



Energia solar fotovoltaica, dependência tecnológica e sustentabilidade: as persistentes contradições da economia verde no Brasil

Douglas Vinícius Vaz Martins¹

Resumo: O presente artigo analisa as contradições inerentes à expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil, no contexto da transição para uma economia verde. A partir de uma análise da cadeia de valor da indústria solar, o trabalho demonstra como a crescente participação desta fonte na matriz energética brasileira ocorre em paralelo a uma acentuada dependência tecnológica e econômica de componentes e tecnologias importadas, majoritariamente da China. Utilizando como referencial teórico a teoria da dependência de Celso Furtado, o artigo argumenta que, na ausência de políticas industriais estratégicas e integradas, a transição energética no Brasil pode reforçar padrões históricos de subdesenvolvimento e vulnerabilidade externa. A pesquisa baseia-se em dados secundários de agências internacionais de energia, dados oficiais do governo brasileiro, relatórios de mercado e associações setoriais e estudos acadêmicos disponíveis. Os resultados indicam que, embora a energia solar apresente um enorme potencial para a descarbonização da economia, a atual estratégia de expansão, focada na importação de equipamentos, limita a geração de empregos de alta qualificação, o desenvolvimento de capacidades tecnológicas endógenas e pressiona a balança de pagamentos. O artigo conclui apontando para a necessidade de uma política industrial ativa que articule a expansão das energias renováveis com o adensamento da cadeia produtiva nacional, de modo a transformar a transição energética em um vetor de desenvolvimento econômico e social sustentável.

Palavras-chave: Cadeia produtiva fotovoltaica; Economia verde; Dependência tecnológica.

Código JEL: O14, Q42

Área Temática: Área 7 Tecnologias sociais e ambientais – Área 7.3 Inovação, desenvolvimento e sustentabilidade

Photovoltaic solar energy, technological dependence and sustainability: the persistent contradictions of the green economy in Brazil

Abstract: This article analyzes the inherent contradictions in the expansion of photovoltaic solar energy in Brazil within the broader context of the transition toward a green economy. Based on a value chain analysis of the solar industry, the study demonstrates how the increasing share of this energy source in Brazil's energy matrix has occurred alongside a pronounced technological and economic dependence on

¹ Universidade de Taubaté. E-mail: dmartins@lna.br

imported components and technologies, predominantly from China. Drawing on Celso Furtado's dependency theory as its theoretical framework, the article argues that, in the absence of strategic and integrated industrial policies, Brazil's energy transition may reinforce historical patterns of underdevelopment and external vulnerability. The research is grounded in secondary data from international energy agencies, official Brazilian government statistics, market reports, industry associations, and academic studies. The findings indicate that, although solar energy holds significant potential for economic decarbonization, the current expansion strategy—primarily based on equipment imports—constrains the creation of high-skilled jobs, limits the development of endogenous technological capabilities, and exerts pressure on the balance of payments. The article concludes by emphasizing the need for an active industrial policy capable of aligning renewable energy expansion with the deepening of the national productive chain, thereby transforming the energy transition into a driver of sustainable economic and social development.

Keywords: Photovoltaic value chain; Green economy; Technological dependence.

1. Introdução

A matriz energética brasileira viveu uma transformação notável na última década, com a energia solar fotovoltaica saltando de uma participação residual de 0,08% em 2013 para mais de 12,3% da capacidade instalada em 2025, ultrapassando 53 GW de potência operacional (IRENA, 2025; ANEEL, 2025). Contudo, o Brasil ainda não domina os componentes centrais da cadeia de valor da indústria solar fotovoltaica, e uma das principais dificuldades para se expandir a exploração dessa fonte no país está ligada à estrutural dependência de importações de células e painéis fotovoltaicos. Atualmente, o país ainda não desenvolveu com solidez e escala industrial necessária a tecnologia para fabricação dos insumos e componentes principais do sistema.

Nesse sentido, por um longo período o Brasil continuará a depender da maciça importação desses equipamentos para o abastecimento do mercado interno. Se em 2017 o índice de importação já era de 76% do total adquirido no país (SERAIE, 2017), em 2024 e 2025, a totalidade dos 32,9 GWp adicionados foi suprida por módulos importados, majoritariamente da China². A razão central para essa dependência é a ausência de produção local de silício de grau solar (Si-GS), uma tecnologia de alto custo e complexidade que poucos países e empresas dominam em escala industrial. Apesar de o Brasil ser um dos maiores detentores de reservas de quartzo do mundo (matéria-prima do silício) e um relevante produtor de silício em grau metalúrgico (Si-GM), o país continua a exportar a matéria-prima bruta para reimportar o produto processado com altíssimo valor agregado.

O crescimento do mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil tende a reproduzir relações neocoloniais e reforçar a inserção subordinada do país enquanto exportador de *commodities*. Um exemplo sintomático desta assimetria reside na venda para o exterior de cristais de quartzo (material básico para a fabricação do silício) por US\$ 0,0267/kg (OEC, 2026) e, após sua purificação nos Estados Unidos, Europa e China, compramos por US\$ 3,50/kg o Si-GS.

O potencial do país em alavancar a cadeia de valor da energia solar é rico em vantagens comparativas - seja pela abundância de jazidas de quartzo em Minas Gerais e Bahia, e grande produção de silício grau metalúrgico, ambas voltadas majoritariamente para exportação -, e significativa generosidade de recurso solar, com 2,5 vezes mais irradiação do que qualquer outro de clima frio (como a Alemanha, por exemplo). Contudo, importamos silício purificado (grau solar) cerca de 130 vezes mais caro.

Devido à insuficiência de políticas de desenvolvimento tecnológico específicas, não é possível visualizar no médio prazo uma autonomia brasileira nesse campo, e certamente a maioria dos projetos a serem instalados nos próximos anos nas futuras usinas e residências serão de componentes importados.

Um país que dominou a tecnologia fotovoltaica em larga escala a partir dos anos 2000 foi a China, possuindo os recursos, conhecimento e instituições necessárias para estruturar e internacionalizar

² PV Magazine Brasil. Brasil importa 10,6 GW de módulos solares no primeiro semestre, com retração a partir de abril. 30 de setembro de 2025. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2025/09/30/brasil-importa-106-gw-de-modulos-solares-no-primeiro-semester-com-retracao-a-partir-de-abril/>

toda a cadeia produtiva de forma bastante competitiva - o país produz cerca de 80% de toda a capacidade de produção da cadeia fotovoltaica no mundo com preços que chegam a ser três vezes mais baratos que o montado no Brasil (ROBINSON, 2024; NASCIMENTO, 2017).

Nesse sentido, é plausível e benéfico o domínio da tecnologia fotovoltaica em âmbito nacional. A instalação desta indústria pode significar a geração de novos empregos, movimentação econômica, geração de conhecimento, agregação de valor para produtos nacionais e, sobretudo, a mitigação dos efeitos perversos decorrentes das relações de dependência (sobretudo econômica e tecnológica) que o país nutre com empresas e nações do globo.

Entender a situação, contexto, desafios e possibilidades da internalização da cadeia produtiva fotovoltaica no Brasil é fundamental para avaliar a viabilidade de se estimular a indústria e a tecnologia nacional no sentido de ampliar o uso sustentável dessa fonte alternativa de energia mais acentuadamente. Para isso, torna-se imperativo analisar os aspectos técnico-econômicos e o grau de hiato tecnológico da cadeia de valor da energia fotovoltaica no intuito de identificar as vulnerabilidades e assimetrias competitivas do país diante do mercado mundial de tecnologias fotovoltaicas.

2. Metodologia

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, baseada na análise de dados secundários. O objetivo é compreender as relações de dependência na cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil, articulando dados de mercado com o referencial teórico da dependência e da política industrial. A abordagem metodológica adotada combina a revisão de literatura com a coleta e análise de dados quantitativos e qualitativos provenientes de fontes diversas e reconhecidas no setor energético e na academia.

