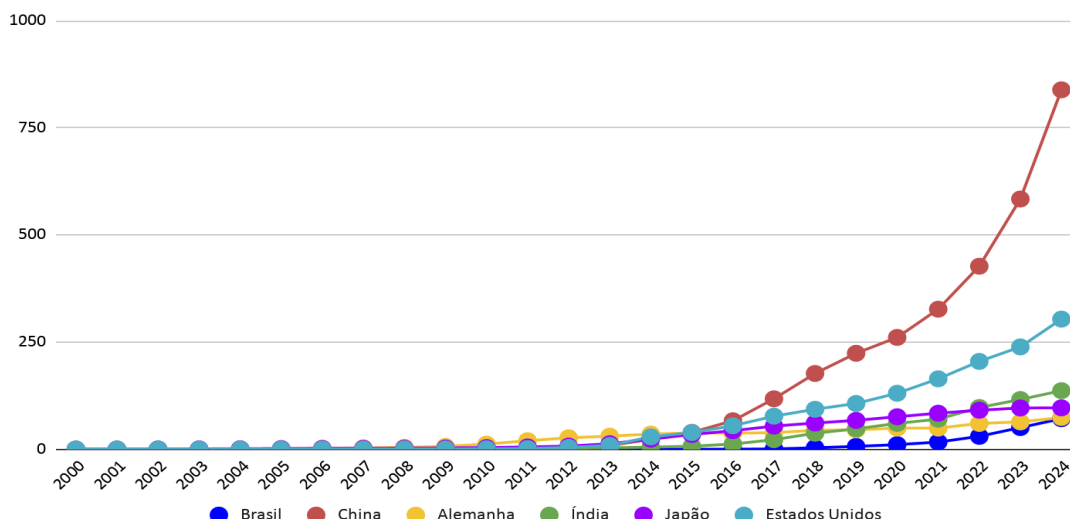
Diante da crise do *subprime*, a China e os Estados Unidos concederam assistência massiva com os programas *Golden Sun* e com as iniciativas do IRA, com objetivo de garantir a manutenção do setor e do emprego com incentivos financeiros e redução de custos.

A Alemanha, pioneira na indústria fotovoltaica com a criação da *Erneuerbare-Energien-Gesetz* e responsável pelo desenvolvimento das *Feed-in Tariffs*, consolidou seu mercado interno nos anos 2000. No entanto, o setor desacelerou após a adoção de uma postura um pouco mais restritiva, com redução paulatina do incentivo em meados de 2010. Nesse contexto, o país perdeu competitividade para a China em um cenário de expansão internacional do mercado chinês. Essa dinâmica sugere que a política alemã se concentrou principalmente no estímulo à demanda, sem esforços de mesma intensidade para a cadeia produtiva.

O avanço da indústria fotovoltaica japonês mantinha-se constante, fundamentado por iniciativas para expansão do uso residencial, além do programa *New Sunshine* e a imposição das FITs. Enquanto na Índia e no Brasil, a evolução do setor ainda se mostrava incipiente, emergindo com o apoio da *Jawaharlal Nehru National Solar Mission*, com as Resoluções

Normativas (REN) 482 e 687, iniciativas voltadas para o fomento a geração distribuída, em conjunto com as isenções de impostos (ICMS).

Gráfico 2 - Geração Anual em GWh entre 2000 e 2024



Fonte: *Our World in Data*; Ember, 2025; Elaboração própria, 2025.

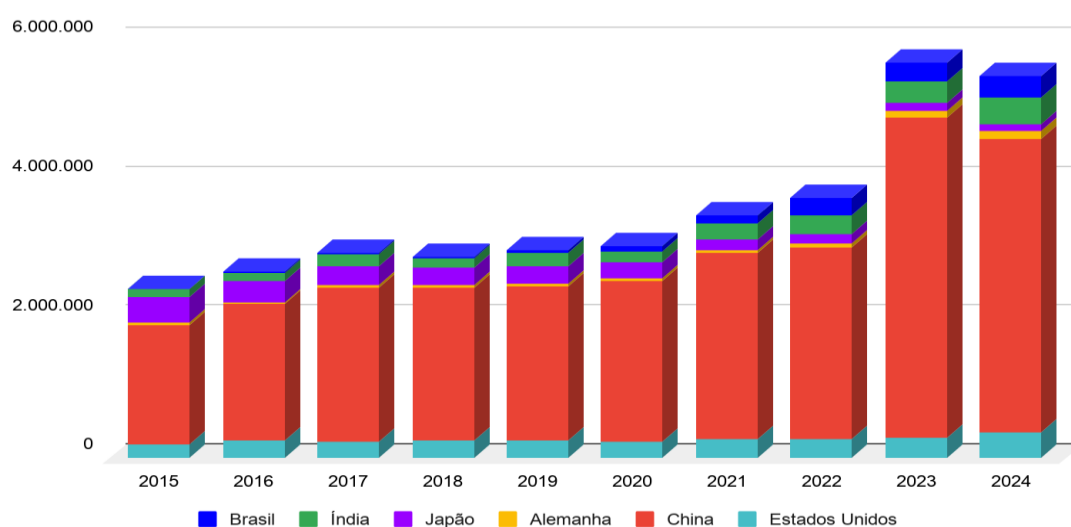
Como complemento, o gráfico 2 apresenta a geração anual (em GWh⁵) e possibilita uma análise conjunta com a capacidade instalada. Sob essa ótica, é possível observar a expansão da infraestrutura produtiva e o aumento da produção efetiva de eletricidade, relação que pode refletir o ritmo do investimento e difusão tecnológica para verificar o nível de utilização da capacidade.

A evolução da geração anual de energia segue o padrão verificado para a capacidade instalada. Todavia, sabe-se que ao longo da trajetória do setor, os países precisaram implementar medidas de *curtailment* (interrupção da geração) e *peak shaving* (ajustes de pico) frente aos entraves relacionados à conexão, transmissão e armazenamento que podem ser potencializados em um contexto de crescimento acelerado da capacidade instalada. Diante disso, as estratégias mais recentes a partir do 14º Plano Quinquenal na China e do *MiSpel* na Alemanha foram apresentadas com metas e mecanismos para desenvolvimento e ampliação da capacidade de armazenamento de energia.

⁵ GW (*gigawatt*) refere-se à potência, ou seja, à capacidade instantânea de geração. GWh (*gigawatt-hora*) refere-se à quantidade de energia ao longo do tempo, representando o volume efetivamente gerado ou consumido. Este gráfico está em GWh pois apresenta o total de energia gerada no período analisado. Embora a geração seja comumente apresentada em TWh (*terawatt-hora*), optou-se por utilizar GWh para padronização dos dados. Para isso, a base foi convertida de TWh para GWh (1 TWh = 1.000 GWh), sem alteração da escala relativa dos valores.

Em síntese, a capacidade instalada permite observar o volume de investimentos em plantas e sistemas fotovoltaicos, ilustrando o esforço das políticas industriais implementadas. A análise conjunta com a geração de energia, por sua vez, revela o grau de utilização da tecnologia instalada. Em última instância, o emprego no setor permite a leitura da expansão da cadeia produtiva a partir do mercado de trabalho.

Gráfico 3 - Emprego no Setor Fotovoltaico entre 2015 e 2024



Fonte: IRENA, 2015, 2025; Elaboração própria, 2025.

A análise do emprego no setor fotovoltaico, apresentada nos Gráficos 3 e 4, acrescenta uma dimensão estrutural à comparação ao permitir estimar a expansão do setor com base na ampliação da cadeia produtiva. Ademais, cabe ressaltar que os países diferem entre si quanto ao nível de especialização, uma vez que a cadeia produtiva abrange desde a produção de polisilício e células até a instalação e manutenção de sistemas, o que é apresentado no Apêndice B.

Os relatórios *Renewable Energy and Jobs* da IRENA, lançados a partir da década de 2010, chamam atenção para a baixa disponibilidade de dados para o mercado de trabalho na indústria de energia renovável como um todo. Nesse contexto, a agência apresenta estimativas anuais do número de empregos por fonte de energia. Contudo, para amostra de países selecionados, as informações disponíveis se consolidam a partir de 2015 (IRENA, 2012, 2015).

Em 2015, a China concentrava 1,7 milhão dos aproximadamente 2,8 milhões de empregos globais no setor, participação que não reflete apenas a escala produtiva, mas também o nível de verticalização da cadeia. Os Estados Unidos e o Japão somavam, respectivamente,

cerca de 370 mil e 190 mil postos de trabalho, enquanto a Índia, Alemanha e Brasil apresentavam participações menores, próxima à 100, 40 e 10 mil (IRENA, 2016, 2017).

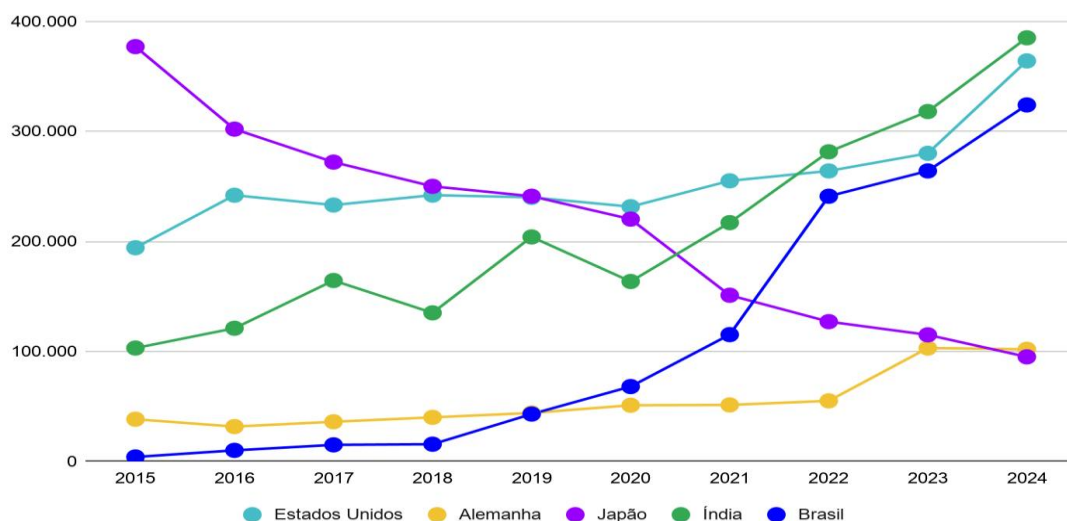
De acordo com as estimativas da Agência, o arcabouço de medidas protecionistas implementadas pelos Estados Unidos e Europa contra a expansão chinesa levaram a uma mudança na trajetória do mercado de trabalho em direção ao sudeste asiático. Dinâmica que pode ser comprovada através da expansão das tarifas para países como Tailândia, Malásia e Vietnam. Contudo, tais medidas aumentaram os custos de produção e implementação, o que levou a retração do mercado de trabalho dos Estados Unidos (IRENA, 2016, 2017).

Ademais, com o desenvolvimento de políticas para geração distribuída, *net metering* e isenções fiscais, o Brasil experimentou um crescimento expressivo, ultrapassando a marca de 60.000 empregos em 2020 e 300.000 em 2024. Avanço que aproximou os números do país aos números do mercado indiano, que foram significativamente superiores aos brasileiros entre 2015 e meados de 2020. Entretanto, tal expansão concentra-se nos segmentos de instalação e manutenção dos módulos, mais intensivos em mão de obra, porém com menor valor agregado e baixa intensidade tecnológica. Tendência que se reflete na balança comercial nacional, apresentada na seção seguinte (IRENA, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025).

Tangente à isso, pode-se inferir que a ausência de uma estrutura industrial doméstica robusta limita o potencial de geração de emprego qualificado e de aprendizado tecnológico, o que configura a base para o desenvolvimento da indústria e foi essencial para o avanço do setor em outros países. A expansão alemã, assim como dos Estados Unidos e mais recentemente da Índia, com estímulo à produção nacional com vistas à substituição de importações, se apresentou mais gradual ao longo do recorte temporal analisado.

Iniciativas como o IRA nos Estados Unidos, a JNNSM na Índia e as EEGs alemãs foram determinantes para o desenvolvimento do setor e ampliação dos postos de trabalho, assim como os planos chineses para o desenvolvimento de longo prazo. Além das medidas *antidumping* indianas, a partir de 2022 com o lançamento da PLI e ALLM, foram adotadas estratégias para manutenção da produção interna e desenvolvimento tecnológico a partir de medidas de fomento ao conteúdo local.

Por fim, o gráfico 4 apresenta a trajetória do nível de emprego, com exceção da China, para melhor visualização.

Gráfico 4 - Evolução do Nível de Emprego entre 2000 e 2024 com exceção da China

Fonte: IRENA, 2015, 2025; Elaboração própria, 2025.

Em síntese, é possível evidenciar a importância das políticas para o desenvolvimento da cadeia produtiva interna, expansão da indústria e difusão tecnológica por meio de incentivos, subsídios e programas sociais de eletrificação rural e urbana, como na China, Índia e Brasil.

4.2 Comércio exterior e expansão internacional

O padrão de inserção de cada país nos fluxos de comércio exterior de equipamentos e produtos fotovoltaicos pode ser analisado como *proxy* para expansão internacional, o que possibilita avaliar o perfil exportador ou importador de cada economia e, por conseguinte, o grau de desenvolvimento da cadeia produtiva doméstica. Essa dimensão complementa a análise da capacidade instalada, da geração e do emprego apresentada na seção anterior, ampliando as inferências sobre o avanço industrial de cada país ao longo do período analisado.

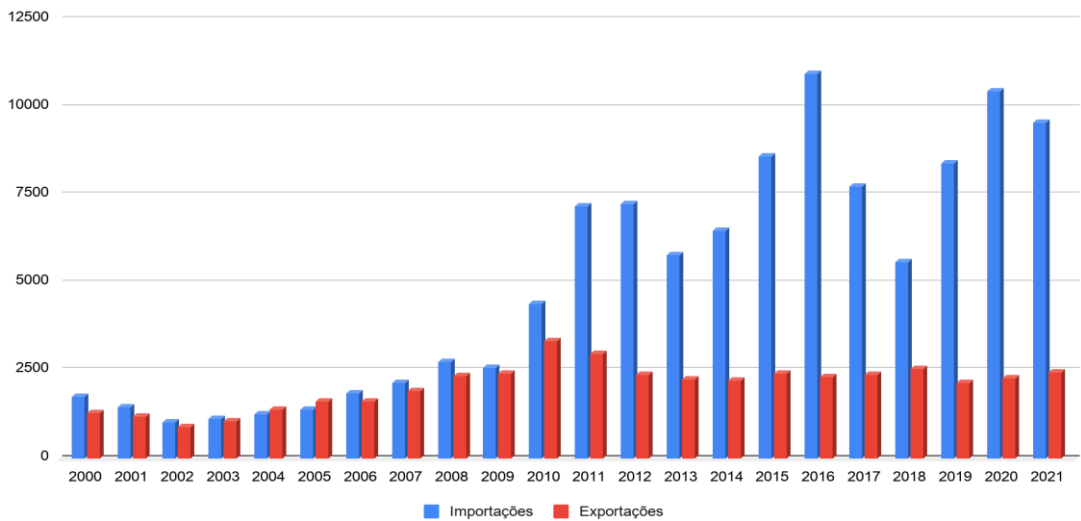
A análise da balança comercial — com ênfase nas importações e exportações de equipamentos destinados à geração solar fotovoltaica, conforme apresentado no quadro 8, — abrange o período de 2000 a 2021, limite imposto pela disponibilidade dos dados da COMTRADE, e permite distinguir economias exportadoras líquidas daquelas predominantemente importadoras, à luz das políticas previamente apresentadas.