A pesquisa foi estruturada em três etapas principais:

- Etapa 1: revisão da literatura e construção do referencial teórico - nesta fase, foi realizada uma extensa revisão bibliográfica para consolidar o arcabouço conceitual do trabalho. A pesquisa abrangeu bases de dados acadêmicas como Scielo, Google Scholar e ScienceDirect, utilizando palavras-chave como “cadeia produtiva fotovoltaica”, “economia verde”, “transição energética justa”, “teoria da dependência”, “Celso Furtado”, “dependência tecnológica” e “política industrial”. O objetivo foi estabelecer um diálogo entre a literatura contemporânea sobre sustentabilidade e transição energética e as teorias clássicas do desenvolvimento, a fim de construir um framework analítico robusto para interpretar o caso brasileiro.

- Etapa 2: Coleta e sistematização de dados secundários - a segunda etapa consistiu na coleta de dados quantitativos e qualitativos sobre o setor de energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo. As fontes de dados incluíram:

- Agências internacionais de energia: relatórios e bases de dados da Agência Internacional de Energia (IEA), da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e do Laboratório Nacional de Energia Renovável dos EUA (NREL). Destes, foram extraídos dados sobre a evolução da capacidade instalada, custos de geração, estrutura da cadeia de valor global e tendências tecnológicas.
- Órgãos governamentais e associações setoriais brasileiras: dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). Estas fontes forneceram informações sobre a participação da energia solar na matriz elétrica brasileira, o crescimento da geração distribuída e centralizada, e dados do mercado nacional.
- Dados de comércio exterior: informações sobre importação de equipamentos fotovoltaicos foram coletadas de bases de dados do MDIC, Comex Stat, e de reportagens especializadas que analisam os fluxos comerciais entre Brasil e outros países.
- Relatórios de mercado e consultorias: análises de consultorias especializadas no setor de energia, como BloombergNEF (BNEF) e Wood Mackenzie, foram utilizadas para obter dados sobre custos, preços, *payback* de investimentos e projeções de mercado.

Os dados coletados foram sistematizados em tabelas e gráficos para facilitar a análise comparativa e a identificação de tendências, especialmente no que tange à evolução da capacidade

instalada, à redução de custos, à participação de mercado de diferentes tecnologias e à dependência de componentes importados.

- Etapa 3: Análise e discussão dos dados - a terceira etapa envolveu a análise dos dados coletados à luz do referencial teórico estabelecido. A análise da cadeia de valor foi realizada de forma descritiva, identificando os principais elos – desde a produção de silício e células até a instalação e operação dos sistemas – e a posição do Brasil em cada um deles. A dependência tecnológica foi mensurada qualitativamente, pela identificação dos componentes que o país não produz em escala suficiente, e quantitativamente, pelos dados de importação.

A discussão dos resultados buscou conectar os dados empíricos com os conceitos teóricos, argumentando como a estrutura da cadeia de valor e a dinâmica de importação refletem os padrões de dependência descritos por Furtado (1974, 2000). A análise comparativa com as políticas industriais de outros países serviu para ilustrar modelos alternativos de desenvolvimento setorial e para embasar a crítica ao modelo brasileiro. Por fim, a análise dos impactos econômicos considerou as implicações da dependência para a balança de pagamentos, a geração de empregos e o desenvolvimento de capacidades inovativas no país.

3. Referencial teórico

3.1 Tecnologia fotovoltaica e economia verde: uma visão crítica

Ainda que expressões denominadas de “sustentabilidade” e “desenvolvimento sustentável” tenham se tornado conceitos polissêmicos e objeto de campos de disputa, com múltiplos discursos que ora se opõem, ora se complementam, o debate sobre energias alternativas (o que inclui a matriz fotovoltaica) tem sido majoritariamente situado no campo que alguns autores chamam de *ecoeficiência* ou *economia verde*.

Este conceito alude a uma estratégia de desenvolvimento baseada na contínua inovação tecnológica que nos leve a sair do ciclo fóssil de energia (carvão, petróleo e gás) e a ampliar a desmaterialização da economia (NASCIMENTO, 2012), permitindo a redução paulatina das emissões de gases de efeito estufa e diversificação/transição da matriz energética mediante adoção de fontes renováveis de energia (LUND, 2007).

A chamada “Iniciativa Economia Verde” foi lançada pelo Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas bem em meio à eclosão da crise financeira no segundo semestre de 2008, com um forte apelo a um novo paradigma para a retomada do crescimento da economia mundial: “Mobilizar e reorientar a economia global para investimentos em tecnologias limpas e infraestrutura natural. Em síntese, uma economia de baixo-carbono, eficiente no uso de recursos naturais e socialmente inclusiva (UNEP, 2011, p.16).

A iniciativa da “Economia Verde” propõe uma alternativa específica: a dinamização da economia deve se dar pela expansão de setores de baixo impacto ambiental. Nesse sentido, o meio ambiente é considerado como uma força que gera novas oportunidades econômicas (CECHIN, 2010). A ideia central é que a introdução de tecnologias ambientais tem um papel determinante na melhoria da qualidade ambiental descrita pela *Curva de Kuznets Ambiental*³, isso indica que se trata de uma resposta induzida por política de incentivos a inovações tecnológicas apropriadas (ALSTINE e NEUMAYER, 2008).

Trata-se de uma “versão” contemporânea do conceito clássico de desenvolvimento sustentável, que visa dinamizar os efeitos composição e tecnológico para conciliar crescimento econômico com qualidade ambiental e inclusão social (ALMEIDA, 2012). O efeito composição refere-se a mudanças na estrutura produtiva do país que alteram o seu potencial de impacto ambiental (por exemplo, maiores investimentos no setor serviços, relativamente aos setores primário e industrial, e que tendem a melhorar a qualidade ambiental). Já o efeito tecnológico, que se dá pela introdução de tecnologias ambientais, é

³ Curva de Kuznets Ambiental (CKA): tese desenvolvida pelos autores Grossman e Krueger (1995), em que haveria uma forte tendência de aumento nos níveis de poluição durante o período inicial de crescimento econômico, mas essa poluição cairia gradativamente à medida que os países iam se tornando mais ricos. Em suma, é a ideia de que o crescimento inicial degrada o meio ambiente, porém a continuidade do crescimento resolveria os problemas ambientais.

responsável pela maior eficiência no uso dos recursos naturais e redução de poluição por unidade de produto (GROSSMAN e KRUEGER, 1995).

Uma vez que a “Iniciativa Economia Verde” reconhece o papel central das inovações tecnológicas para a promoção de uma “economia verde e inclusiva”, evidentemente que isso se vincula ao comércio mundial de tecnologias ambientais (como demonstrado na estruturação das cadeias produtivas da energia solar fotovoltaica), o que suscita preocupações de países em desenvolvimento (PED) quanto aos interesses comerciais que se espreitam por detrás dessas iniciativas, dado que partiram especialmente dos países desenvolvidos (PD).

As razões para essas preocupações se fundamentam nas condições assimétricas mercado mundial de tecnologias ambientais a favor dos PD⁴ e o nível médio de proteção tarifária mais elevado nos PED. Os PD são os principais ofertantes dessas tecnologias ambientais e os PED em geral são importadores líquidos nesse mercado. Como os mercados dos PD recebem menor proteção do que nos PED, a maior pressão para liberalização comercial recai sobre esses (ALMEIDA, 2011).

Por fim, cabe lembrar as limitações que a especialização produtiva exportadora do Brasil tende a impor às mudanças estruturais exigidas para a transição a esse “novo paradigma de desenvolvimento”. Neste ponto também se chama a atenção para o potencial de conflito entre a proposta de economia verde e o padrão de especialização produtiva exportadora do país (ALMEIDA e MAZZERO, 2011; Young, 2011).