Quadro 8 - Apresentação da base de dados COMTRADE

Código HS	Descrição
85	Máquinas, equipamentos e materiais elétricos e suas peças; aparelhos de gravação ou reprodução de imagem e de som e televisão, e suas partes e acessórios.
8541	Dispositivos de semicondutores; dispositivos eletrônicos de circuitos integrados.
854140	Dispositivos de semicondutores fotossensíveis, incluindo células fotovoltaicas, mesmo montadas em módulos ou painéis; diodos emissores de luz (LEDs).

Fonte: COMTRADE, 2025. Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 5 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Estadunidense entre 2000 e 2021



Fonte: COMTRADE. Elaboração Própria, 2025.

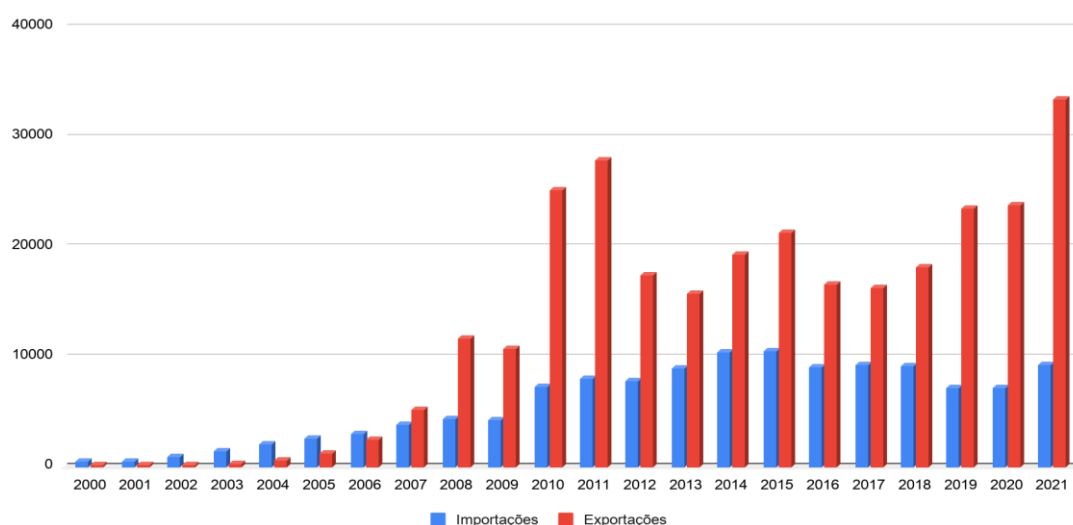
O Gráfico 5, referente aos Estados Unidos, apresenta uma assimetria estrutural e persistente entre importações e exportações desde o início dos anos 2000. Essa desproporção reflete uma estratégia historicamente orientada para a criação de demanda interna por meio de estratégias como o *Investment Tax Credit* (ITC), sem iniciativas de mesma magnitude para fortalecer a manufatura doméstica, dinâmica que contribui para manutenção da dependência externa do mercado estadunidense, atrelada ao avanço do mercado chinês com custos reduzidos.

Medidas como o *American Recovery and Reinvestment Act* e a Seção 1603 foram implementadas para estimular a indústria doméstica e a cadeia produtiva nacional no contexto da crise de 2008. A estratégia direcionada para manutenção do emprego e do investimento no setor representa uma conduta protecionista em consonância com a teoria do Estado

Empreendedor de Mazzucato (2014) ao atuar ativamente para garantir a segurança da indústria em um cenário de incerteza e retração econômica.

Neste viés, a reorientação estratégica iniciada com as medidas *antidumping* de 2012 e aprofundada pelo IRA de 2022 — que vincula créditos fiscais à produção doméstica via créditos 45Y e 48C — representa uma tentativa de mitigar a vulnerabilidade da cadeia de suprimentos dependência, ainda que seus efeitos sobre o comércio exterior se tornem verificáveis apenas no período posterior ao recorte analisado (Caravella *et al.*, 2023).

Gráfico 6 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Chinesa entre 2000 e 2021



Fonte: COMTRADE. Elaboração Própria, 2025.

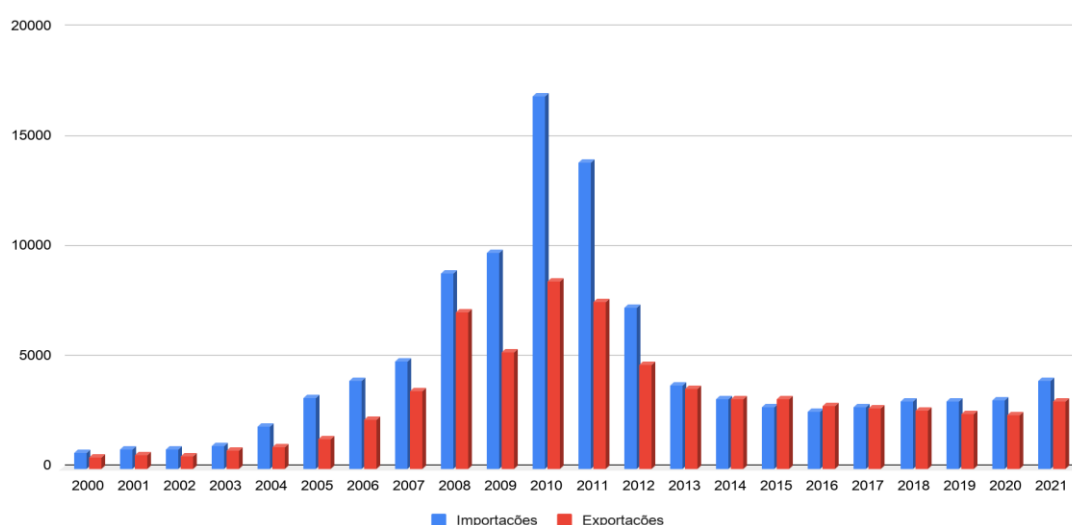
O Gráfico 6 apresenta a trajetória oposta e confirma a singularidade do caso chinês. A rápida expansão das exportações a partir de 2009 coincide com o lançamento do programa *Golden Sun* e com a consolidação das FITs, mecanismos que configuram estratégias de apoio à indústria a longo prazo e em larga escala sustentadas pelos Planos Quinquenais e políticas complementares. Tal conjuntura possibilitou a formação das vantagens comparativas nacionais e a ascensão da hegemonia chinesa no setor (Zhu *et al.*, 2021).

Nesse contexto, o modelo chinês pode ilustrar o argumento de Andreoni e Chang (2019) de que políticas industriais ativas são capazes de impulsionar mudanças estruturais e transformar vantagens comparativas a nível internacional, mediante o desenvolvimento de capacidades dinâmicas sustentadas pela atuação coordenada do Estado empreendedor (Mazzucato, 2014, 2019). A trajetória apresentada ao longo deste capítulo – em termos de capacidade instalada, inserção comercial e dinamismo do desenvolvimento de patentes —

reflete a convergência entre os pressupostos teóricos e os instrumentos de política industrial mobilizados pelo país ao longo do período analisado.

Períodos de retração das exportações como 2012 e 2013 se justificam pelas políticas *antidumping* aplicadas pelos Estados Unidos e Europa. Nesse contexto, além da apreciação dos custos, a redução das exportações pode ser explicada pela reorientação da produção para outros países asiáticos, que mais tarde receberam as mesmas medidas.

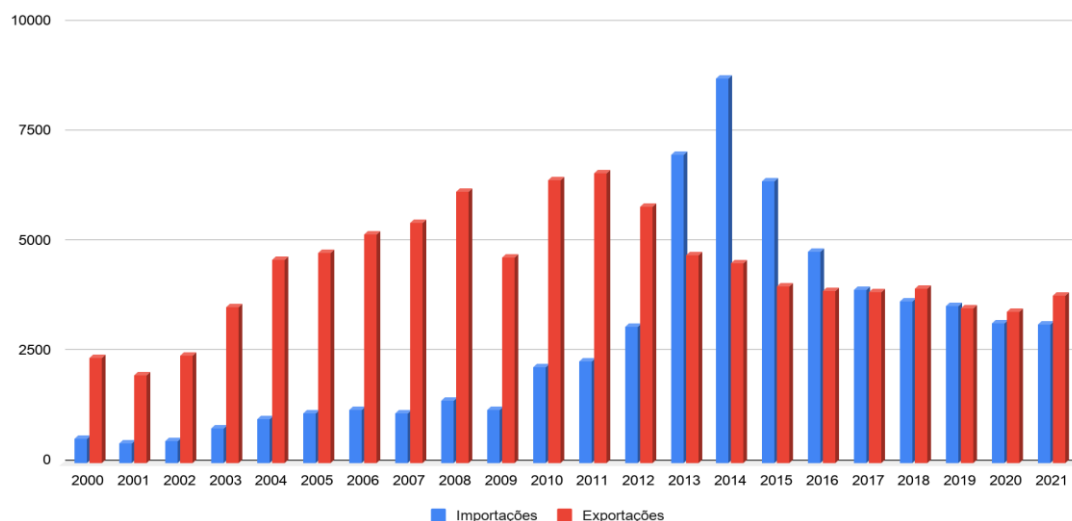
Gráfico 7 -Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Alemã entre 2000 e 2021



Fonte: COMTRADE. Elaboração Própria, 2025.

O Gráfico 7 documenta a trajetória alemã de declínio relativo após 2010, que ilustra os limites de uma política de estímulo à demanda sem articulação suficiente com instrumentos de competitividade industrial. A EEG 2000 incentivou o setor e consolidou um mercado doméstico robusto, entretanto, essa trajetória foi interrompida pela ascensão chinesa (Quitow, 2013.)

Assim como apresentado na seção anterior, pode-se refletir a trajetória constante da expansão da capacidade, geração e emprego no setor, sobre a dinâmica da balança comercial. A indústria fotovoltaica alemã desacelerou após 2010, porém, a cadeia produtiva manteve-se intensiva em tecnologia e inovação. Os esforços mais recentes estão orientados para o desenvolvimento do sistema de armazenamento com estratégias como o *MiSpel*.

Gráfico 8 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Japonesa entre 2000 e 2021

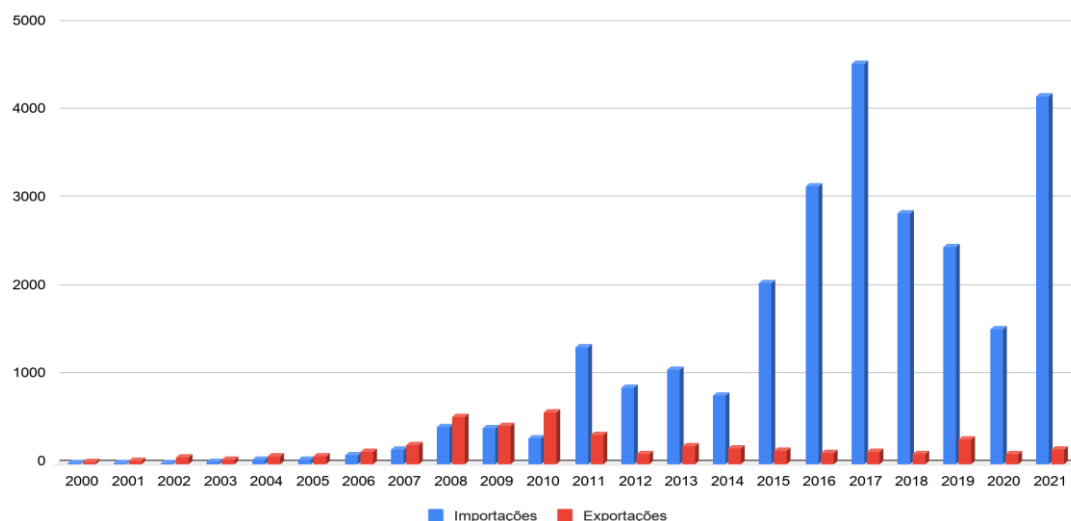
Fonte: COMTRADE. Elaboração Própria, 2025.

O Gráfico 8 apresenta o caso japonês, marcado por pelo acidente de Fukushima em 2011. Até meados de 2010, o setor fotovoltaico japonês apresentava uma dinâmica de expansão equilibrada e significativamente exportadora.

A partir de 2012, verifica-se um aumento expressivo das importações japonesas, movimento associado ao acidente nuclear de Fukushima e aos esforços subsequentes para reduzir a dependência da energia nuclear e ampliar a participação de fontes renováveis na matriz energética. A implementação do sistema FIT com garantia de preços fixos no mesmo período, expandiu rapidamente a demanda doméstica, em ritmo superior à capacidade de resposta da indústria local, o que explica o crescimento das importações como reflexo das limitações estruturais da cadeia produtiva frente à velocidade da expansão do mercado.

Para garantir a segurança energética diante da expansão do consumo, usinas nucleares previamente desativadas foram reativadas progressivamente. Em paralelo, políticas locais que determinam a instalação obrigatória de painéis solares em novas construções em Kyoto e Tokyo, sustentam a demanda interna e reforçam o compromisso do país com a diversificação da matriz energética. Ainda assim, a indústria solar japonesa enfrenta desafios crescentes, dada a predominância chinesa impulsionada pela produção em larga escala e pelas limitações espaciais que restringem a expansão de plantas geradoras de grande porte no país.

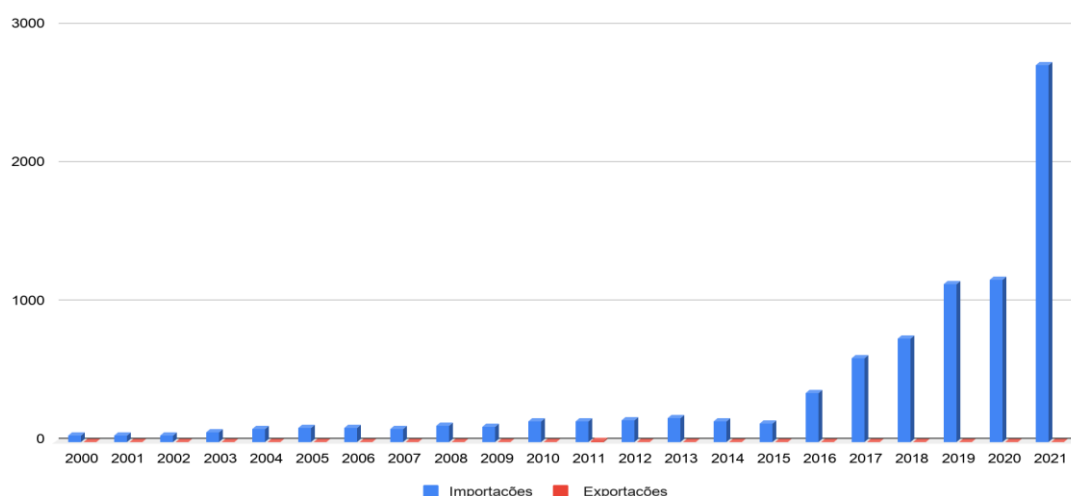
Gráfico 9 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Indiana entre 2000 e 2021



Fonte: COMTRADE. Elaboração Própria, 2025.

O gráfico 9 reflete o crescimento acelerado do mercado indiano, em consonância com a análise da expansão do setor e do emprego, entretanto com a balança comercial deficitária. O aumento expressivo é resultado de estratégias como a Missão Solar *Jawaharlal Nehru* de 2010, bem-sucedida para a expansão da demanda, mas sem incentivo significativo para o desenvolvimento da cadeia produtiva. Entretanto, desde meados de 2019, o país tenta reverter a situação com políticas protecionistas *antidumping* e de conteúdo local, como a *Production Linked Incentives* e a *Approved List of Models and Manufacturers* para estimular a produção local, com vistas à substituição de importações (Sandor, 2017).