Estudos sobre o perfil do comércio exterior brasileiro chamam a atenção para evidências de reforço da pauta exportadora concentrada nas exportações de produtos primários e semimanufaturados básicos e importações de produtos manufaturados de maior valor agregado, tal qual como ocorre na cadeia de valor da indústria fotovoltaica. O IPEA (2009, p.3) conclui: “A crise internacional parece ter acentuado uma das principais características da pauta de comércio exterior brasileira: sua elevada concentração em *commodities* e em produtos de menor intensidade tecnológica”.

3.2 Energia fotovoltaica e dependência tecnológica

No novo cenário internacional de rápidas transformações técnico-econômicas, a capacidade de absorver, gerar e difundir inovação e conhecimento se torna o principal instrumento que as economias devem buscar para que seja possível a internalização contínua do progresso técnico como um dos principais elementos capazes de elevar a produtividade do trabalho nos setores mais dinâmicos da economia e promover mudanças estruturais nas dimensões internas do sistema econômico. A inovação constitui, portanto, o ponto central no processo de desenvolvimento econômico (QUEIROZ, 2011).

Os países centrais se utilizam do domínio tecnológico em setores específicos para tornar seus produtos mais competitivos e atraentes; os países da periferia, especializados em produtos primários, sem nenhuma ou pouca dotação tecnológica, tornam-se reféns da inelasticidade da demanda dos países centrais (LINS, 2014). Cabe salientar que o progresso técnico do centro é historicamente financiado com a intensificação do comércio desigual com a periferia: cada vez mais os termos de intercâmbio vão ficando mais desvantajosos para os países que não possuem o progresso técnico como característica inerente do desenvolvimento de seu sistema econômico (PREBISCH, 1949). A inserção internacional das economias periféricas com base na exploração de recursos naturais e bens de baixo valor agregado aliado à precariedade do empresariado nacional constituem importantes obstáculos para criação de um núcleo endógeno de dinamização tecnológica.

A aquisição de tecnologia externa não é suficiente para conduzir um país ao desenvolvimento, pois para que essa inovação tenha efeito amplo sobre a economia, não basta somente a compra, mas deve haver conhecimento interno suficiente para que essa tecnologia seja interpretada, utilizada, copiada e internalizada. Desse modo, pode-se afirmar que a tecnologia não se transfere totalmente, mas se constrói (CASSIOLATO e LASTRES, 2005).

Nessa perspectiva, a tese aqui analisada enfatiza que os países periféricos devem buscar uma capacidade endógena de geração de progresso técnico - sobretudo no campo das energias renováveis em

⁴Um exemplo desse domínio do mercado de tecnologias ambientais pelos PD é do setor de energias renováveis (biocombustíveis, solar, eólica e geotérmica), onde 18 das 20 maiores empresas são oriundas desses países, a maioria da Europa (JHA, 2009).

geral, e fotovoltaica em particular -, ou seja, devem construir sua própria capacidade de desenvolver um amplo sistema de ciência, tecnologia e inovação, diminuindo a dependência externa. Se juntarmos as questões acerca dos benefícios da endogeneização do progresso técnico com o desafio da economia verde, as sinergias se multiplicam e as especificidades locais seriam mais bem aproveitadas.

A ideia de endogeneidade também prevê a vinculação das necessidades internas do desenvolvimento sustentável decididas no intuito de aumento da autonomia das economias periféricas, e o esforço para não tornar essas economias em repositório de produtos importados ou apenas a transplantação de padrões já estabelecidos de produção e consumo nos países centrais (FURTADO, 1984)⁵.

Em outras palavras, as necessidades do desenvolvimento dos países periféricos passam pela construção de um setor industrial que responda às necessidades locais e não modernização do consumo via um padrão estandarizado pelas economias centrais, pois esta reprodução é a gênese das relações de dependência e dominação tecnológica - na verdade, os países centrais que se esforçaram para conquistar um alto grau de eficácia técnica nunca tiveram nenhuma razão para repartir os seus frutos com o resto do mundo (LINS, 2014).

Desse modo, a inovação pode ser um fator-chave para fazer o link da dimensão ambiental com o desenvolvimento, aumentando assim seu caráter gerador de sinergias. As inovações podem contribuir para que os processos produtivos se tornem cada vez mais limpos com a introdução de máquinas mais eficientes e redutoras do consumo de materiais, energia e da produção de resíduos. Assim, a inovação, além de possibilitar o desenvolvimento econômico, também contribui para a preservação do meio ambiente.

3.3 Energia solar fotovoltaica: uma proposta promissora

A energia solar fotovoltaica é uma das alternativas energéticas mais promissoras para os desafios deste milênio. A rigor, o mercado fotovoltaico no mundo já apresenta capacidade acumulada total 2.247 gigawatts (GW) ao final de 2024, representando um crescimento exponencial que reflete a aceleração da transição energética global. Este montante quase duplicou em relação a 2022, quando a capacidade era de 1.2 terawatts (TW), e mais que triplicou em comparação com toda a capacidade instalada antes de 2020, evidenciando a velocidade sem precedentes de expansão do setor fotovoltaico. A distribuição geográfica dessa capacidade acumulada revela a dominância absoluta da Ásia no mercado global, particularmente da China, que concentra 1.05 terawatts, equivalente a 47% de toda a capacidade fotovoltaica instalada no mundo (REN, 2025)⁶.

O espetacular desenvolvimento da geração de energia fotovoltaica em países como Alemanha, Itália, Japão, Estados Unidos e China despertou a atenção da sociedade brasileira, principalmente de pesquisadores, investidores, ambientalistas e formuladores de políticas públicas, uma vez que nossa vantagem natural em recurso solar é flagrante. Nosso índice de irradiação é o dobro do incidente na Alemanha, Reino Unido, Japão e Coreia do Sul. O potencial técnico de geração de energia fotovoltaica no Brasil - já excluindo áreas sensíveis como Amazonia, Mata Atlântica, Pantanal, unidades de conservação, terras indígenas e quilomboas - é de 28.600 GW⁷.

⁵Segundo o Instituto de Estudos para o Desenvolvimento Industrial (IEDI), num documento de 2019 intitulado “Indústria e o futuro do Brasil”. Esta pesquisa mapeou o grau de adensamento produtivo de 26 setores e 258 classes da indústria de transformação, mensurando-o pelo Coeficiente Importado de Insumos e Componentes Comercializáveis (CIICC). Quanto mais alto este coeficiente, menor o adensamento doméstico dessas cadeias industriais. A partir desse coeficiente, busca-se identificar as classes industriais mais comprometidas pela importação de insumos intermediários, isto é, os segmentos produtivos com menor grau de transformação industrial. Foram empregados no seu cálculo, principalmente, os dados da Pesquisa Industrial Anual - Empresa (PIA-E) do IBGE. Setorialmente, a diminuição da densidade produtiva (aumento do CIICC) foi generalizada, principalmente entre os setores de alta e média-alta intensidade tecnológica. Entre 2003/2004 e 2013/2014, a categoria de maior densidade e complexidade tecnológica apresentou aumento significativo do CIICC, de 26,3% para 38,7% no período em questão, puxada sobretudo pelos setores de informática, eletrônicos e ópticos - setores com aumento de quase 20 pontos percentuais (p.p.).

⁶ Apenas no ano de 2024, foram incorporados à oferta mundial entre 597 e 602 giga watts de nova capacidade, representando um aumento de 32% a 33% em relação a 2023, quando 456 giga watts foram adicionados (REN, 2025).

⁷ O potencial solar fotovoltaico brasileiro é 28.500 GWp para aplicações em geração centralizada (acima de 01 GW de potência), e 164,1 GWp em aplicações de geração distribuída.

Este potencial é 200 vezes maior tudo o que produzimos em energia elétrica, considerando todas as fontes, e 4.683% maior que as fontes hídrica e eólica juntas. Porém, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2025 (ano-base 2024), a energia solar representa 12,3% da capacidade instalada da matriz energética brasileira (respondendo por 11,8% da geração de eletricidade em 2024, aproximando da matriz eólica que foi de 12,2%), uma vez que nossa matriz energética brasileira ainda é marcadamente de base hidráulica (68,1%).