Gráfico 10 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Brasileira entre 2000 e 2021



Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

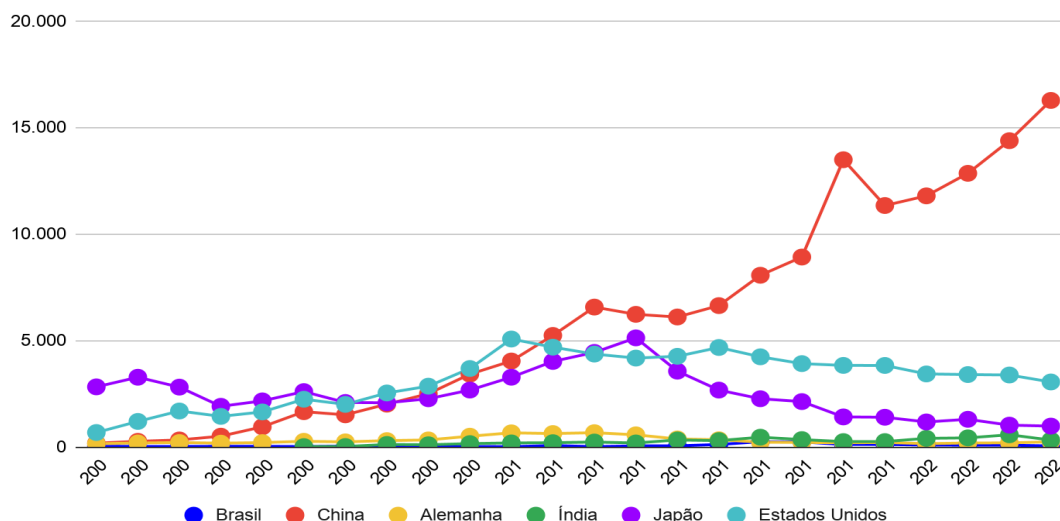
No Brasil, conforme mostra o gráfico 10, a trajetória ascendente do nível de importações após 2014 pode ser explicada principalmente pela Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL, que viabilizou o investimento em energia solar para o consumidor final e causou um *boom* de instalações de sistemas fotovoltaicos no país, porém, fortemente dependente de importações. Assim como na Índia, o Brasil não implementou estratégia semelhante para a construção da cadeia de produção doméstica, mesmo respondendo por reversas significativas de quartzo, elemento fundamental para a produção dos painéis (Melin; Camioto, 2019).

A ausência de articulação entre política industrial e política energética perpetua a dependência de importações de componentes de alto custo, o que limita o desenvolvimento da indústria de transformação doméstica e mantém o país em posição de vulnerabilidade no mercado global, comprometendo a construção de uma cadeia de valor sólida com menor dependência externa (Ottonelli *et al.*, 2021).

Em síntese, a análise conjunta da balança comercial, capacidade instalada, geração total e do avanço do emprego permite identificar trajetórias distintas entre os países analisados. Embora não se possa estabelecer relações de causalidade a partir da análise qualitativa e dos dados apresentados, verifica-se que economias em que a política industrial articulou estímulos à demanda (*demand pull*) com apoio direto à produção e à inovação (*technology push*), como a chinesa e a alemã, experimentam cadeias de valor mais sólidas. Em contrapartida, países cuja estratégia se concentrou predominantemente na criação de demanda, como o Brasil e a Índia, expandiram sua capacidade instalada, mas sem construir base produtiva doméstica correspondente.

4.3 A relação entre políticas industriais e dinâmica de patentes fotovoltaicas

A análise baseada em patentes como *proxy* para inovação completa o quadro empírico do capítulo ao introduzir a dimensão do esforço inovativo na trajetória das políticas industriais implementadas pelos países analisados. Uma vez que a capacidade instalada indica a escala da difusão e o perfil da balança comercial aponta o desenvolvimento da cadeia de valor, os dados de patentes capturam a capacidade dos países de transformar o crescimento do setor em expansão tecnológica.

Gráfico 11 - Total de Depósitos de Patentes entre 2000 e 2024

Fonte: WIPO, 2025. Elaboração Própria, 2026.

Entre 2000 e 2024, a evolução dos depósitos de patentes reflete os diferentes modelos de política industrial adotados por cada país. No caso chinês, a ascensão acelerada a partir da segunda metade dos anos 2000 está associada à estratégia de internalização tecnológica sustentada por políticas de desenvolvimento de longo prazo, subsídios e incentivos à produção em larga escala. Essa abordagem possibilitou o aumento participação do país na fabricação global de células fotovoltaicas de menos de 1% no início dos anos 2000 para uma posição de dominância, alcançando 60% da produção mundial em 2013 (Lacasa; Shubbak, 2018).

Os Planos Quinquenais combinados com os planos *Golden Sun*, Programa 863 e a introdução das FITs, sustentam o crescimento dos depósitos dos de patentes após 2010, consolidando a participação chinesa em aproximadamente 50% do total. A política industrial do país estimulou a difusão da energia solar e utilizou o setor como vetor de desenvolvimento e aprendizado tecnológico. A partir da instituição da Lei de Energia Renovável em 2005, articulada com os objetivos do Plano Quinquenal, pode-se verificar a trajetória de expansão das patentes chinesas apresentada nos gráficos 11 e 12 (Casemiro; Carmo, 2024).

O padrão apresentado pelos Estados Unidos é diferente. O crescimento das patentes ocorre de forma mais gradual, associado a incentivos indiretos como créditos fiscais e apoio à P&D, a exemplo da *SunShot Initiative* de 2011, posteriormente complementado por políticas protecionistas pelo IRA e pela atuação descentralizada dos estados. Estratégias contínuas como o ITC e os créditos 45Y e 48C sustentaram o avanço tecnológico constante no país. Modelo que incentiva o desenvolvimento tecnológico, mas não se reflete na expansão em escala, o que

distingue a trajetória estadunidense da chinesa, mesmo quando os volumes absolutos de patentes são comparáveis em determinados períodos (Caravella *et al.*, 2023).

No caso da Alemanha, verifica-se um movimento regular até meados de 2010, seguido pela expansão do volume de patentes até 2013, o que se justifica pelas EEGs 2004 e 2009, articuladas à *Innovation Alliance PV* (2010) com investimentos público-privados em toda cadeia produtiva nacional.

Após 2013, a perda de competitividade da indústria fotovoltaica contribuiu para a desaceleração do crescimento dos depósitos de patentes. Contudo, a base técnica e industrial consolidada sustentou esforços inovativos contínuos, que podem ser evidenciados por registros como a patente DE102022128223B4⁶ para módulos solares.

O Japão constitui caso singular, entre 2000 e 2002, cerca de 65% do total de patentes publicadas pelo grupo dos países analisados eram japonesas, evidência de que a base tecnológica acumulada por meio de iniciativas como o *Field Test Program for PV generation*, *Monitoring PV Power Generation for House*, *Sunshine* e *New Sunshine* compôs a base para o desenvolvimento do setor, em termos de desenvolvimento tecnológico e inovação. Tal dinâmica que também pode ser verificada a partir das análises da expansão produtiva no que se refere à capacidade e emprego, ao perfil exportador até meados de 2010 e a partir da estrutura de mercado, no qual empresas japonesas chegaram a dominar cerca de 50% do mercado fotovoltaico global.

A desaceleração do setor fotovoltaico japonês após 2013, ilustrada pela retração do mercado de trabalho, da atividade exportadora e, mais recentemente, do desenvolvimento tecnológico, deriva não só da ascensão chinesa, mas também nos limites estruturais locais. A dinâmica evolutiva até o ápice da indústria, seguido pela contração é importante para interpretar o contexto japonês, porém, observa-se que o volume dos depósitos de patentes mantém-se em um patamar constante e regular.

Nesse contexto, o Japão preserva sua orientação inovativa intensiva em desenvolvimento tecnológico, como os painéis flexíveis de perovskita para atender às limitações espaciais do país, a exemplo da patente JP2023067523A⁷ para células desse material.

O Brasil e a Índia apresentam uma trajetória semelhante no que tange à densidade do número de depósitos entre 2010 e 2015, no contexto de expansão da GD no Brasil, com incentivo ao autoconsumo e *net metering* e com os esforços para expansão da capacidade

⁶ WEBER, Julian. *Solar cell module and method for producing a solar cell module*. DE102022128223A1. 2022.

⁷ TOKUTA, Rie; TAKAHAMA, Takeshi. *Perovskite solar cell*. JP2023067523A. 2021.

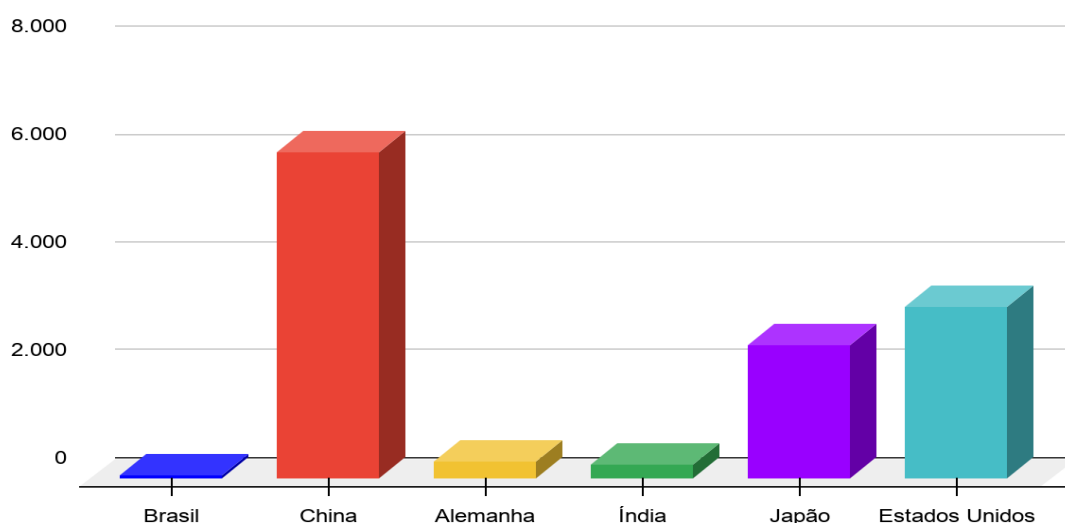
fotovoltaica na Índia com a JNNSM. O incipiente desenvolvimento do setor em ambos os países seguiu caminhos diferentes ao final da década de 2010.

O *boom* da geração distribuída no Brasil, associado às isenções fiscais aqueceu o setor, que expandiu rapidamente e aumentou a demanda pela tecnologia. Nesse contexto, é notório o aumento significativo dos postos de trabalho no setor a partir de 2020. Esse movimento não foi direcionado para expansão da indústria nacional, que, apesar do intrínseco potencial brasileiro, se concentrou no eixo *downstream* da cadeia de valor, ao passo que a estrutura *upstream* manteve-se dependente de importações.

A Índia, por sua vez, reorientou sua estratégia para proteção da indústria nacional ao implementar medidas protecionistas de tarifas sobre módulos e componentes chineses, e posteriormente, com estratégias de conteúdo local e de incentivo à produção doméstica intensiva em tecnologia, como a ALLM e PLI.

Nesse contexto, a trajetória expansiva dos depósitos de patentes indianas frente à retração brasileira pode indicar que políticas focadas principalmente na difusão da tecnologia, sem articulação com estratégias de inovação, podem ampliar a capacidade instalada, porém não conseguem estabelecer capacidades tecnológicas necessárias para o desenvolvimento inovativo industrial. Em resumo, os dados de patentes refletem a capacidade da energia solar de se converter em vetor de inovação quando integrada a uma política industrial ativa, e não apenas a políticas energéticas de curto prazo (Rocha *et al.*, 2023; Caravella *et al.*, 2023).

Gráfico 12 - Média Anual de Publicação de Patentes País entre 2000 e 2024



Fonte: WIPO, 2025. Elaboração Própria, 2026.

O gráfico 12, em paralelo com a síntese dos resultados apresentada no quadro 9, ilustra uma dicotomia estrutural entre expansão da capacidade instalada e inovação tecnológica, o que explica as distintas trajetórias nacionais. O Brasil pode exemplificar um modelo de “*greening by diffusion*” baseado na ampliação do uso da tecnologia fotovoltaica, porém por mais que esteja entre os maiores mercados do mundo, responde por apenas 0,1% dos depósitos de patentes do grupo analisado.

Em contrapartida, a China concentra cerca de 50% das patentes e aproximadamente 95% da manufatura do setor. Esse desempenho é resultado de políticas industriais integradas e com semelhanças àquelas orientadas por missões, combinando instrumentos como as FITs, planejamento de longo prazo e exigências produtivas, o que fornece evidência empírica da tese de Mazzucato sobre o papel do Estado empreendedor. Em contraste, Estados Unidos e Japão apresentam momentos de ampliação do volume dos depósitos, seguidos pela perda de dinamismo tecnológico. A emergente trajetória indiana, por sua vez, pode ser reflexo de políticas de expansão e de conteúdo local, como a PLI, o que sugere uma trajetória promissora, ainda que limitada aos segmentos *upstream* da cadeia.

Quadro 9 - Média do Total de Depósitos de Patentes a cada 5 anos (2000 - 2023)

País	2000-2004	2005-2009	2010-2014	2015 - 2019	2020-2023	Média Acumulada
Brasil	33	29	43	169	80	70
China	448	2.220	5.634	9.685	13.817	6.050
Alemanha	190	330	585	239	197	313
Índia	0	86	231	324	435	260
Japão	2.597	2.341	4.083	1.976	1.122	2.478
Estados Unidos	1.332	2.664	4.509	4.095	3.316	3.178

Fonte: WIPO, 2025. Elaboração Própria; 2026.

A análise histórica do número de pedidos de patentes depositados reforça a percepção positiva da combinação entre uma política industrial integrada e o desempenho inovativo. A China apresentou crescimento exponencial, trajetória sustentada pela estratégia de desenvolvimento do setor incorporado ao desenvolvimento econômico do país, guiada especialmente pelos Planos Quinquenais (Lacasa, Shubbak; 2018; Zhang *et al.*, 2018).

No Brasil, observa-se um pico modesto de cerca de 169 pedidos entre 2015 e 2019, período associado ao *boom* da geração distribuída após a REN 482. Entretanto, a redução posterior reflete os limites de um modelo baseado em regulação e demanda, sem articulação

com políticas de P&D e produção industrial. Em contrapartida, os Estados Unidos apresentam um padrão linear, em consonância com os ciclos de incentivos como o ITC e o IRA.

Quadro 10 - Pico de Publicações de Patentes entre 2000 e 2023

País	Pico	Ano
Brasil	246	2016
China	16.264	2023
Alemanha	673	2012
Índia	575	2022
Japão	5.122	2013
Estados Unidos	5.068	2010

Fonte: WIPO, 2025. Elaboração Própria, 2026.

Por último, o quadro 10 apresenta o período em que cada país atingiu o pico de registro de patentes para energia solar fotovoltaica e permite verificar a convergência desse dado com as estratégias adotadas por alguns países. O modesto pico das publicações brasileiras ocorre no contexto da expansão da GD, marco da ampliação do setor. A Índia reflete os esforços para o desenvolvimento técnico e para a expansão da cadeia produtiva doméstica em meados de 2020 por meio de incentivos vinculados à produção (PLI) e da supracitada *Approved List of Models and Manufacturers*.

A posição chinesa de trajetória crescente ilustra a trajetória desenvolvimentista baseada nos programas implementados ao longo de todo o período analisado, enquanto o Japão segue a mesma direção até o ponto máximo em 2013, antes da retração do setor. Por outro lado, os Estados Unidos e a Alemanha apresentam caminhos semelhantes, marcados pela atuação da SAI e do ARRA estadunidenses e pelas EEGs e *Innovation Alliance PV* alemãs.

A análise conjunta dos três eixos empíricos evidencia que o desempenho distinto entre os países reflete a coerência entre os instrumentos de política industrial adotados. Países que articularam estímulos à demanda com apoio direto à produção e à inovação consolidaram capacidades que transcendem a mera difusão tecnológica. O setor fotovoltaico emerge, assim, não apenas como vetor de transição energética, mas como dimensão estratégica da competição industrial internacional. Em síntese, os dados analisados sugerem que a posição de cada país nesse cenário é fruto dos esforços das políticas industriais que a antecederam.

4.4 Uma breve síntese comparativa acerca da análise apresentada

O estudo realizado foi capaz de verificar que distintas estratégias foram implementadas pelos países ao longo do período analisado a fim de desenvolver o setor, algumas com foco na expansão da tecnologia via ampliação da demanda, outras através de inovação tecnológica, outras por meio de medidas protecionistas ou ainda a partir de iniciativas fiscais com foco no consumidor. Nesse contexto, o quadro abaixo sintetiza as principais características e estratégias adotadas pelos países analisados para o avanço do setor fotovoltaico nacional.

Quadro 11 - Síntese comparativa dos países analisados

Estados Unidos	Fundamentado em incentivos fiscais e proteção nacional recente (IRA);	• Dependente de importações; • Ampliação da demanda sem expansão produtiva proporcional; • Número de patentes regular/em queda.
China	Integração de políticas <i>demand-pull</i> e <i>technology-push</i> ;	• Exportadora dominante; • <i>Greening by diffusion</i> → <i>Greening by innovation</i>; • Responde por mais de 50% do total de patentes depositadas pelo grupo.
Alemanha	Precursora no setor e com políticas robustas fundamentadas nas FITs.	• Balança comercial em declínio após 2010; • Base técnica/inovativa consolidada; • Número de patentes constante;
Japão	Intensivo em P&D → <i>Boom Pós-Fukushima</i> (FIT) seguido de retração.	• Perfil exportador → perfil importador; • Inovação voltada para atender necessidades estruturais; • Número de patentes constante;
Índia	Ampliação setorial, com proteção e estímulo à inovação; Fomento à demanda, porém sem expansão produtiva de mesma magnitude.	• Balança comercial deficitária, porém, com possível reversão aparente; • Perfil de ampliação com tendência ao progresso técnico; • Leve aumento no número de depósitos de patentes.
Brasil	Difusão tecnológica via GD e leilões. Ampliação da demanda sem expansão produtiva na mesma proporção.	• Estruturalmente importador; • Perfil <i>Greening by Diffusion</i>; • Baixa posição no número de patentes.

Fonte: Elaboração própria (2026).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises comparativas realizadas à luz das trajetórias das políticas industriais voltadas para o setor de energia solar adotadas pelos Estados Unidos, China, Alemanha, Japão, Índia e Brasil indicam que essas estratégias não só promoveram, mas sustentaram a expansão da indústria fotovoltaica entre 2000 e 2024. O estudo mostra ainda que a efetividade de tais estratégias depende não só da magnitude dos instrumentos aplicados, mas requer coerência e articulação desses mecanismos a longo prazo.

A pesquisa foi desenvolvida a partir da coordenação entre o panorama histórico das políticas industriais implementadas, construído a partir de uma revisão documental e bibliográfica e da análise de indicadores de capacidade instalada, geração, emprego, comércio exterior e patentes face à revisão da literatura. Esse esforço evidenciou que trajetórias aparentemente similares em termos de instrumentos – tarifas *feed-in*, créditos fiscais, leilões competitivos, sistemas de *net metering* e subsídios à P&D – apresentaram resultados assimétricos em termos de encadeamentos produtivos e desenvolvimento tecnológico.

A investigação empírica dialoga com o arcabouço neoschumpeteriano no que tange à premissa de que o processo inovativo depende da relação entre o Estado, o setor privado e a sociedade e com a literatura recente de políticas industriais verdes apresentada no Capítulo 2. As experiências chinesa e alemã ilustram a tese de Andreoni e Chang (2019) de que “pacotes” de políticas voltadas para produção, comércio, tecnologia e meio ambiente são capazes de redefinir vantagens comparativas, sustentados por instituições que promovem a formação de *dynamic capabilities*, o que se verifica por meio dos Planos Quinquenais e das EEGs (Mazzucato *et al.*, 2019).

À luz da teoria de Rodrik (2013), o que difere as trajetórias bem-sucedidas não é apenas o volume ou o modelo de instrumento adotado, mas a qualidade institucional do arranjo que os sustenta. Iniciativas como o *Golden Sun*, *Innovation Alliance PV* e o IRA ilustram contextos em que a articulação entre apoio público e desempenho produtivo foi conduzida de maneira consistente.

No contexto comparativo, a China emerge como exemplo de desenvolvimento conduzido por planejamento de longo prazo com os Planos Quinquenais e programas complementares como *Golden Sun* e *Top Runner*, uso combinado de subsídios, metas obrigatórias e instrumentos regulatórios, até a reorientação de subsídios em direção a ganhos de eficiência e qualidade tecnológica. Essa dinâmica se traduziu na hegemonia ao longo da cadeia fotovoltaica global e na trajetória ascendente da capacidade instalada, geração de

energia, exportações e publicações de patentes. A Alemanha confirma o potencial de esquemas de tarifas *feed-in* substanciais e estáveis, articulados à socialização de custos via EEG-*Umlage* e um perfil intensivo em P&D, mas também explicita os limites de um modelo voltado para a ampliação da demanda, que perdeu competitividade para concorrentes asiáticos em um cenário de redução progressiva de subsídios. Contudo, cabe ressaltar que a base técnica e inovativa consolidada pelo país resistiu mesmo após a desaceleração do mercado doméstico e o avanço chinês, o que corrobora a teoria do enraizamento de Rodrik (2013).

A trajetória estadunidense, em grande medida ancorada em incentivos fiscais (ITC, PTC) e, mais recentemente, em instrumentos de reindustrialização e proteção da cadeia doméstica (medidas AD/CVD, Seções 201 e 301, *Inflation Reduction Act*), revela a tensão entre expansão da capacidade instalada e vulnerabilidade às disputas comerciais e às mudanças de orientação da política.

O Japão confirma a centralidade da segurança energética para o desenvolvimento nacional, ao longo de três décadas de fases intensivas em P&D, difusão do uso residencial, *net metering* e, após Fukushima, a expansão via FITs também sinaliza os desafios da integração de fontes renováveis em sistemas com restrições de transmissão e armazenamento.

A Índia e o Brasil compartilham o *status* de economias emergentes e de industrialização tardia. De maneira semelhante, ambos os países ampliaram a difusão da tecnologia por meio de leilões competitivos e esquemas de geração distribuída. Porém, após 2019, a Índia apresentou uma reorientação estratégica com vistas à expansão da produção nacional e do desenvolvimento tecnológico, o que se reflete no aumento modesto das publicações de patentes.

A análise da trajetória brasileira demonstrou que a estratégia nacional combinou iniciativas de inclusão energética e social, como PRODEEM, Luz para Todos, o uso de fotovoltaica em programas habitacionais e, mais recentemente, a proposta de Renda Básica Energética. Nesse contexto, o desenho de um marco regulatório para geração distribuída por meio das Resoluções Normativas 482 e 687, convênios de ICMS e a expansão do *net metering* estimulou a indústria nacional, que apresentou crescimento exponencial da capacidade instalada, da geração de energia e do emprego, além do *boom* das importações após 2016.

Contudo, tais avanços na difusão da tecnologia não foram acompanhados por uma política industrial de mesma envergadura, capaz de articular incentivos produtivos, apoio à P&D, exigências de conteúdo local e coordenação entre instrumentos fiscais, financeiros e

regulatórios. A instabilidade normativa, a descontinuidade de programas e o perfil importador do setor limitaram a formação de uma cadeia doméstica robusta, o que se reflete na balança comercial brasileira. Sem um fio condutor estratégico, as políticas implementadas não produziram internalização tecnológica e capacidade inovativa doméstica, o que mantém o país vulnerável e restringe os potenciais encadeamentos produtivos e tecnológicos associados à transição energética.

Por último, o estudo acerca do desenvolvimento tecnológico e progresso inovativo por meio da evolução das patentes evidencia a dificuldade de internalização tecnológica no Brasil e na Índia, bem como a estagnação da indústria alemã, que, mesmo com seu potencial, permanece constante. O Japão exemplifica uma trajetória de intensa atividade inovativa, apesar de suas limitações internas, ao passo que os Estados Unidos refletem a dinâmica do avanço inovativo com estratégias orientadas principalmente para a ampliação da demanda, sem a mesma integração com a cadeia produtiva, enquanto a trajetória chinesa sinaliza a capacidade de internalização e a orientação para o progresso inovativo qualitativo. Nesse contexto, evidencia-se que nem toda política industrial consegue se reverter em inovação, especialmente quando os instrumentos não estão coordenados e em mesma magnitude para conseguir sustentar a expansão tecnológica.

Reconhecem-se, entretanto, limitações relevantes desse trabalho que abrem espaço para pesquisas futuras. Em primeiro lugar, a opção por um conjunto restrito de países e por um recorte temporal delimitado implica renunciar a comparações com outras experiências relevantes, especialmente na União Europeia e em economias asiáticas emergentes. Em segundo lugar, o uso de indicadores agregados de capacidade instalada, comércio e patentes impossibilita capturar a heterogeneidade intra-setorial e as estratégias específicas de firmas e redes de produção. Ademais, a análise concentrou-se na geração de energia e na manufatura de equipamentos, não incluindo de forma sistemática dimensões correlatas, como armazenamento, redes inteligentes, neutralidade de carbono e a integração entre diferentes fontes renováveis.

Por último, Zhang *et al.*, (2018) apontam que uma análise meramente baseada em números absolutos é capaz de distorcer a dimensão dos esforços tecnológicos e capacidades inovativas internas. A investigação comparativa realizada indica que analisar apenas o número de patentes não diferencia inovação de aprimoramento tecnológico, mascarando diferenças qualitativas. Diante disso, torna-se importante aprofundar a análise acerca dos índices de propriedade intelectual para verificar o real potencial inovativo do setor nos países

selecionados.

À vista dessas limitações, futuras investigações podem explorar bases microeconômicas de comércio e de patentes para analisar padrões de especialização tecnológica intra-setorial, avaliar com maior precisão os impactos distributivos e territoriais das políticas industriais verdes e comparar a experiência fotovoltaica com outros segmentos da transição energética, como eólica, biomassa e tecnologias de armazenamento. No caso brasileiro, seriam particularmente relevantes estudos que integrassem análise de política industrial, governança regulatória do setor elétrico e instrumentos de financiamento de longo prazo, bem como avaliações de impacto dos programas de inclusão energética sobre renda, emprego e vulnerabilidade socioambiental em diferentes regiões. De maneira conjunta, tais agendas podem aprofundar a compreensão sobre como países em desenvolvimento podem transformar a transição energética em vetor de soberania tecnológica, diversificação produtiva e justiça social, consolidando as hipóteses aqui formuladas e contribuindo para o desenho de políticas industriais verdes mais eficazes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. 2012. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015. Altera a Resolução Normativa nº 482/2012. 2015. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2026.

AIGINGER, K; RODRIK, D. *Rebirth of Industrial Policy and an Agenda for the 21st Century*. Working Paper 2020. <<https://doi.org/10.1007/s10842-019-00322-3>>.

ALEMANHA. *Bundesregierung. Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan*. Berlin. 2020. *Unterrichtung durch die Bundesregierung*. Disponível em: <<https://dserver.bundestag.de/btd/19/203/1920364.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2026

ALTENBURG, T.; RODRIK, D. *Green Industrial Policy: Accelerating structural change towards wealthy green economies*. In: ALTENBURG, Tilman; ASSMANN, Claudia. *Green industrial policy: Concept, policies, country experiences*. UN Environment. **German Development Institute/Deutsches Institut für Entwicklungspolitik** (DIE), 2017.

ALTENBURG, Tilman. *Industrial policy in developing countries: Overview and lessons from seven countries*. **German Development Institute/Deutsches Institut für Entwicklungspolitik** (DIE). 2011. Disponível em: <<https://www.files.ethz.ch/isn/128347/DP%204.2011.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2025.

ANDREONI, A.; CHANG, H-J. *The political economy of industrial policy: structural interdependencies, policy alignment and conflict management*. **Structural change and economic dynamics**, v. 48, p. 136-150. 2019. <<https://doi.org/10.1016/j.strueco.2018.10.007>>.

ARI, Izzet; YIKMAZ, Riza Fikret. *Greening of industry in a resource- and environment-constrained world*. In: **Handbook of Green Economics**, 2019. <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816635-2.00004-3>>.

BHATTACHARYA, S.; JANA, C. *Renewable energy in India: historical developments and prospects*. **Energy**, v. 34, n. 8, p. 981-991, 2009. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.10.017>>.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social financia o maior complexo de energia solar em construção na América Latina. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-financiamaior-complexo-de-energia-solar-em-construcao-na-america-latina>>. Acesso em: 13 mar. 2026.

_____. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social financiará construção de 11 usinas solares em seis estados e no Distrito Federal. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/bndes-financiara-construcao-de-11-usinas-solares-em-seis-estados-e-no-distrito-federal>>. Acesso em: 13 mar. 2026.

BOLINGER, M; WISER, R; DARGHOUTH, N. *Preliminary Evaluating the benefits of the Section 1603 cash grant program relative to the investment tax credit it replaced. Energy Policy*. 2010. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.06.054>>.

BRASIL. Projeto de Lei nº 671, de 2024. Altera a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022, para vedar que concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica atuem no mercado de micro e minigeração distribuída. Brasília. 2024. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2420011>>. Acesso em: 27 out. 2025.

_____. Câmara dos Deputados. Projeto de Lei n. 10.370, de 2018: Institui a Política Nacional de Energia Solar Fotovoltaica (PRONASOLAR) e dá outras providências. Brasília. 2018.

_____. Congresso Nacional. Projeto de Lei n. 624, de 2023. Institui o Programa Renda Básica Energética (REBE); e altera as Leis nºs 10.438, de 26 de abril de 2002, 14.182, de 12 de julho de 2021, e 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Brasília. 2023. Disponível em: <<https://www.congressonacional.leg.br/materias/materias-bicamerais/-/ver/pl-624-2023>>. Acesso em: 27 out. 2025.

_____. Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ). Convênio ICMS nº 16, de 22 de abril de 2015. Autoriza as unidades federadas que especifica a conceder isenção nas operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica. **Diário Oficial da União**. Brasília. 2015.

_____. Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ). Convênio ICMS nº 101, de 12 de dezembro de 1997. Concede isenção do ICMS nas operações com equipamentos e componentes para o aproveitamento das energias solar e eólica que especifica. **Diário Oficial da União**. Brasília. 1997. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/1997/CV101_97>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ). Convênio ICMS nº 156, de 10 de novembro de 2017. Prorroga até 31 de dezembro de 2028 as disposições do Convênio ICMS 101/97. **Diário Oficial da União**. Brasília. 2017. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2017/CV156_17>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. Decreto nº 11.456, de 28 de março de 2023. Altera o Decreto nº 10.615/2021, expandindo o PADIS ao segmento fotovoltaico. **Presidência da República**. Brasília. 2023. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/D11456.htm>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. Nota Técnica DEA-SEE-13-2024: *Roadmap* Tecnológico de Recursos Energéticos Distribuídos: perspectivas regulatórias para a geração e armazenamento distribuídos. **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**. 2024. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes>>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. **Empresa de Pesquisa Energética (EPE)**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2029>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

_____. Lei nº 11.484, de 31 de maio de 2007. Institui o PADIS. **Presidência da República**. Brasília. 2007. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111484.htm>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). **Presidência da República**. Brasília. 2009. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). **Presidência da República**. Brasília. 2022. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/114300.htm>. Acesso em: 27 out. 2025.