O Brasil se insere nesse contexto como um ator de grande potencial. O país possui uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, com cerca de 83% de sua eletricidade proveniente de fontes renováveis. No entanto, a diversificação da matriz tem sido uma prioridade, e a energia solar emergiu como a principal aposta. A capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no Brasil experimentou um crescimento exponencial, saltando de meros 8 MW em 2013 para mais de 50 GW no início de 2025, o que levou a fonte a responder por mais de 20% da capacidade instalada total do país (ABSOLAR, 2025). Esse crescimento posicionou o Brasil como o 6º maior mercado de energia solar do mundo em 2023.

O potencial brasileiro, contudo, está longe de ser esgotado. Com níveis de irradiação solar que estão entre os mais altos do mundo, o potencial técnico para a geração solar fotovoltaica no país é estimado em dezenas de giga watts. A Tabela 1, a seguir, resume a evolução da capacidade instalada no Brasil, evidenciando a aceleração recente.

Tabela 1- Evolução da capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no brasil (2013-2025)

Ano	Capacidade acumulada (GW)
2013	0,08
2015	0,041
2017	1,296
2019	4,615
2021	13,055
2023	37,647
2024	50,675
2025	53,998

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da ANEEL e ABSOLAR (2025).

O território da Alemanha, nação que lidera o desenvolvimento de tecnologias desse tipo de energia, tem tamanho correspondente a cerca de 5% do território brasileiro. No Brasil, a necessidade de energia poderia ser suprida com 2.400 km² de painéis, o que representa menos de 0,03% da área do país. Devido a maiores incidências de radiação solar, o tempo de retorno energético ou *playback energy* (a relação entre a energia estimada gasta para a produção e a energia produzida do mesmo componente) é

potencialmente menor que o de outros países (VIVACQUA, 2016)⁸.

Outro condicionante favorável à expansão da energia sola no Brasil refere-se ao nosso regime hidrológico. As crises hídricas vigentes agravaram o atual modelo de regulação do sistema elétrico brasileiro, o que torna costumeiro o aumento de tarifas energéticas para suprir a falta de recursos das concessionárias para cobrir seus custos financeiros e consequente pressão econômica derivada da crise energética⁹.

Atualmente, 49,06% dos consumidores de energia fotovoltaica no Brasil são clientes residenciais (PORTAL SOLAR, 2025), que pagam a alíquota mais cara e que, portanto, obtém um retorno sobre o investimento num tempo mais rápido - no Brasil, a média é de 3 a 5 anos o tempo de *payback* (CANALSOLAR, 2025). Como o tempo de vida útil do sistema é de 25 anos, tem-se por volta de 19 anos de energia disponível praticamente gratuita.

A energia fotovoltaica tem se mostrado a fonte de energia renovável de mais rápido avanço tecnológico da atualidade. De 2010 a 2023, o custo global médio de energia solar fotovoltaica caiu aproximadamente entre 80% e 90% na última década, (IRENA, 2026). Trata-se de uma tecnologia de baixo impacto ambiental¹⁰, e que permite a redução das perdas elétricas e maior autonomia energética.

A utilização de energias renováveis, além de apresentar um impacto ambiental menor, ainda tem o potencial de se constituir uma cadeia de valor que promova a geração de empregos qualificados, desenvolvimento tecnológico e geração de excedentes financeiros. Países como Alemanha, China, Coreia, Japão e Estados Unidos tem em seus programas energéticos renováveis uma notória fonte de emprego e renda¹¹. A indústria fotovoltaica tende a gerar de cerca de 10 a 30 empregos diretos e indiretos para cada MW instalado por ano, dependendo da intensidade de atividades de instalação, operação e manutenção (ABDI, 2019).

4. Resultados e discussões

4.1 Cadeia produtiva da indústria solar fotovoltaica

Um sistema fotovoltaico produz energia elétrica a partir da radiação solar captada por células fotovoltaicas constituídas de materiais semicondutores. O núcleo da cadeia produtiva está na produção industrial das células e dos módulos fotovoltaicos e equipamentos elétricos e eletrônicos auxiliares para a transformação, armazenamento e controle da energia gerada. Nesta seção vamos apresentar um quadro da indústria de geração de energia fotovoltaica no mundo e no Brasil e, em particular, da produção de seu principal insumo, o silício cristalino em grau solar (Si-GS), com o qual se produzem as células fotovoltaicas.

A indústria fotovoltaica é composta pelas empresas envolvidas nas diversas etapas de produção de sistemas fotovoltaicos, composta de seis grandes segmentos: (i) empresas de consultoria em sistemas solares; (ii) empresas do setor de purificação de silício; (iii) empresas produtoras de materiais semicondutores fotovoltaicos (células e módulos); (iv) empresas (produtoras e representantes) de painéis fotovoltaicos; (v) empresas de equipamentos auxiliares e material elétrico e eletrônico (baterias, acumuladores, sensores, inversores, controladores de carga); (vi) e empresas especializadas em serviços

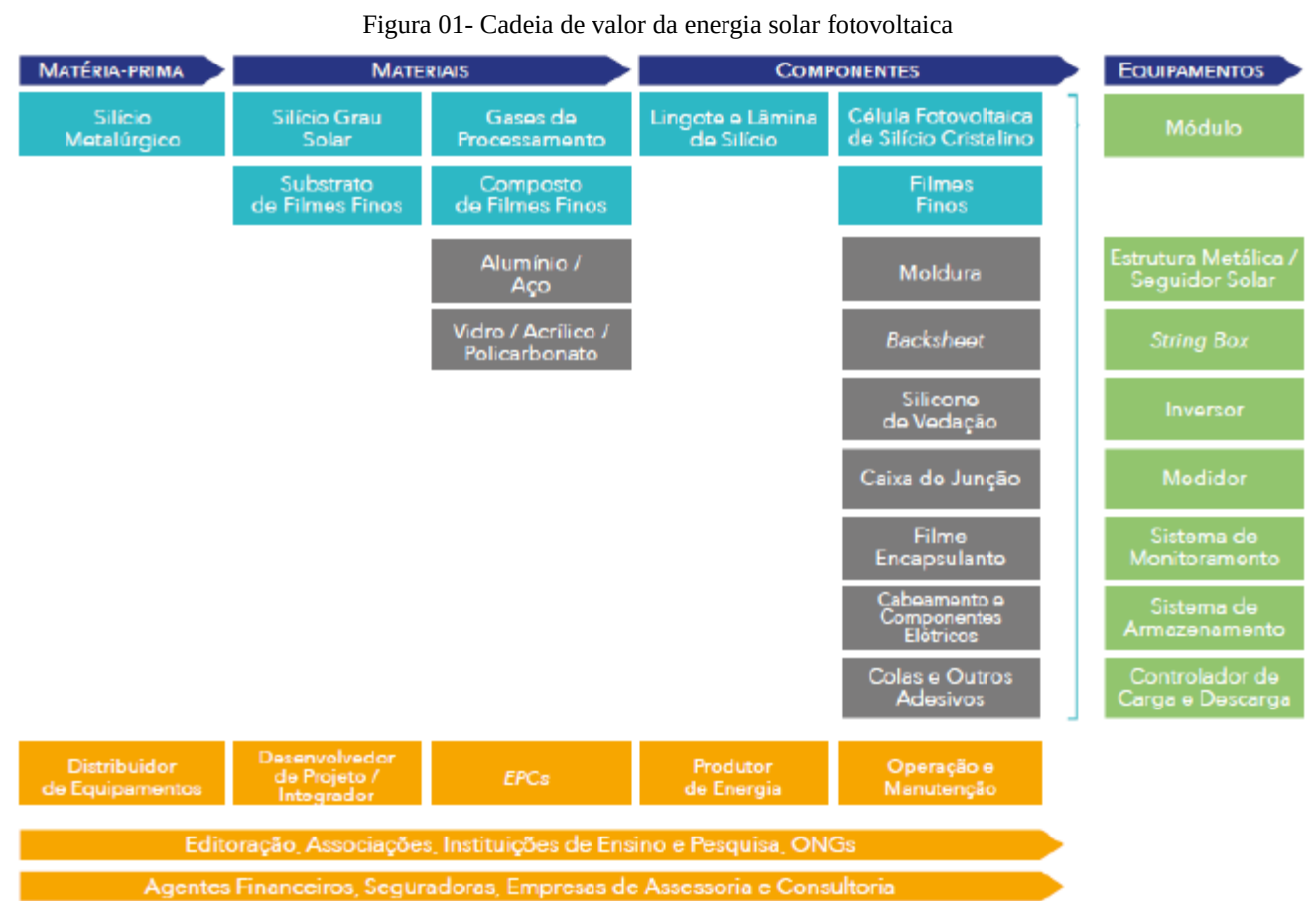
⁸ A título de comparação, em estados com melhor irradiação (tais como Goiás, Bahia, Minas Gerais), o tempo de *pay-back* financeiro de implantação de um sistema fotovoltaico residencial é 3-4 anos, enquanto que na Alemanha é de 4-5 anos e Dinamarca é de 5-6 anos (CANALSOLAR, 2021).