_____. Lei nº 14.620, de 13 de julho de 2023. Dispõe sobre o Programa Minha Casa, Minha Vida. **Presidência da República**. Brasília. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14620.htm>. Acesso em: 27 out. 2025.

_____. Leilão de Energia Nova (LEN) A-6 de 2019. **Ministério de Minas e Energia (MME)**. Brasília. 2019. Disponível em: <<https://www.mme.gov.br/energiaemineracaoprobrasil/leilao-a6-2019>>. Acesso em: 27 out. 2025.

_____. Minerais são protagonistas na construção de placas solares. **Ministério de Minas e Energia (MME)**. Brasília. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/minerais-sao-protagonistas-na-construcao-de-placas-solares>>. Acesso em: 06 nov. 2025.

_____. Nova indústria Brasil: Forte, transformadora e sustentável: plano de ação para a neointustrialização. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC)**. Brasília. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdic/pt-br/composicao/sc/cndi/plano-de-acao/nova-industria-brasil-plano-de-acao-2024-2026-1.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2025.

BRÜGGEMEIER, F-J. Sol, água, vento: O desenvolvimento da transição energética na Alemanha. **Friedrich Ebert Stiftung**. 2015. Disponível em: <<https://library.fes.de/TouchPoint/start.do?Query=10=%22BV043051503%22>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CAO, C.; SUTTMEIER, R. P.; SIMON, D. F. *China's 15-year science and technology plan. Physics Today*. 2006. Disponível em: <<https://physicstoday.aip.org/features/chinas-15-year-science-and-technology-plan>>. Acesso em: 27 out. 2025. <<https://doi.org/10.1063/1.2435680>>.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). Tipos de Leilões. 2018. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/dados-e-analises/dados-leilao>>. Acesso em: 19 nov. 2025.

CANAL SOLAR. Tóquio torna obrigatório o uso de painéis fotovoltaicos a partir de 2025. Disponível em: <<https://canalsolar.com.br/toquio-torna-obrigatorio-o-uso-de-paineis-fotovoltaicos-a-partir-de-2025/>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

CARAVELLA, S.; CRESPI, S.; CUCIGNATTO, G.; GUARASCIO, D.; *Technological sovereignty and strategic dependencies: the case of the photovoltaic supply chain. Journal of Cleaner Production*. 2023. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140222>>.

CASEMIRO, G. S.; CARMO, R. Interesses mercadológicos asiáticos no Brasil: um levantamento dos pedidos de patentes oriundas da China, Japão e Coreia do Sul. *Cadernos de Prospecção*, Salvador. 2024. <<https://doi.org/10.9771/cp.v17i1.56505>>.

CECHIN, A. D.; VEIGA, J. E. A economia ecológica e evolucionária de Georgescu-Roegen. *Revista de Economia Política*, São Paulo. 2010. <<https://doi.org/10.1590/S0101-31572010000300005>>.

CHANG, H-J.; ANDREONI, A. *Industrial Policy in a Changing World: basic principles, neglected issues and new challenges. Cambridge Journal of Economics (40 Years Conference)*. 2016.

CHERNI, J. A.; KENTISH, J. *Renewable energy policy and electricity market reforms in China. Energy Policy*. 2007. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.024>>.

CHERP, A. VINICHENKO, V; JEWELL, J; SUZUKI, M; ANTAL, M. *Comparing electricity transitions: a historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan. Energy Policy*. 2017. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.044>>.

CHINA. *12th Five-Year Plan (2011-2015) for National Economic and Social Development. National People's Congress*. Beijing. 2011. Disponível em: <https://policy.asiapacificenergy.org/node/37>. Acesso em: 04 nov. 2025.

_____. *Draft law to boost energy development. Ministry of Justice*. Beijing. 2024. Disponível em: http://en.moj.gov.cn/2024-04/24/c_981862.htm. Acesso em: 27 mar. 2026.

_____. *Full text of Xi's statement at the general debate of the 76th Session of the United Nations General Assembly. The State Council Information Office The People's Republic of China*. 2021. Disponível em: <http://english.scio.gov.cn/topnews/2021-09/22/content_77766864.htm>. Acesso em: 27 nov. 2025.

_____. *National High Technology Programme (863 Programme). Ministry of Science and Technology*. Beijing. 2024.

_____. *National Development and Reform Commission (NDRC). The outline of the 14th Five-Year Plan for economic and social development and long-range objectives through the year 2035*. Beijing, 2022.

_____. *Renewable Energy Law of the People's Republic of China. Ministry of Commerce*. 2009. Disponível em: <<https://english.mofcom.gov.cn/>>. Acesso em: 04 nov. 2025.

_____. *Renewable Energy Law of the People's Republic of China. (Adopted at the 14th Meeting of the Standing Committee of the Tenth National People's Congress on February 28, 2005). National People's Congress*. Beijing, 2005. Disponível em: <http://www.npc.gov.cn/zgrdw/englishnpc/Law/2007-12/13/content_1384096.htm>. Acesso em: 04 nov. 2025.

_____. *The 13th Five-Year Plan for Economic and Social Development of the People's Republic of China (2016-2020)*. Beijing, 2016.

_____. *The Communist Party of China Central Committee and the State Council unveil guidelines to ramp up green transition in all areas of economic and social development. The State Council Information Office The People's Republic of China*. Beijing, 2024. Disponível em: <https://english.www.gov.cn/policies/latestreleases/202408/11/content_WS66b8a6f7c6d0868f4e8e9d80.html>. Acesso em: 05 nov. 2025.

CHOW, Gregory C. *Economic planning in China. Working Papers 1318, Princeton University, Department of Economics, Center for Economic Policy Studies*. 2011. Disponível em: <<https://gceps.princeton.edu/wp-content/uploads/2017/01/219chow.pdf>> Acesso em 17 nov. 2025.

CLEARINGSTELLE EEG. Central de Compensação para EEG 2025. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2000: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien*. Berlin, 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2000>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2004: Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich*. Berlin, 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2004>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2009: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien*. Berlin, 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2009>>. Acesso em: 07 fev. 2026.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2012: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien*. Berlin, 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2012>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien*. Berlin, 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2014>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017: Gesetz für den*

Ausbau erneuerbarer Energien. Berlin. 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2017>>. Acesso em: 08 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2021: Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien und zur Änderung weiterer Vorschriften des Energierechts*. Berlin. 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2021>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023: Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien*. Berlin. 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/eeg2023>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

_____. *Solar-Paket I: Gesetz zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften zur Steigerung des Ausbaus photovoltaischer Energieerzeugung*. Berlin 2024. Disponível em: <<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/suche/type/gesetz/6652>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

CUI, C.; LONERGAN, K.; SANSAVINI, G. *Policy-driven transformation of global solar PV supply chains and resulting impacts*. *Nature Communications*. 2025. <<https://doi.org/10.1038/s41467-025-61979-5>>.

DANTAS, S.; POMPERMAYER, F. Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos no Brasil e Possíveis Efeitos no Setor Elétrico. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)**. Brasília. 2018.

DERNBACH, J. C.; TYRRELL, M. *Federal Energy Efficiency and Conservation Laws*. In: GERRARD, Michael B. (ed.). *The Law of Clean Energy: Efficiency and renewables*. Chicago. American Bar Association, 2011. p. 25-57. <<https://doi.org/10.2139/ssrn.1684201>>.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT (GIZ). A mão de obra na cadeia produtiva do setor solar brasileiro. **Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR)**. Brasília. 2021. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/12/Estudo-Cadeia-Produtiva-Solar.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2025.

DOWN TO EARTH. *India's renewable energy generation lags behind capacity due to weather, surging demand: Analysis*. 2025. Disponível em: <<https://www.downtoearth.org.in/renewable-energy/indias-renewable-energy-generation-lags-behind-capacity-due-to-weather-surging-demand-analysis>>. Acesso em: 18 fev. 2026.

DUARTE, C. H.; ARAÚJO, B. P. Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento da cadeia local de fornecedores. **BNDDES Setorial**. Rio de Janeiro, v. 31, n. 59, p. 57-118, mar. 2025. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br>>. Acesso em: 05 nov. 2025.

DUTZ, M. A.; SHARMA, S. *Green growth, technology and innovation*. Washington, D.C. **World Bank**, 2012. (Policy Research Working Paper, 5932). Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/245dcb34-bac8-53d1-8d40-7c75e31630b7>>. Acesso em: 09 nov. 2025. <<https://doi.org/10.1596/1813-9450-5932>>.

DWORKIN, Michael et al. *Energy transmission and storage*. In: GERRARD, Michael B. (ed.). *The Law of Clean Energy: Efficiency and Renewables*. Chicago. American Bar Association, 2011. cap. 22, p. 531-559.

ELGAMAL, G.; DEMAJOROVIC, J. As barreiras e perspectivas para geração de energia elétrica por painéis solares fotovoltaicos na matriz energética brasileira. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (GeAS)**. 2020. <<https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.17157>>.

EMBER ENERGY INSTITUTE. *Electricity generation from solar power*. **Our World in Data**. 2026. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/solar-energy-consumption>>. Acesso em: 04 jan. 2026.

ENERGY TREND. *Tokyo to Mandate Solar Module Installation for New Homes Starting April 2025*. 2024. Disponível em: <<https://www.energytrend.com/news/20240805-48100.html>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. *EU-China solar panels: Commission's price undertaking proposal and provisional anti-dumping duties*. Bruxelas. 2013. Disponível em: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_13_497>. Acesso em: 22 nov. 2025.

FLADUNG, Till *et al.* *The power of plurality: a new taxonomy of actors in the European energy system*. **Energy Research & Social Science**. 2026. <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2026.104566>>.

FRAAS, L. M. *History of Solar Cell Development*. In: FRAAS, L. M. **Low-Cost Solar Electric Power**. 2014. <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07530-3>>.

FRAUNHOFER ISE. **Instituto Fraunhofer para Sistemas de Energia Solar**. Geração de Energia na Alemanha. 2025. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/>>. Acesso em: 11 mar. 2026.

FUCCI, Frederick R. *Distributed Generation*. In: GERRARD, Michael B. (ed.). **The Law of Clean Energy: Efficiency and Renewables**. Chicago. American Bar Association, 2011. p. 345-361.

GALDINO, Marco A.; LIMA, Jorge H. G. PRODEEM - O Programa Nacional de Eletrificação Rural Baseado em Energia Solar Fotovoltaica. **Congresso Brasileiro de Energia Solar**. 2002.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1971. <<https://doi.org/10.4159/harvard.9780674281653>>.

GERMAN SOLAR INDUSTRY ASSOCIATION (BSW-SOLAR). *Statistic data on the German solar power (photovoltaic) industry*. Berlin. 2011. Disponível em: <<https://www.solarwirtschaft.de>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GREEN, A. *Silicon Photovoltaic Modules: a brief history of the first 50 years*. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. New York. 2005. <<https://doi.org/10.1002/pip.612>>.

GROVER, S. *Energy, Economic, and Environmental Benefits of the Solar America Initiative*. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2007. 58 p. NREL/SR-640-41998. Disponível em: <<https://research-hub.nrel.gov/en/publications/energy-economic-and-environmental-benefits-of-the-solar-america-i/>>. Acesso em: 14 nov. 2025.

HESS, D. *The politics of niche-regime conflicts: distributed solar energy in the United States. **Environmental Innovation and Societal Transition.*** 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.eist.2015.09.002>>.

HOPPMANN, J.; HUENTELER, J.; GIROD, B. *Compulsive policy making: the evolution of the German feed-in tariff system for solar photovoltaic power. **Research Policy,*** v. 43, 2014. <<https://doi.org/10.1016/j.respol.2014.01.014>>.

HUANG, P; NEGRO; S. O.; HEKKERT, M. P.; BI, K. *How China became a leader in solar PV: an innovation system analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.*** 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.061>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Golden Sun Programme.* 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/policies/4992-golden-sun-programme>>. Acesso em: 08 jan. 2026.

_____. *Integrating distributed energy resources in China: Lessons from international experience.* 2025. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/integrating-distributed-energy-resources-in-china>>. Acesso em: 22 nov. 2025.

_____. *National Survey Report of PV Power Applications in China 2013.* 2013. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/IEA_PVPS_NSR_2013_China.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.

_____. *National Survey Report of PV Power Applications in Germany* 2014. 2014. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/National_Survey_Report_Germany_2014.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2025.

_____. *Photovoltaic Power Systems Programme: annual report* 2005. Disponível em: <<https://iea-pvps.org/annual-reports/>>. Acesso em: 23 nov. 2025.

_____. *Photovoltaic Power Systems Programme. National Survey Report of Photovoltaic Applications in China* 2017. 2018. Disponível em: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/nsr_china_2017_1.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2025.

_____. *Snapshot of global photovoltaic markets.* 2016. Disponível em: <<https://iea-pvps.org/snapshot-reports/>> Acesso em: 23 nov. 2025.

_____. *World energy outlook (WEO) 2015.* Paris: Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2015>>. Acesso em: 27 nov. 2025.

INDIA. *Approved list of models and manufacturers (ALMM). **Ministry of New and Renewable Energy.*** New Delhi. 2019. Disponível em: <<https://mnre.gov.in/almm/>>. Acesso em: 27 mar. 2026.

_____. *India's RE capacity registers 14.2% Year-on-Year Growth. Press Information Bureau (PIB). Ministry of New and Renewable Energy.* New Delhi. 2024. Disponível em: <<https://www.pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=2083317>>. Acesso em: 17 nov. 2025.

_____. *Jawaharlal Nehru National Solar Mission.* 2025. Disponível em: <<https://en.vikaspedia.in/viewcontent/energy/policy-support/renewable-energy-1/solar-energy/jawaharlal-nehru-national-solar-mission>>. Acesso em: 17 nov. 2025.

_____. *Modified special incentive package scheme (M-SIPS). Ministry of Electronics and Information Technology.* New Delhi. 2012. Disponível em: <<https://www.meity.gov.in/esdm/incentive-schemes>>. Acesso em: 23 fev. 2026.

_____. *National Action Plan on Climate Change (NAPCC): Frequently asked questions. Ministry of Environment, Forest and Climate Change.* New Delhi. 2021. Disponível em: <<https://static.pib.gov.in/WriteReadData/specificdocs/documents/2021/dec/doc202112101.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2025.

_____. *Notification No. 01/2018-Customs (SG): Safeguard Duty on Solar Cells whether or not assembled in modules or panels. Ministry of Finance.* New Delhi. 2018. Disponível em: <<https://www.cbic.gov.in>>. Acesso em: 16 nov. 2025.

_____. *PM Surya Ghar Muft Bijlee Yojana. Press Information Bureau (PIB).* New Delhi. 2024. Disponível em: <<https://www.pib.gov.in/PressReleaseIframePage.aspx?PRID=2010674>>. Acesso em: 19 nov. 2025.

_____. *Production linked incentive scheme (PLI) For large scale electronics manufacturing. Ministry of Electronics and Information Technology.* 2021. Disponível em: <<https://एमईआईटीवाई.सरकार.भारत/offerings/schemes-and-services/details/production-linkedincentive-scheme-pli-for-large-scale-electronics-manufacturing-gNyMDotQWa>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

_____. *Revision of cumulative targets under National Solar Mission from 20,000 MW by 2021-22 to 1,00,000 MW. Ministry of New and Renewable Energy.* New Delhi. 2015. Disponível em: <<https://www.pib.gov.in/newsite/PrintRelease.aspx?relid=122567>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

INSTITUTO DE ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (IEDI). O 14º Plano Quinquenal Chinês: transformando a China em potência industrial e tecnológica. Carta IEDI, n. 1094, 2021. Disponível em: <https://iedi.org.br/cartas/carta_iedi_n_1094.html>. Acesso em: 13 out. 2025.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *End of Life Management: solar photovoltaic panels.* 2016. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2016/Jun/End-of-life-management-Solar-Photovoltaic-Panels>>. Acesso em: 17 dez. 2025.

_____. *Installed solar energy capacity. Our World in Data,* 2025. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity>>. Acesso em: 11 jan. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2012. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2015. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2016. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2017. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2021. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2022. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2023. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable Energy and Jobs: Annual Review*. 2024. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

_____. *Renewable energy and jobs: Annual Review*. 2025. Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications>>. Acesso em: 12 mar. 2026.

JAPAN. *Action plan for achieving a low-carbon society. Prime Minister of Japan and His Cabinet*. Tokyo, 29 jul. 2008. Disponível em: <<https://japan.kantei.go.jp/policy/ondanka/final080729.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2025

_____. *Government revises the Basic Energy Plan to make the maximum use of renewable energy and nuclear carbon-free power sources. Science Japan*. Japan Science and Technology Agency (JST). 2025. Disponível em: <<https://sj.jst.go.jp/stories/2025/s0408-01p.html>>. Acesso em: 15 out. 2025.

_____. *The new buyback program for photovoltaic generation. Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)*. Tokyo, 2009. Disponível em: <<https://policy.asiapacificenergy.org/node/2668>>. Acesso em: 18 out. 2025

KIMURA, O.; SUZUKI, T. *30 years of solar energy development in Japan: co-evolution process of technology, policies, and the market. Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change. Resource Policies: Effectiveness, Efficiency, and Equity*, 2006.

KLIN, M. C. *Solar*. In: GERRARD, Michael B. (ed.). ***The Law of Clean Energy: Efficiency and Renewables***. Chicago. American Bar Association, 2011. cap. 17, p. 391-423

KOMIYAMA, R.; FUJII, Y. *Assessment of post-Fukushima renewable energy policy in Japan's nation-wide power grid*. ***Energy Policy***. 2017. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.006>>.

LACASA, I.; SHUBBAK, A. *Drifting towards innovation: the co-evolution of patent networks, policy, and institutions in China's solar photovoltaic industry*. ***Energy Research & Social Science***, v. 38, p. 84-101, 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.012>>.

LAUBER, V.; MEZ, L. *Three decades of renewable electricity policies in Germany*. ***Energy & Environment***, Brentwood, v. 15, n. 4, p. 599-623, ago. 2004. <<https://doi.org/10.1260/0958305042259792>>.

LEITE, N. H.; LASCANO, C. G.; MORAIS, H. G.; SILVA, L. C. *Impact of the net-metering policies on solar photovoltaic investments for residential scale: A case study in Brazil*. ***Renewable Energy***. 2024. <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120788>>.

LEWIS, J. I. *Green Innovation in China: China's Wind Power Industry and the Global Transition to a Low-Carbon Economy*. ***Columbia University Press***. New York. 2013. <<https://doi.org/10.7312/lewi15330>>.

LIN, A. C. *A sustainability critique of the Obama "all-of-the-above" energy approach*. ***Journal of Energy & Environmental Law***, Washington, v. 5, n. 1, p. 19-30, 2014.

LINCOT, D. *Le nouveau paradigme de l'énergie solaire photovoltaïque: de l'alimentation électrique des satellites à celle de l'humanité*. ***Comptes Rendus Physique***, Paris, v. 18, n. 7-8, p. 381-390, 2017.

LIU, D.; SHIROYAMA, H. *Development of photovoltaic power generation in China: A transition perspective*. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***. 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.014>>.

LIU, H.; MA, S.; LI, W.; GU, H.; LIN, Y.g; SUN, X-j. *A review on the development of tidal current energy in China*. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***. 2011. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.042>>.

LUSTOSA, M. C. *Industrialização, meio ambiente, inovação e competitividade*. In: MAY, Peter H. (org.). ***Economia do meio ambiente: Teoria e Prática***. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier; ECOECO, 2018.

MAHIDA, R. *Solar and wind leads the charge: Analyzing India's dynamic growth in renewable energy capacity from 2016 to 2023*. ***International Journal of Management, Public Policy and Research***. 2024. <<https://doi.org/10.55829/ijmpr.v3i2.213>>.

MATHEWS, J. A. *Greening Industrial*. In: ***The Oxford Handbook of Industrial Policy***. p. 266, 2020. <<https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198862420.013.10>>.

MAZZUCATO, M. *Mission-oriented innovation policies: Challenges and Opportunities*. ***Industrial and Corporate Change***, v. 27, n. 5, p. 803–815. ***Oxford Academic***. 2018. <<https://doi.org/10.1093/icc/dty034>>.

MAZZUCATO, M. O Estado Empreendedor: desmascarando o mito do setor público. São Paulo: **Portfolio Penguin**, 2014.

MAZZUCATO, M.; KATTEL, R.; RYAN-COLLINS, J. *Challenge-driven innovation policy: Towards a new policy toolkit*. **Journal of Industry, Competition and Trade**, v. 20, p. 421-437, 2019. <<https://doi.org/10.1007/s10842-019-00329-w>>.

MELIN, M. F. M.; CAMIOTO, F. C. A Importância de Incentivos Governamentais para Aumentar o Uso da Energia Solar. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas (GEPROS)**, v. 14, n. 5, p. 89-108, 2019. <<https://doi.org/10.15675/gepros.v14i5.2416>>.

MUNDACA, L.; RICHTER, J. *Assessing “green energy economy” stimulus packages: Evidence from the U.S. programs targeting renewable energy*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 91-102, 2014. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.060>>.

NASCIMENTO, R. L. Energia solar no Brasil: situação e perspectivas. (Estudo Técnico). **Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa**. 2017. Disponível em:<<https://bd.camara.leg.br/bd/items/9a96208d-81e5-4989-91b6-75fca4e5f2a3/full>>. Acesso em: 27 out. 2025.

NISHIO, K.; ASANO, H. *Supply amount and marginal price of renewable electricity under the renewables portfolio standard in Japan*. **Energy Policy**. 2006. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2005.04.008>>.

OFFICE OF THE UNITED STATES TRADE REPRESENTATIVE (USTR). *Findings of the investigation into China’s acts, policies, and practices related to technology transfer, intellectual property, and innovation*. Washington, 2018.

. Section 201 cases: imported large residential washing machines and imported solar cells and modules. Washington. 2018.

OHTA, H. *The analysis of Japan’s energy and climate policy from the aspect of anticipatory governance*. **Energies (MDPI)**. 2020. <<https://doi.org/10.3390/en13195153>>.

OTTONELLI, J.; CRUZ, U.; ROSA, A; ANDRADE, J. C. Oportunidades e desafios do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza. 2021. <<https://doi.org/10.61673/ren.2021.1199>>.

PALZ, W. *The Triumph of the Sun in 2000 – 2020. How Solar Energy Conquered the World. Jenny Stanford Series on Renewable Energy*. Jenny Stanford Publishing. Singapore. 2020. <<https://doi.org/10.1201/9781003000860>>.

PEREIRA, O.; RUTHER. Energia solar fotovoltaica. **Sociedade Brasileira de Planejamento Energético**. 2021. <<https://doi.org/10.47168/rbe.v27i3.642>>.

QUITZOW, R. *Dynamics of a policy-driven market: the co-evolution of technological innovation systems for solar photovoltaics in China and Germany*. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, v. 17, p. 126-148, 2015. <<https://doi.org/10.1016/j.eist.2014.12.002>>.

QUITZOW, R. *The co-evolution of policy, market and industry in the solar energy sector: a dynamic analysis of technological innovation systems for solar photovoltaics in Germany and China*. Berlin. **Freie Universität Berlin, Forschungszentrum für Umweltpolitik**. 2013. <<https://doi.org/10.17169/refubium-23358>>.

ROCHA, E. R. P.; ZATTAR, I. C.; SELEME, R. O estado da arte em patentes verdes relativas às tecnologias eólica e solar. **Exacta**, v. 21, n. 1, p. 250-272, 2023. <<https://doi.org/10.5585/2023.22365>>.

RODRIK, Dani. *Green industrial policy*. Institute for Advanced Study, School of Social Science. (Economics Working Papers, 101). 2013.

RHODES, J. *The Future of US Solar is Bright*. **Forbes**. 2020. Disponível em: <<https://www.forbes.com/sites/joshuarhodes/2020/02/03/the-us-solar-industry-in-2020#faa6345ed3fb>>. Acesso em: 03 dez. 2025.

SAHOO, S. K. *Solar photovoltaic energy progress in India: a review*. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2016. <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.049>>.

SANDOR, Debra *et al.* *Benchmarks of Global Clean Energy Manufacturing*. (CEMAC). National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2017. <<https://doi.org/10.2172/1339937>>.

SANTOS, A. Política Nacional sobre Mudança do Clima no Brasil: uma avaliação de instrumentos e de efetividade. **Espaço Público**, Revista de Políticas Públicas da UFPE, n. 6, 2021.

SARDAR, S.; RAY, P. *Empowering sustainable development goal 7 for energy resources and India's G20 presidency*. **International Journal of Management and Commerce**. 2024. Disponível em: <<https://www.managementjournal.in/assets/archives/2024/vol6issue2/6015.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2025.

SAREEN, S.; KALE, S. *Solar 'power': socio-political dynamics of infrastructural development in two Western Indian states*. **Energy Research & Social Science**. 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.03.023>>.

SCHILLING, J. *Japan's Green Transformation (GX) investment policies and implications for EU companies*. **EU-Japan Centre for Industrial Cooperation**, 2024. Disponível em: <<https://www.eu-japan.eu/eubusinessinjapan/library/publication/report-gx-investment-policies>>.

SCHWARZER, J. *Industrial Policy for a Green Economy*. **International Institute For Sustainable Development**, 2013. Disponível em: <<https://www.iisd.org/publications/report/industrial-policy-green-economy>>. 05 jun. 2026.

SERVIÇO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS BAHIA (SEBRAE). Energia solar fotovoltaica para os municípios. Salvador. 2018. Disponível em: <<https://bibliotecas.sebrae.com.br>>. Acesso em: 07 nov. 2025.

SHARMA, Atul. *India's pursuit of energy security: domestic measures, foreign policy, and geopolitics*. New Delhi. **SAGE Publications**. 2019. <<https://doi.org/10.4135/9789353885816>>.

SHI, et al. *A review on the short-term strategy for reducing the peak-valley difference and the long-term energy structure optimization strategy in cities based on the integration of "power generation - power grid - power load - Energy storage"*. **Frontiers in Energy Research**, Lausanne, v. 13, p. 1-22, 2025. <<https://doi.org/10.3389/fenrg.2025.1538811>>.

SHIMOMAEBARA, Lena A.; PEYERL, Drielli. Energia solar no Brasil: histórico e planejamento energético. **Revista de Políticas Públicas**, São Luís, v. 25, n. 2, p. 854-869, 13 jan. 2022. Disponível em: <<https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/rppublica/article/view/18489>>. Acesso em: 27 mar. 2026. <<https://doi.org/10.18764/2178-2865.v25n2p854-869>>.

SILVA, Rutelly Marques da. Energia solar no Brasil: Dos incentivos aos desafios. Núcleo de Estudos e Pesquisas da Consultoria Legislativa. Brasília. **Senado Federal**, 2015. 53 p. (Texto para Discussão, n. 166). Acesso em: 27 mar. 2026.

SOLAR ENERGY INDUSTRIES ASSOCIATION (SEIA). *Study: Solar tariffs cause devastating harm to U.S. market, economy and jobs*. **SEIA News**, Washington. 2019. Disponível em: <<https://seia.org/news/solar-tariff-impacts/>>. Acesso em: 19 nov. 2025.

SOLAR POWER EUROPE. *Solar PV Jobs & Value Added in Europe*. 2017. Disponível em: <<https://resources.solarbusinesshub.com/solar-industry-reports/item/solar-pv-jobs-value-added-in-europe>>. Acesso em: 05 nov. 2025.

STADTWERKE KUSEL. *Notwendigkeit der Erzeugungszähler bei PV-Anlagen: durch die PV-Novelle des EEG 2012*. Kusel: Stadtwerke Kusel. 2012.

TABASSUM, S. et al. *Solar Energy in the United States: development, challenges and future prospects*. **Energies (MDPI)**. 2021. <<https://doi.org/10.3390/en14238142>>.

TATSUTA, M. *New sunshine project and new trend of PV R&D program in Japan*. In: **World Renewable Energy Congress**. 1996. <[https://doi.org/10.1016/0960-1481\(96\)88817-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88817-3)>.

THE OXFORD INSTITUTE FOR ENERGY STUDIES (OIES). *Current direction for renewable energy in China*. 2020. Disponível em: <<https://www.oxfordenergy.org/publications/current-direction-for-renewable-energy-in-china/>> Acesso em: 08 out. 2025.

THE WHITE HOUSE. *Blueprint for a secure energy future*. Washington: **The White House**, 2011. Disponível em: <<https://obamawhitehouse.archives.gov/issues/blueprint-secure-energy-future>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

TOKUTA, Rie; TAKAHAMA, Takeshi. *Perovskite solar cell*. JP2023067523A. 2021. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/JP2023067523A/en>>. Acesso em: 27 mar. 2026.

UNITED NATIONS. *India plans to produce 175 GW of renewable energy by 2022. Department of Economic and Social Affairs*. 2021. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/partnerships/india-plans-produce-175-gw-renewable-energy-2022>>. Acesso em: 14 fev. 2026.

UNITED NATIONS. *UN COMTRADE Database (COMTRADE): Trade flow data for solar photovoltaic cells and modules (HS 854110) – Brazil, China, Germany, India, Japan, USA (2000-2021)*. New York: *UN Statistics Division*. 2025. Disponível em: <<https://comtradeplus.un.org/>>. Acesso em: 18 nov. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. 2011. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/report/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>>. Acesso em: 16 ago. 2025.

UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. (UNIDO). *Policies for Supporting Green Industry*. 2011. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/publications/policies-supporting-green-industry-17189>>. Acesso em: 28 mai. 2026.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. (UNFCCC) *Enhanced Actions on Climate Change: China's Intended Locally Determined Contributions*. 2015. Disponível em: <<https://unfccc.int/>>. Acesso em: 11 fev. 2026.

UNITED STATES. *Department of Commerce. Fact Sheet: Commerce Finds Dumping and Subsidization of Crystalline Silicon Photovoltaic Cells, Whether or Not Assembled into Modules from the People's Republic of China*. Washington, DC. 2012.

_____. *Department of Commerce. Fact Sheet: Commerce Preliminarily Finds Dumping of Crystalline Silicon Photovoltaic Cells, Whether or Not Assembled into Modules from the People's Republic of China*. Washington, DC. 2012.

_____. *Department of Commerce. International Trade Administration. Commerce Initiates Antidumping and Countervailing Duty Investigations of Crystalline Silicon Photovoltaic Cells from Cambodia, Malaysia, Thailand, and the Socialist Republic of Vietnam*. Washington, DC. 2024. Disponível em: <<https://www.trade.gov/commerce-initiates-antidumping-and-countervailing-duty-investigations-crystalline-silicon>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

_____. *Department of Commerce. International Trade Administration. Preliminary Determinations in the Antidumping Duty Investigations of Crystalline Photovoltaic Cells Whether or Not Assembled into Modules from Cambodia, Malaysia, Thailand and the Socialist Republic of Vietnam*. Washington, DC. 2024. Disponível em: <<https://www.trade.gov/preliminary-determinations-antidumping-duty-duty-investigations-crystalline-photovoltaic-cells>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

_____. *Department of Commerce. International Trade Administration. U.S. Department of Commerce Announces Final Determinations in the Antidumping and Countervailing Duty Investigations of Solar Panels From Multiple Countries*. Washington, DC. 2025. Disponível em: <<https://www.trade.gov/press-release/us-department-commerce>>.