⁹ Nos anos 2013 e 2014 ocorreu um dos piores biênios de precipitação da história recente da hidrologia fazendo com que todas as usinas térmicas fossem acionadas por diversos meses. O preço da energia apresentou uma elevação média de 45% apenas no ano de 2015 (ANEEL, 2016).

¹⁰ Aproximadamente 90% dos componentes de um SFV são recicláveis (vidros, metais, polímeros, dentre outros). O programa europeu PV Cycle consegue recuperar/reciclar 96% dos componentes de um módulo fotovoltaico de silício cristalino (ABSolar, 2017).

¹¹ Estima-se que, em 2023, a indústria fotovoltaica tenha gerado aproximadamente 7,1 milhões de empregos no mundo. Só na China, cerca de 7,4 milhões de pessoas trabalham direta ou indiretamente no ramo de energias renováveis, um número relevante se comparado aos aproximadamente 11,8 milhões de empregos vinculados globalmente ao complexo de petróleo e gás. Nos EUA, em 2023, são cerca de 279.447 empregos no segmento solar, numa capacidade instalada anual de aproximadamente 32,4 GW, resultando em cerca de 8,6 empregos por MW instalado, superando proporcionalmente a intensidade de geração de empregos da indústria de recursos fósseis (IEA, 2023).

de instalação e manutenção (ABDI, 2012). A figura abaixo representa analiticamente a cadeia de valor da indústria fotovoltaica envolvendo todos as fases, componentes e serviços abrangidos no processo.



Fonte: SEBRAE (2017).

4.1.1 A cadeia de valor do silício grau solar (Si-GS)

A matéria-prima para a fabricação do silício grau solar (Si-GS), base das células solares das placas fotovoltaicas, é o silício grau metalúrgico (Si-GM)¹². O processo de obtenção de Si-GM com um grau de pureza entre 98 e 99,5% ocorre a uma temperatura de 1.900°C, consumindo grande quantidade de energia elétrica (de 12 a 15 kWh/Kg) e água (VIVACQUA, 2016).

O principal componente mineral em que o silício está presente é o quartzo (SiO2), um dos mais abundantes minerais da crosta. O Brasil é o maior produtor do mundo, com 230 milhões de toneladas por ano, sendo 90% destinado a China. O país possui grandes reservas de quartzo de boa qualidade e uma indústria metalúrgica consolidada e competitiva no mercado internacional - O Brasil é também um dos maiores produtores mundiais de silício metalúrgico, com produção anual de aproximadamente 0,20 milhões de toneladas (200 mil toneladas), o que corresponde a cerca de 6% da produção mundial em 2024. Cerca de 60% da produção nacional é voltada para a exportação (ABRAFE, 2024).

O Si-GM passa por um processo de solidificação¹³ para se produzir as lâminas de Silício Grau Solar (Si-GS), que é a matéria-prima básica mais utilizada atualmente para a composição das células fotovoltaicas. Para a construção de dispositivos semicondutores, é necessário um silício de maior pureza, que pode ser obtido por métodos físicos ou químicos¹⁴. Os cristais de silício previamente purificados

¹² Cerca de 8 a 10% do silício metalúrgico é utilizado para esse fim (COUTINHO e OLIVEIRA, 2014).

¹³ Na verdade, a definição do que seja Si-GS e seus processos de fabricação constituem áreas em aberto no desenvolvimento tecnológico, abrangendo diversos métodos de rotas químicas alternativas, tais como o processo *Siemens* e o processo *Czochralski*.

¹⁴ Os métodos físicos de purificação do silício metalúrgico baseiam-se na maior solubilidade das impurezas contidas no silício líquido, de forma que este se concentre nas últimas zonas solidificadas. Os métodos químicos de purificação do silício

(99,9999%) são transformados em lingotes, que são fatiados em pastilhas finas (> 200 microns) formando placas (*wafers*), que serão montadas em células usadas para a construção de módulos (a menor unidade dos painéis que formam o sistema).

O processo tecnológico de transformação do Silício Grau Metalúrgico (Si-GM) em Silício Grau Solar (Si-GS) é intensivo em tecnologia e capital (representando cerca de 40% a 50% do custo de produção do polissilício, devido ao alto consumo energético e à complexidade do processo Siemens ou FBR), apesar do peso estratégico desse insumo, o silício possui baixa representatividade na estrutura de custos geral de um módulo fotovoltaico, sendo de aproximadamente 3% a 5% (FRAUNHOFER, 2024).

Atualmente, mais de 90% dos módulos fotovoltaicos produzidos são de silício (NREL, 2023), que podem ser monocristalino (de maior pureza, maior eficiência, maior preço) ou policristalino (menor pureza, menor eficiência, menor preço). A produção de Si-GS no Brasil é praticamente inexistente, assim como a produção de células, tendo em vista a falta de domínio completo da tecnologia de purificação do silício, as economias de escopo envolvidas nos processos de fabricação e as dificuldades de se produzir em escala industrial.

Segundo IEA (2022), de uma forma geral, a cadeia produtiva da indústria fotovoltaica é bastante heterogênea, apresentando, portanto, múltiplas estruturas competitivas. A produção de Si-GS (polissilício grau solar) é dominada por um conjunto pequeno de empresas no mundo, muitas delas de elevado porte e atuação global — não por acaso, é neste ponto da estrutura que ocorre a maior agregação de valor, cerca de 50% a 55% de toda a cadeia de valor do *upstream* fotovoltaico¹⁵. Nesse sentido, o crescimento do mercado de energia solar fotovoltaica no Brasil tende a reproduzir relações neocoloniais e reforçar a inserção subordinada do país enquanto exportador de *commodities*. Um exemplo sintomático desta assimetria reside na venda para o exterior de cristais de quartzo (material básico para a fabricação do silício) por US\$ 0,0267/kg (OEC, 2026) e, após sua purificação nos Estados Unidos, Europa e China, o país adquire por US\$ 3,50/kg o Si-GS.