[announces-final-determinations-antidumping-and-countervailing>](#). Acesso em: 14 dez. 2025 .

_____. **Department of Energy**. *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. About the Solar America Initiative*. 2024. Disponível em: <<https://www.energy.gov/cmei/about-office-energy-efficiency-and-renewable-energy>>. Acesso em: 09 nov. 2025.

_____. **Department of Energy**. *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. The Solar America Initiative: role of utilities. National Renewable Energy Laboratory*. 2006. Disponível em: <<https://docs.nrel.gov/docs/fy07osti/40503.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2025.

_____. **Department of Energy**. *Qualifying Advanced Energy Project Credit (48C) Program*. Washington, DC. 2025. Disponível em: <<https://www.energy.gov/infrastructure/qualifying-advanced-energy-project-credit-48c-program>>. Acesso em: 14 dez. 2025.

_____. **Department of Energy**. *SunShot Vision Study*. Washington, DC. 2012. Disponível em: <<https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/47927.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2025.

_____. **Department of Energy**. *The History of Solar*. Washington, DC. 2002. Disponível em: <https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2025.

_____. **Department of Energy**. *The SunShot Initiative: Making Solar Energy Affordable for all Americans*. Washington. 2013.

_____. **Department of Energy**. *Treasury and IRS Finalize Section 45x Rules to Boost U.S. Renewable Energy Manufacturing*. Washington, DC. 2024. Disponível em: <<https://www.energy.gov/cmei/systems/articles/treasury-and-irs-finalize-section-45x-rules-boost-us-renewable-energy>>. Acesso em: 15 out. 2025.

_____. **Department of Treasury**. *Inflation Reduction Act incentives for clean energy manufacturers*. Washington DC. 2024.

_____. **Department of Treasury**. *Payments for Specified Energy Property in Lieu of Tax Credits under the American Recovery and Reinvestment Act of 2009: Program Guidance*. Washington, DC. 2009. Disponível em: <<https://home.treasury.gov/policy-issues/financial-markets-financial-institutions-and-fiscal-service/1603-program-payments-for-specified-energy-property-in-lieu-of-tax-credits>>. Acesso em: 2 fev. 2026

_____. **Environmental Protection Agency**. *Renewable Electricity Production Tax Credit Information*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/lmop/renewable-electricity-production-tax-credit-information>> Washington, DC. 2020. Acesso em: 24 fev. 2026.

_____. **Federal Register**. *Section 45Y Clean Electricity Production Credit and Section 48E Clean Electricity Investment Credit*. Washington, DC. 2025. Disponível em: <<https://www.federalregister.gov/documents/2025/01/15/2025-00196/section-45y-clean-electricity-production-credit-and-section-48e-clean-electricity-investment-credit>>. Acesso em: 2 fev. 2026.

_____. **Internal Revenue Service (IRS). Inflation Reduction Act of 2022.** Washington, DC. 2022. Disponível em: <<https://www.irs.gov/inflation-reduction-act-of-2022>>. Acesso em: 11 ago. 2025.

_____. **International Trade Commission. Certain Crystalline Silicon Photovoltaic Products from China and Taiwan: investigation nos. 701-TA-511 and 701-TA-1246-1247 (Review).** Washington, DC. 2020. Disponível em: <https://www.usitc.gov/investigations/701731/2014/certain_crystalline_silicon_photovoltaic_products/final.htm>. Acesso em: 28 out. 2025.

_____. **Public Law 119-21: One, Big, Beautiful Bill Act. United States Congress.** Washington DC. 2025. Disponível em: <<https://www.irs.gov/newsroom/one-big-beautiful-bill-provisions>>. Acesso em: 07 mar. 2026.

_____. **The Energy Credit for Energy Investment Tax Credit (ITC).** Washington, DC. **Congressional Research Service.** 2021. Disponível em: <https://www.congress.gov/crs_external_products/IF/PDF/IF10479/IF10479.7.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2026.

VENKATESH, J. **India's solar energy boom: Hits and misses.** Singapura: **Energy Studies Institute.** of National University Singapore, 2025. (ESI Policy Brief, n. 80).

WANG, Y.; LUO, G.; KANG, H. **Successes and Failures of China's Golden-Sun Program.** In: 6th *International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD)*, 2017. **Atlantis Press: Advances in Engineering Research**, v. 129, 2017. <<https://doi.org/10.2991/iceesd-17.2017.109>>.

WEBER, Julian. **Solar cell module and method for producing a solar cell module.** DE102022128223A1. 2022. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/DE102022128223A1/en>>. Acesso em: 27 mar. 2026.

WEDY, G. A energia solar nos Estados Unidos da América. In: CAVALCANTE, D. L.; FREITAS, J.; CALIENDO, P. **Reflexos da Tributação Ambiental no âmbito da Energia Solar.** Porto Alegre: Editora Fi, 2020. p. 33-54.

WIRTH, H. **Recent Facts about Photovoltaics in Germany.** Freiburg: **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.** 2025. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html>>. Acesso em: 22 jan. 2026 .

WOOD MACKENZIE. **China to hold over 80% of global solar manufacturing capacity from 2023-26.** 2023. Disponível em: <<https://www.woodmac.com/press-releases/china-dominance-on-global-solar-supply-chain/>>. Acesso em: 18 fev. 2026.

WORLD BANK. **China: 40-Year Experience in Renewable Energy Development: Policies, achievements, and lessons learned.** **World Bank Publications.** 2021. Disponível em <<https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/e2b6dce6-48d7-54a7-8944-ab597e7dead7>>. Acesso em: 02 fev. 2026.

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION (WIPO). *IP Statistics Data Center: Patent publications by renewable energy (Indicator 4b)*. 2025. Disponível em: <<https://cdn.ipstatsdc.deda.prw1.wipo.int/>>. Acesso em: 16 mar. 2026.

YANG, et al. *The impact of phasing out subsidy for financial performance of photovoltaic enterprises: Evidence from “531 new policy” on China’s photovoltaic industry*. **Frontiers in Energy Research**. 2024. <<https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1486351>>.

YE, et al. *Analysis of feed-in tariff policies for solar photovoltaic in China 2011–2016*. **Applied Energy**. 2017. <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.037>>.

YOSHIDA, P. (ed.). *Japan's energy conundrum: A discussion of Japan's energy circumstances and U.S.-Japan energy relations*. Washington, D.C.: **Sasakawa Peace Foundation**. 2018.

ZENG, Ka. *Domestic politics and US-China trade disputes over renewable energy*. **Journal of East Asian Studies**. 2016. <<https://doi.org/10.1017/S1598240800009139>>.

ZHANG, Gupeng et al. *Comparative technological advantages between China and developed areas in respect of energy production: Quantitative and qualitative measurements based on patents*. **Energy Policy**. 2018. <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.081>>.

ZHANG, Sufang; ANDREWS-SPEED, Philip; ZHAO, Xiaoli. *Political and institutional analysis of the successes and failures of China's wind power policy*. **Energy Policy**. 2013. <<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.071>>.

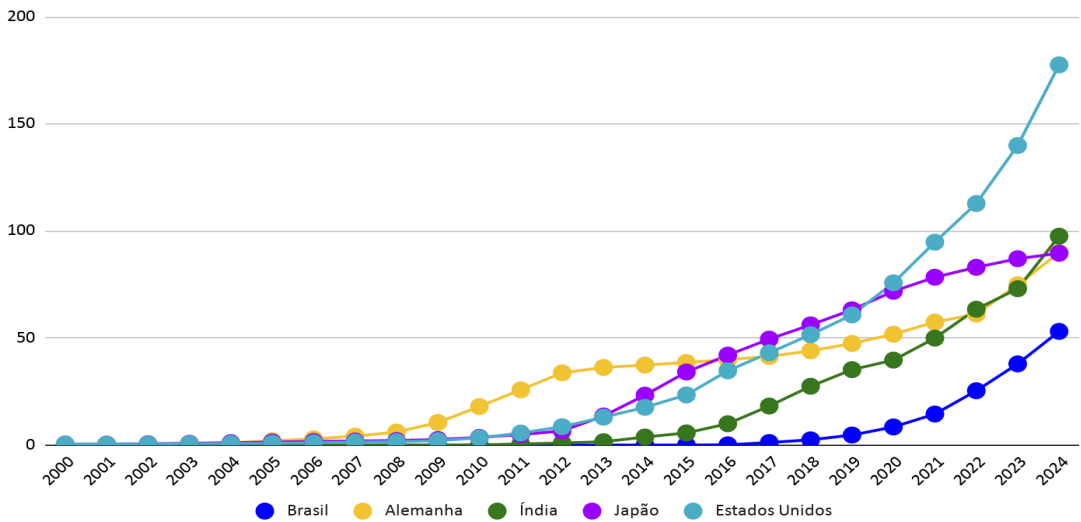
ZHANG, Yueqi; XIE, Pengcheng; HUANG, Ying; ZHAO, Daiqing. *Evolution of solar photovoltaic policies and industry in China*. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 2020. <<https://doi.org/10.1088/1755-1315/651/2/022050>>.

ZHU, Xiangdong; HE, Canfei; GU, Zhutong. *How do local policies and trade barriers reshape the export of Chinese photovoltaic products?*. **Journal of Cleaner Production**. 2021. <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123995>>.

APÊNDICE A – APRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS INDICADORES COM EXCEÇÃO DA CHINA

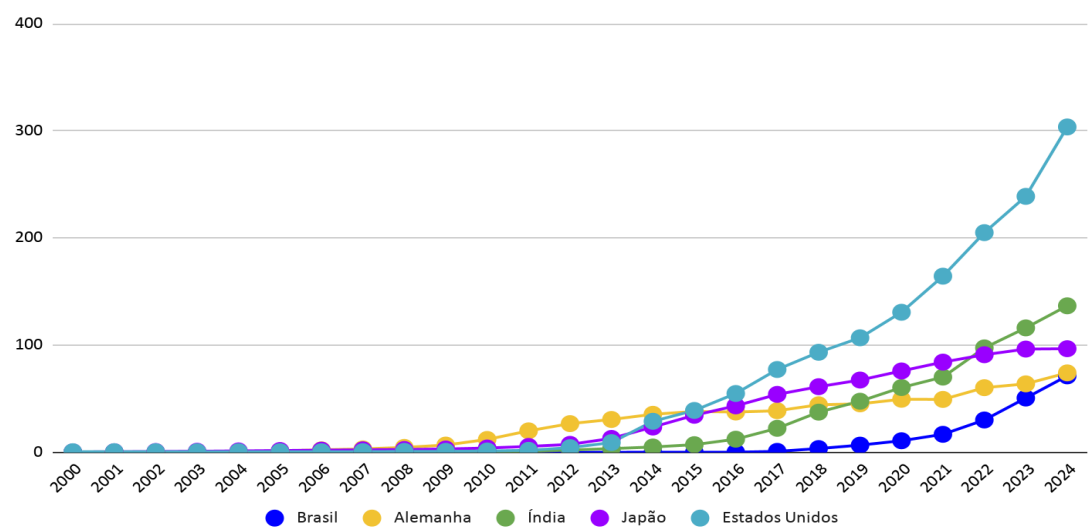
A China se destaca em todos os indicadores, em razão das dimensões da indústria fotovoltaica nacional e sua expansão internacional. Nesse contexto, a análise gráfica pode, de certa forma, dificultar a visualização da trajetória de desenvolvimento de outros países. Assim, apresenta-se aqui os gráficos apresentados ao longo do Capítulo 4, contudo, sem a participação chinesa para melhor demonstração.

Gráfico 13 - Capacidade Instalada em GW entre 2000 e 2024



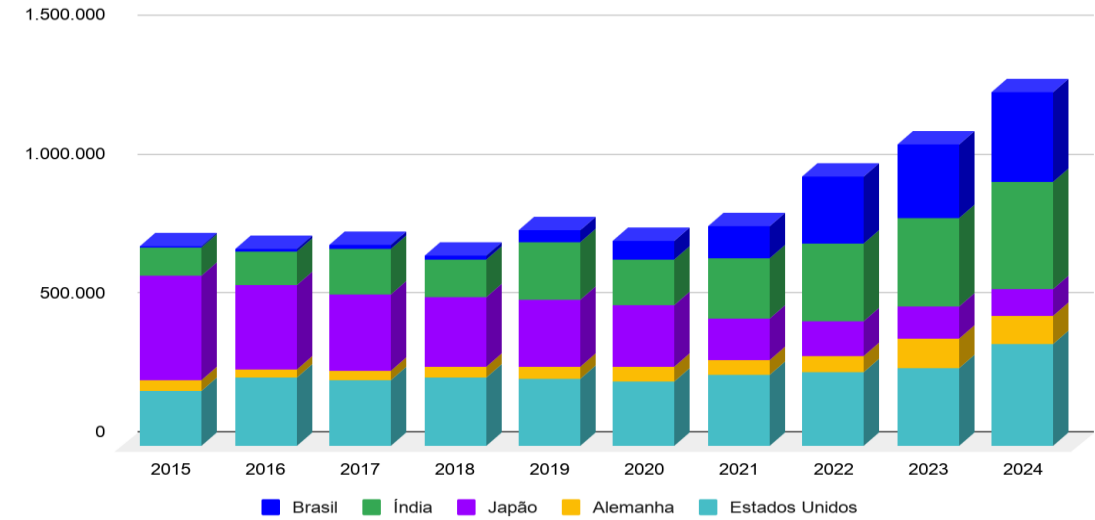
Fonte: *Our World in Data*; IRENA, 2025 Elaboração própria, 2025

Gráfico 14 - Geração Anual em GWh entre 2000 e 2024



Fonte: *Our World in Data*; Ember, 2025 Elaboração própria, 2025

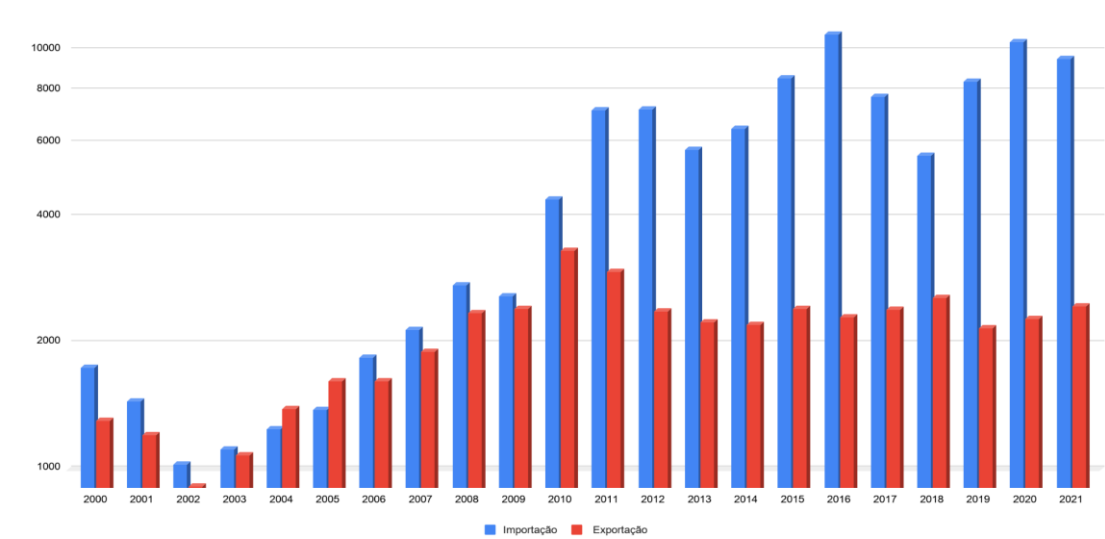
Gráfico 15 - Emprego no Setor Fotovoltaico entre 2015 e 2024