Tabela 2 - Estrutura da cadeia e agregação de valor de sistemas de energia solar fotovoltaica

Elo da cadeia	Agregação de valor (%)	Preço aproximado	Observações
(a) Silício Grau Metalúrgico (Si-GM)	~2-3%	US\$ 0,027/kg	<i>Commodity</i> de baixo valor
(b) Silício Grau Solar (Si-GS)	~50-55%	US\$ 3,50/kg	Elo crítico, tecnologia intensiva
(c) Lingotes de Si	~10-12%	US\$ 4,50-5,00/kg	Processamento intermediário
(d) Wafers de Si	~12-15%	US\$ 5,50-6,50/kg	Corte e processamento
(e) Células fotovoltaicas	~15-18%	US\$ 0,15-0,20/Wp	Fabricação de células

são conhecidos como: **(a) Processo Siemens** - as barras de silício reduzido ou metalúrgico (cujo grau de pureza chega até a 99,5%) são expostas, à temperatura de 1.150°C, ao gás triclorossilano, que se decompõe e deposita o silício puro nas barras, fazendo com que se atinja uma pureza aproximada de 99,9999999%; **(b) O processo DuPont** consiste em reagir tetracloreto de silício, à temperatura de 950°C, com vapores de zinco. Esse último método, entretanto, está repleto de dificuldades (por exemplo, o cloreto de zinco, subproduto da reação, solidifica-se e provoca a obstrução das linhas de produção), por isso foi abandonado em favor do processo Siemens. O silício de grau eletrônico (Si-GE) apresenta o mais alto grau de pureza e é utilizado para a fabricação, pelo **método Czochralski**, do silício monocristalino, que é usado nas indústrias de semicondutores e fotovoltaica (ABDI, 2012)

¹⁵ Disponível em: <https://climaesociedade.org/wp-content/uploads/2025/08/Estudo-Silicio-Industrial.pdf>. Acesso em: 18.02.2026.

Elo da cadeia	Agregação de valor (%)	Preço aproximado	Observações
(f) Módulos fotovoltaicos	~8-10%	US\$ 0,20-0,25/Wp	Montagem e encapsulamento

Fonte: IEA (2022)

Os principais países produtores de SI-GS em escala mundial são: China, Alemanha, Estados Unidos e Malásia, respondendo por aproximadamente 90% da produção global. Atualmente, o processo de produção do Si-GS é bem mais concentrado e é dominado mundialmente por poucos agentes quando comparado com o de *wafer*, células e módulos solares — correspondendo a cerca de 10% a 15% da estrutura empresarial por elo da cadeia de equipamentos fotovoltaicos no mundo. Ao final de 2024, a sua produção global foi de cerca de 1.000 mil toneladas (1 milhão de toneladas). Mais de 60% da produção total vem de empresas como a Tongwei (China), GCL Technology (China), Daqo New Energy (China) (IEA, 2024). Essa concentração se deve aos altos custos de construção de uma planta industrial¹⁶ (cerca de US\$ 800 milhões e US\$ 1,2 bilhão¹⁷ para uma capacidade instalada de 10 mil toneladas/ano) e pelo processo ser dominado por poucos países, o que dificulta a entrada de novos *players* nesse mercado (MEI, 2013).

A heterogeneidade da cadeia é observada também nas barreiras à entrada, medidas apenas pelas necessidades de capital. Para a produção de Si-GS, o volume de capital é aproximadamente 200% a 300% maior do que para a produção de *wafers*, células e módulos juntos, considerando o CAPEX¹⁸ por tonelada instalada e a intensidade energética do processo Siemens/FBR. Ou seja, de maneira geral, a partir do elo de produção de Si-GS, o avanço a jusante na cadeia revela um menor poder de barganha das empresas atuantes. Nestes casos, a concorrência é mais em preço do que em domínio da tecnologia e reputação, como é no caso da produção de silício.

4.2 Evolução tecnológica e de custos da indústria fotovoltaica

A viabilidade econômica da energia solar é um fenômeno recente, impulsionado por uma drástica redução de custos ao longo de toda a sua cadeia produtiva. Conforme previsto pela Lei de Wright, os custos da tecnologia fotovoltaica caíram de forma consistente com o aumento da escala de produção. O preço dos módulos solares, por exemplo, caiu mais de 90% na última década (IRENA, 2026). Essa curva de aprendizado transformou a energia solar de uma fonte de nicho para uma das fontes de eletricidade mais baratas da história em muitos países, com custos nivelados de energia (LCOE) chegando a valores tão baixos quanto \$0,04/kWh (IRENA, 2026).

A tecnologia dominante no mercado global é a baseada em silício cristalino (c-Si), que responde por mais de 95% dos painéis produzidos. A evolução tecnológica tem se concentrado no aumento da eficiência das células fotovoltaicas (que em painéis comerciais já supera 22%), na otimização dos processos de fabricação e no aumento do tamanho dos *wafers* de silício para reduzir os custos por watt (NREL, 2023).

No entanto, a estrutura de custos de um sistema fotovoltaico vai além dos módulos. A análise de custos de um sistema típico (conhecida como *cost breakdown*) revela a importância de diversos outros componentes e serviços. A Tabela 3 apresenta uma decomposição aproximada dos custos para um sistema fotovoltaico completo:

¹⁶ A fase de fabricação de Si-GS consome aproximadamente 49% de toda a energia necessária para se estruturar uma cadeia de valor da energia fotovoltaica, tendo por base uma capacidade de processamento inicial de 35.000 ton de Si-GM. O investimento total para implantação integrada de toda a cadeia produtiva seguindo essas premissas é de 01 bilhão de euros, 4,5 a 5,5 bilhões de reais (IDEAL, 2017).

¹⁷ Fonte: <https://www.thestreet.com/investing/stocks/memc-samsung-deal-who-wins-who-loses-11010968>

¹⁸ CAPEX é a sigla para Capital Expenditure, que em português significa Despesa de Capital ou Investimento em Capital Fixo.

Tabela 3- Estrutura de custos de um sistema fotovoltaico completo

Componente	Custo (%)	Classificação ABC ¹⁹	Observação
Módulos fotovoltaicos	35-40%	A	Componente dominante
Inversores	10-15%	A	Crítico para eficiência
Estrutura de montagem	8-12%	A	Necessário para instalação
Cabos e conectores	3-5%	B	Importante para segurança
Transformadores	2-4%	B	Necessário em sistemas grandes
Proteção e monitoramento	2-3%	B	Essencial para operação
Instalação e mão de obra	10-15%	A	Custo operacional significativo
Engenharia e projeto	2-3%	B	Planejamento
Permissões e conexão	2-3%	B	Custos administrativos
Outros (BOP)	5-10%	C	Componentes menores

Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados da Energy Sage (2026).

Essa estrutura de custos torna-se um componente fundamental para a análise da dependência econômica e tecnológica da cadeia produtiva fotovoltaica. Embora os módulos representem a maior parcela individual do *hardware* (35-40%), outros componentes tecnológicos, como os inversores (10-15%), são igualmente críticos. Além disso, os chamados "custos soft" (mão de obra, projeto, licenciamento, etc.) representam uma parcela significativa do total, indicando que há um potencial relevante para a geração de valor e empregos localmente, mesmo em um cenário de importação de *hardware*. Além disso, cabe ressaltar aqui que, a análise detalhada de estudos sobre o sistema de custos de fabricação de módulos fotovoltaicos, as células solares monocristalinas correspondem de 45-55% dos componentes internos (DAVIS et al, 2014), e para a fabricação de células monocristalinas, o processo de purificação de Si-Gi corresponde de 25-30% da etapa de produção, o que demonstra que são elos da cadeia altamente intensivos e, tecnologia (cerca de 70-80%) (WOODHOUSE et al, 2019).

¹⁹ Classificação ABC típica: (a) Classe A: 20% dos itens que representam 80% do valor/custo; (b) Classe B: 30% dos itens que representam 15% do valor/custo; (c) Classe C: 50% dos itens que representam 5% do valor/custo (KHEYBARI et al, 2019).

4.3 Análise da cadeia de valor e a dependência brasileira

Em relação à cadeia de valor, 10 elos ainda não estão presentes no Brasil, principalmente aquelas relacionadas à produção do Si-GS, lingotes e células fotovoltaicas. O setor fotovoltaico brasileiro pode ser caracterizado pela presença de empresas atuantes apenas nas extremidades da cadeia: produção de silício metalúrgico e montagem de módulos.

O domínio tecnológico e a escala de produção ao longo dessa cadeia estão altamente concentrados. A China, como resultado de uma política industrial agressiva e de longo prazo, estabeleceu uma posição hegemônica em todos os elos. O país detém mais de 80% da capacidade de produção mundial em cada uma das etapas de fabricação, do poli silício aos módulos (IEA, 2022). Essa concentração confere ao país um poder de mercado significativo e torna a cadeia de suprimentos global vulnerável a gargalos e disputas geopolíticas.