Fonte:

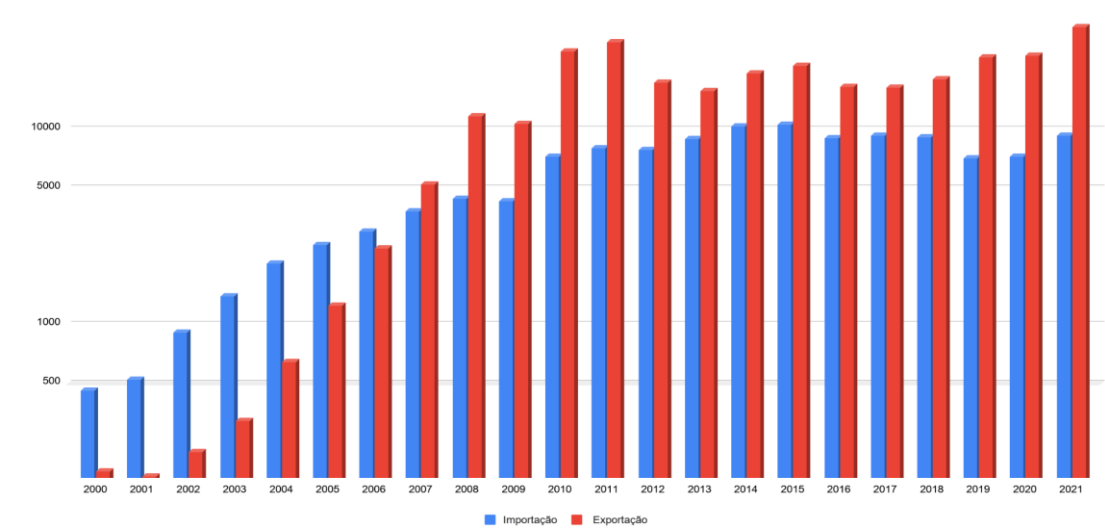
IRENA, 2015, 2025; Elaboração própria, 2025

Gráfico 16 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Estadunidense entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica)



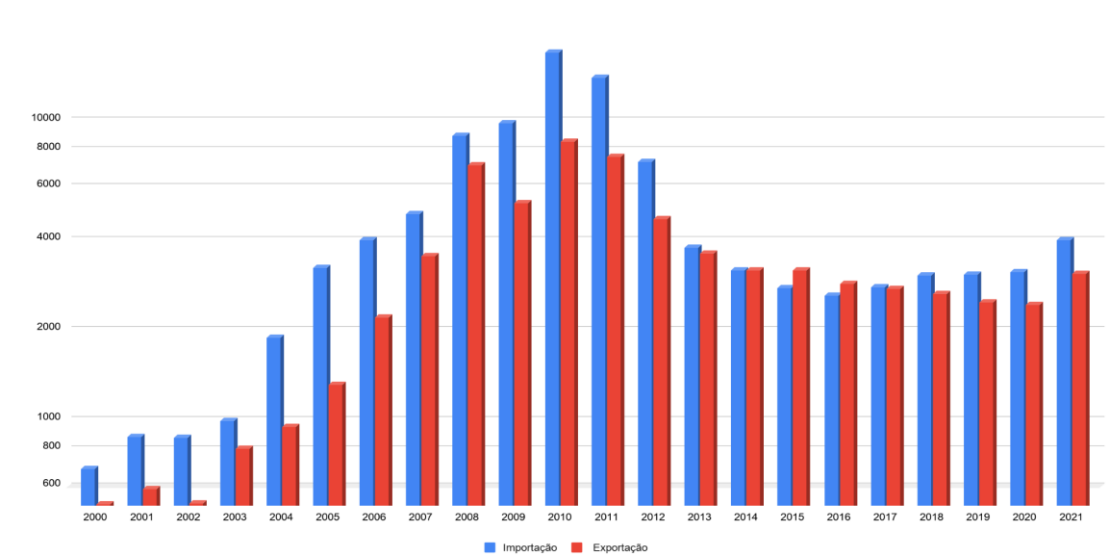
Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 17 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Chinesa entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica)



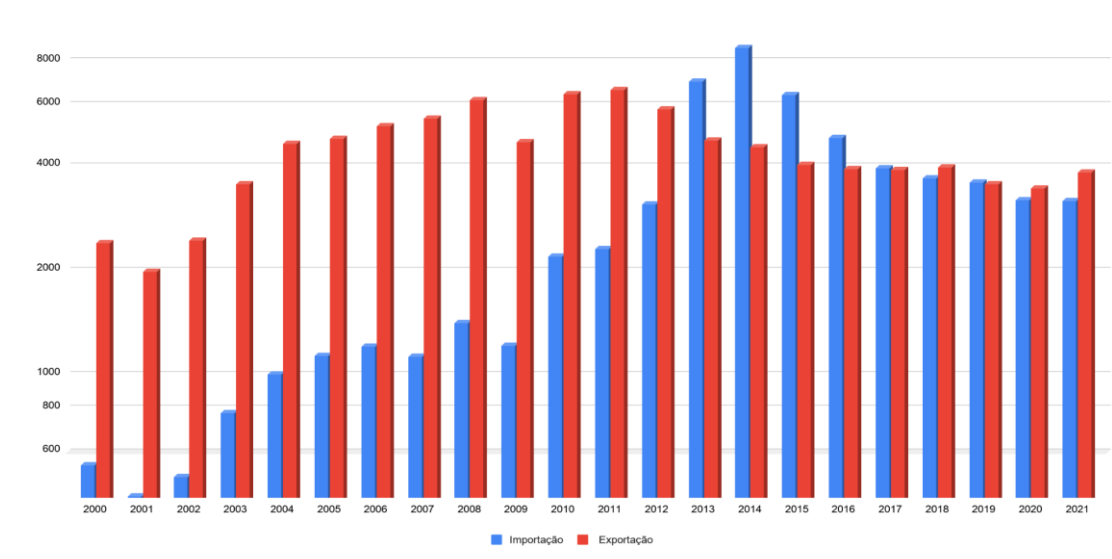
Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 18 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Alemã entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica)



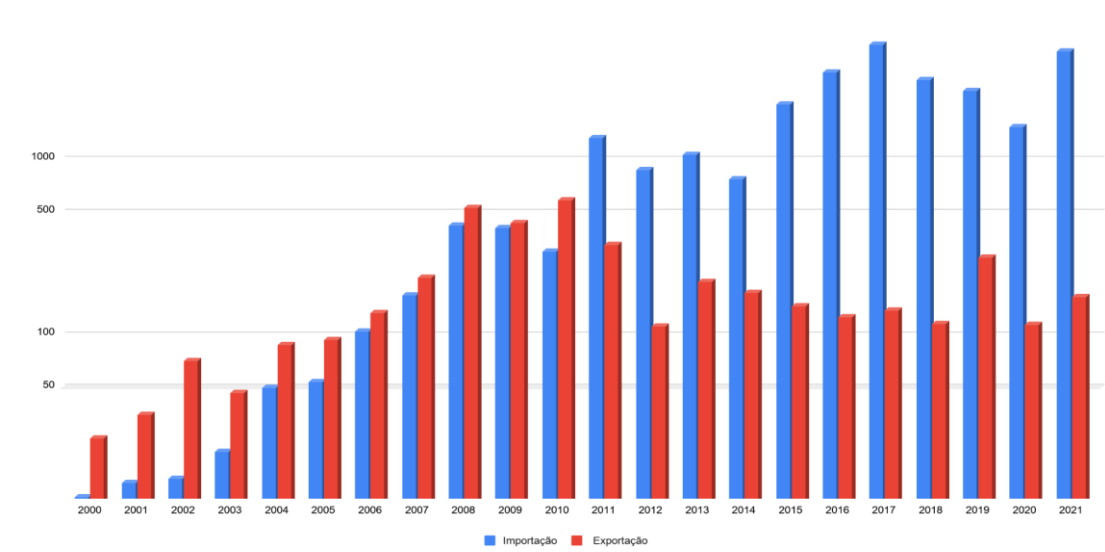
Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 19 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Japonesa entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica)



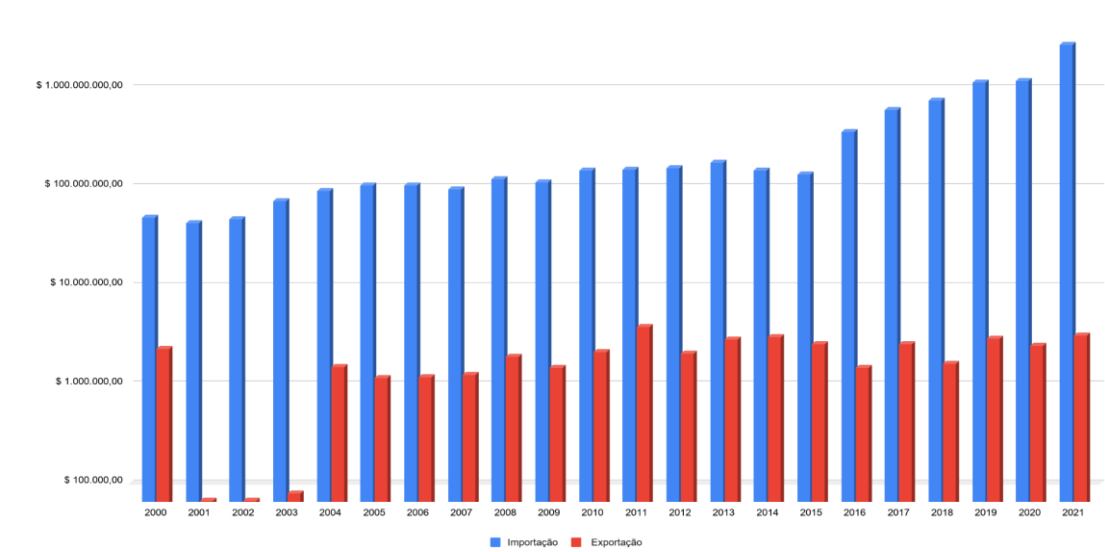
Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 20 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Indiana entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica)



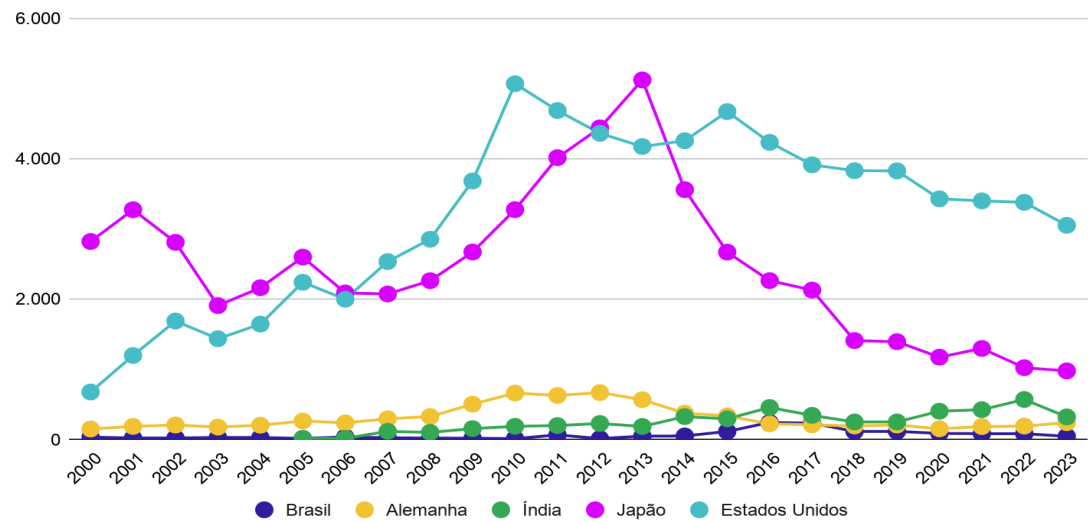
Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 21 - Balança Comercial da Indústria Fotovoltaica Brasileira entre 2000 e 2021 (em escala logarítmica)



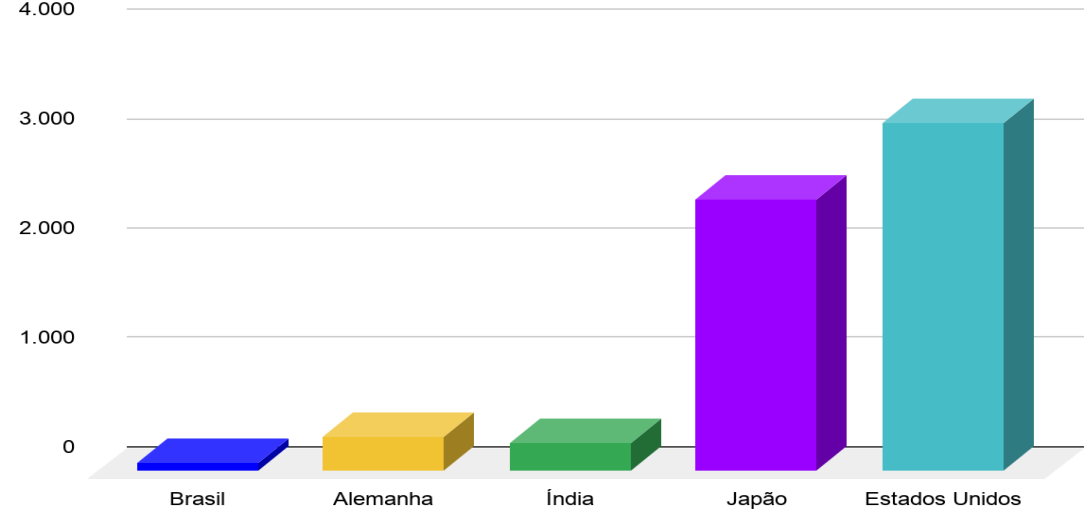
Fonte: COMTRADE; Elaboração Própria, 2025.

Gráfico 22 - Total de Depósitos de Patentes entre 2000 e 2024



Fonte: WIPO, 2025; Elaboração Própria, 2026.

Gráfico 23 - Média Anual de Publicação de Patentes País entre 2000 e 2024



Fonte: WIPO, 2025; Elaboração Própria, 2026.

APÊNDICE B – UMA BREVE APRESENTAÇÃO DA CADEIA PRODUTIVA DA INDÚSTRIA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Os painéis para geração de energia solar fotovoltaica são compostos por elementos como quartzo, silício e alumínio. Assim, o tratamento da matéria-prima na indústria de transformação é fundamental para o desenvolvimento da cadeia produtiva do setor fotovoltaico, que se baseia em dois eixos. A esfera produtiva, definida como *upstream*, corresponde à fabricação de peças e equipamentos que compõem os módulos solares. Por outro lado, a instalação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos compete à dimensão *downstream* (Brasil, 2023; GIZ, 2021; Solar Power Europe, 2017).

A geração de energia solar fotovoltaica pode ocorrer em dois sistemas diferentes, a depender da necessidade e especificidades locais das plantas produtoras. A modalidade *on-grid* inclui os consumidores que estão conectados à rede de transmissão, mesmo que em modelos de geração distribuída e de autoconsumo remoto, ao passo que a modalidade *off-grid* compreende os consumidores localizados em áreas isoladas, como zonas rurais e regiões remotas (Duarte; Araújo, 2025).

O sistema de compensação de energia (*net metering*) pode seguir diferentes modalidades, baseadas nos modelos de geração distribuída junto à rede, de geração compartilhada por um conjunto de consumidores ou conforme a configuração de autoconsumo remoto, na qual a unidade consumidora não está localizada junto à unidade geradora (SEBRAE, 2018).