Porém, o Brasil ainda não é sequer autossuficiente na montagem dos painéis solares, dada a importância de ambos num projeto fotovoltaico. Entre 2023 e 2024 as importações brasileiras de painéis solares passaram de aproximadamente US\$ 4,7 bilhões em 2023 para cerca de US\$ 6,2 bilhões em 2024, um crescimento de aproximadamente 31%. No mesmo período, importamos de cerca de US\$ 280 milhões em 2023 para aproximadamente US\$ 410 milhões em 2024 de células solares, crescimento de aproximadamente 46% (OEC, 2025).

As poucas fábricas de módulos fotovoltaicos localizadas no Brasil estão esmagadoramente concentradas no estado de São Paulo, em especial no eixo Campinas–Sorocaba–São Paulo, que concentra entre 60% e 70% dos fabricantes nacionais de módulos, estruturas metálicas, inversores e *string box* (ABSOLAR, 2024).

Dentre as principais estratégias das empresas do segmento de energia solar fotovoltaica no Brasil, prevê-se um forte movimento de entrada de grandes empresas globais, além de fusões e aquisições no setor. Um sintoma desse fenômeno pode ser identificado ao se analisar o ranking das empresas vencedoras dos leilões de energia solar fotovoltaica realizados no Brasil de 2014 a 2024, pois das 10 maiores empresas participantes, 7 são de capital estrangeiro. O Brasil ocupa o 6º lugar no ranking de 108 países como polo de investimento internacional em energia renovável (BLOOMBERGNEF, 2024).

Em 2024, as importações de módulos montados representaram aproximadamente 88% de todo o valor importado em equipamentos fotovoltaicos, totalizando mais de US\$ 6,2 bilhões. Cerca de 85% desses equipamentos vieram da China (MDIC, 2025). A análise da curva ABC²⁰ aplicada aos custos de um sistema fotovoltaico, evidencia a concentração da dependência. Os itens da "Classe A" – aqueles poucos componentes que respondem pela maior parte do custo total (tipicamente 80%) – são precisamente os de maior conteúdo tecnológico e os mais dependentes de importação: os módulos e os inversores. Os itens da "Classe B" (como estruturas) e "Classe C" (cabos, conectores) têm maior potencial de fornecimento local, mas representam uma parcela menor do valor total do *hardware*.

Essa estrutura de dependência tem implicações diretas para a economia brasileira. A massiva importação de equipamentos pressiona a balança de pagamentos e expõe o custo da transição energética no país às flutuações da taxa de câmbio e às decisões de política comercial da China. Além disso, a concentração da indústria local na etapa de montagem e instalação, embora gere empregos, limita a criação de postos de trabalho de maior qualificação em P&D, engenharia de produção e design de componentes, que são os que mais agregam valor e promovem o desenvolvimento tecnológico de longo prazo.

4.4 Discussão: Dependência, desindustrialização verde e os desafios da política industrial

Os dados apresentados na seção anterior, quando analisados sob a ótica da teoria da dependência, revelam que o processo de transição energética no Brasil, no que tange à energia solar fotovoltaica, está reproduzindo padrões históricos de desenvolvimento caracterizados pela modernização conservadora e pela dependência tecnológica. A rápida expansão da capacidade instalada, embora positiva do ponto de

²⁰ A Análise ABC, também conhecida como Princípio de Pareto ou Regra 80/20, é uma metodologia de classificação que agrupa itens em categorias de acordo com sua importância relativa. No contexto de sistemas fotovoltaicos, a análise ABC classifica os componentes conforme sua contribuição ao custo total ou impacto na performance (KHEYBARI et al, 2019).

vista ambiental, mascara a fragilidade estrutural de um modelo que abdica do desenvolvimento de capacidades produtivas e tecnológicas endógenas em um setor estratégico do século XXI.

A situação atual da indústria fotovoltaica brasileira atual espelha com precisão a dinâmica do subdesenvolvimento descrita desde a obra “O Mito do desenvolvimento econômico”, de Celso Furtado. O país participa do setor não como um produtor de tecnologia, mas primordialmente como um consumidor e montador de componentes importados. A “mimese tecnológica” se manifesta na adoção de tecnologias desenvolvidas e produzidas em massa nos países centrais (neste caso, a China), sem a correspondente internalização do conhecimento e do domínio sobre os processos produtivos mais complexos. O Brasil está, efetivamente, importando a “revolução solar”, em vez de ser um protagonista ativo nela.

As consequências dessa dinâmica são múltiplas e interligadas. Primeiramente, há um impacto direto e negativo na balança de pagamentos. A necessidade de importar bilhões de dólares em equipamentos anualmente para sustentar a expansão da capacidade solar cria uma nova fonte de vulnerabilidade externa. O custo da energia limpa no Brasil torna-se atrelado não apenas às condições climáticas, mas também à taxa de câmbio e à política de preços dos fornecedores chineses. Essa é a clássica armadilha da dependência: o dinamismo de um setor interno passa a ser um reflexo das condições e decisões tomadas fora das fronteiras do país (DOS SANTOS, 1970).

Em segundo lugar, o modelo atual contribui para um processo de “desindustrialização verde”. Embora o setor de instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos seja um importante gerador de empregos, esses são, em sua maioria, postos de trabalho no setor de serviços, com menor qualificação e remuneração média quando comparados aos empregos industriais em P&D, engenharia e manufatura de alta tecnologia. Ao renunciar à produção dos componentes de maior valor agregado, o Brasil abre mão de criar os “empregos verdes de qualidade” que são um dos pilares de uma transição energética justa (HEFFRON e MCCAULEY, 2018). O valor gerado pela inovação e pela produção de alta tecnologia é capturado pelos países que dominam a cadeia produtiva, enquanto ao Brasil resta a parcela menos nobre do processo.

O contraste com a trajetória de outros países é gritante. Nações como Alemanha, China e, mais recentemente, os Estados Unidos, não separaram suas políticas energéticas de suas políticas industriais (JACOBSSON e LAUBER, 2006; DE LA TOUR et al, 2011). Eles entenderam que a transição energética é também uma corrida pela liderança industrial e tecnológica. Por meio de subsídios, investimentos em P&D, exigências de conteúdo local e outras ferramentas, esses países criaram as condições para que suas empresas pudessem competir e dominar a cadeia de valor global. A ausência de uma política industrial brasileira robusta e de longo prazo para o setor fotovoltaico deixa o mercado nacional à mercê da concorrência internacional, em um campo onde os principais players globais operam com forte apoio de seus respectivos Estados.

O argumento de que a importação é justificada pelos preços mais baixos dos equipamentos chineses, embora factualmente correto no curto prazo, é economicamente míope sob uma perspectiva de desenvolvimento de longo prazo. Ele ignora as externalidades positivas associadas à produção local, como o aprendizado tecnológico (*learning-by-doing*), a criação de encadeamentos produtivos, o desenvolvimento de fornecedores locais e a geração de inovações. A opção pela importação em detrimento da produção local é, em essência, a opção por um atalho que, no futuro, pode custar ao país sua autonomia tecnológica e sua capacidade de competir em uma das indústrias mais importantes do futuro.

Em suma, a análise dos dados à luz do referencial teórico da dependência sugere que a expansão da energia solar no Brasil, apesar de seus méritos ambientais, está ocorrendo de forma a aprofundar a dependência tecnológica e a reforçar um padrão de especialização produtiva de baixo valor agregado. Sem uma mudança de rota, por meio de uma política industrial ativa e estratégica, a transição energética corre o risco de ser mais um capítulo na longa história do subdesenvolvimento brasileiro.

5. Conclusão

Este artigo se propôs a analisar as persistentes contradições da transição para uma economia verde no Brasil, utilizando como estudo de caso a expansão da energia solar fotovoltaica. A pesquisa demonstrou que, embora o crescimento da energia solar na matriz elétrica brasileira seja um avanço inegável do ponto de vista da sustentabilidade ambiental, o modelo que sustenta essa expansão reedita antigos padrões de dependência econômica e tecnológica que historicamente marcaram o subdesenvolvimento do país.

A análise da cadeia de valor revelou uma profunda vulnerabilidade estrutural. O Brasil, apesar de seu imenso potencial solar e de um mercado interno em franca expansão, posiciona-se como um mero consumidor de tecnologias desenvolvidas e produzidas em outros países, notadamente na China. A indústria nacional restringe-se, em grande parte, a elos de menor valor agregado, como a montagem de módulos com componentes importados e a prestação de serviços de instalação. Os segmentos mais nobres e intensivos em tecnologia da cadeia, como a produção de poli silício, *wafers* e células fotovoltaicas, permanecem fora do alcance do país, consolidando um quadro de dependência que, conforme a teoria de Celso Furtado, condiciona o dinamismo interno às decisões e flutuações do centro do sistema econômico global.

As implicações dessa dependência são preocupantes. Economicamente, ela gera uma pressão contínua sobre a balança de pagamentos e submete o custo da transição energética à volatilidade cambial e à geopolítica do comércio internacional. Socialmente, ela limita o potencial de geração de empregos de alta qualificação e renda, concentrando as oportunidades em serviços de menor complexidade e perpetuando a especialização produtiva de baixo valor agregado. Tecnicamente, ela inibe o desenvolvimento de capacidades inovativas endógenas, essenciais para a autonomia e a competitividade do país no longo prazo.

O contraste com a estratégia de nações desenvolvidas e da própria China é elucidativo. Esses países demonstraram que a liderança no setor de energias renováveis não é fruto do acaso ou do livre mercado, mas sim de políticas industriais ativas, coordenadas e de longo prazo, que integram metas energéticas com objetivos de desenvolvimento industrial e tecnológico. A ausência de uma política similar no Brasil representa uma renúncia estratégica a transformar a transição energética em um verdadeiro vetor de desenvolvimento sustentável e soberano.

Diante do exposto, a conclusão central deste trabalho é que a sustentabilidade da transição energética brasileira não pode ser medida apenas em megawatts de capacidade instalada ou em toneladas de carbono evitadas. Uma transição verdadeiramente sustentável e justa requer a superação da dependência tecnológica e o adensamento das cadeias produtivas locais. Isso exige uma mudança de paradigma na política pública, com a formulação e implementação de uma política industrial para o setor de energias renováveis que utilize o poder de compra do Estado e o vasto mercado interno para fomentar a produção local, atrair investimentos para os elos mais complexos da cadeia, estimular a pesquisa e o desenvolvimento e, *pari passu*, desenvolver inteligência nacional no setor.

REFERÊNCIAS

- ABDI – AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Avaliação das perspectivas de desenvolvimento tecnológico para a indústria de bens de capital para energia renovável (PDTS-IBKER)**. Brasília, 2012.
- ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Relatório anual do setor fotovoltaico 2024**. São Paulo: ABSOLAR, 2024.
- ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Publicações e relatórios setoriais**. São Paulo, 2025.
- ABRAFE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FERROLIGAS E SILÍCIO METÁLICO. **Relatório setorial do silício metálico 2024**. Belo Horizonte: ABRAFE, 2024.
- ALMEIDA, Luciano Tomé de; MAZZERO, Mariana Ferreira. **O comércio bilateral Brasil–União Europeia de 1989-2009: a persistência da vulnerabilidade ambiental**. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA ECOLÓGICA, 9., 2011, Brasília. Anais [...]. Brasília: UnB, 2011.
- ALSTINE, James Van; NEUMAYER, Eric. **The Environmental Kuznets Curve**. In: GALLAGHER, Kevin P. (ed.). *Handbook on Trade and the Environment*. Cheltenham: Edward Elgar, 2008. p. 49-59.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Banco de Informações de Geração – BIG**. Brasília, 2025. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 18 fev. 2026.
- AURIGA SECURITIES; STIFEL. **Analysis of capital expenditures for polysilicon plant expansion costs (US\$ 800 million – US\$ 1.2 billion for 10 000 t capacity)**. 2023. Disponível em: <https://www.thestreet.com/investing/stocks/memc-samsung-deal-who-wins-who-loses-11010968>. Acesso em: 18 fev. 2026.
- BAIN & COMPANY; GÁS ENERGY. **Potencial de diversificação da indústria química brasileira**. Rio de Janeiro, 2014.
- BERNREUTER RESEARCH. **Polysilicon market outlook 2024**. Würzburg, 2024.
- BLOOMBERGNEF. **Climatescope 2024: emerging markets renewable energy investment ranking**. New York: BloombergNEF, 2024.
- BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Geração de energia solar fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento da cadeia local de fornecedores**. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 31, n. 59, p. 57-118, 2025.
- BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. **Dispõe sobre a geração distribuída de energia elétrica**. *Diário Oficial da União*, Brasília, 7 jan. 2022.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio. **Nova Indústria Brasil – Plano de ação para a neointustrialização 2024-2026**. Brasília, 2025.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Brasil bateu recorde em 2024 na expansão da matriz elétrica com o acréscimo de 10,9 GW**. Brasília, 10 jan. 2025.
- CANAL SOLAR. **Em quanto tempo o sistema solar retorna o investimento?** 5 jan. 2025. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/em-quanto-tempo-o-sistema-solar-retorna-o-investimento/>. Acesso em: 18 fev. 2026.
- CANAL SOLAR. **What is the payback time on investment in residential solar energy?** 2021. Disponível em: <https://canalsolar.com.br>. Acesso em: 18 fev. 2026.
- CASSIOLATO, José Eduardo; LASTRES, Helena Maria Martins. **Tecnoglobalismo e o papel dos esforços de P&D&I de multinacionais no mundo e no Brasil**. *Parcerias Estratégicas*, n. 20, 2005.
- CECHIN, Andrei. **A natureza como limite da economia**. São Paulo: Senac; Edusp, 2010.
- DE LA TOUR, Alain; GLACHANT, Matthieu; MÉNIÈRE, Yann. **The role of industrial policy in the development of solar PV in China**. *Energy Policy*, v. 39, n. 7, p. 3947-3958, 2011.
- DOS SANTOS, Theotonio. **The structure of dependence**. *American Economic Review*, v. 60, n. 2, p. 231-236, 1970.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço energético nacional 2025 – Ano base**

2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). **Photovoltaics report 2024**. Freiburg, 2024.

FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS (ISE). **Photovoltaics report 2025**. Freiburg, 2025.

FURTADO, Celso. **Introdução ao desenvolvimento**. São Paulo: Paz e Terra, 2000.

FURTADO, Celso. **O mito do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Paz e Terra, 1974.

GROSSMAN, Gene M.; KRUEGER, Alan B. **Economic growth and the environment**. *Quarterly Journal of Economics*, v. 110, n. 2, p. 353-377, 1995.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Solar PV global supply chains**. Paris: IEA, 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook 2025**. Paris: IEA, 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy employment 2023**. Paris: IEA, 2023.

IEA-PVPS. **Trends in photovoltaic applications 2024**. Paris, 2024.

IEA-PVPS. **Trends in photovoltaic applications 2025**. Paris, 2025.

INSTITUTO CLIMA E SOCIEDADE. **Oportunidades e perspectivas para o silício industrial no Brasil**. Rio de Janeiro, 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable capacity statistics 2025**. Abu Dhabi, 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable power generation costs in 2023**. Abu Dhabi, 2024.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Solar PV global supply chains**. Abu Dhabi, 2022.

JACOBSSON, Staffan; LAUBER, Volkmar. **The politics and policy of energy system transformation**. *Energy Policy*, v. 34, n. 3, p. 256-276, 2006.

JHA, Veena. **Trade flows, barriers and market drivers in renewable energy supply goods**. Geneva: ICTSD, 2009.

NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Solar PV global supply chains**. 2023.

OBSERVATORY OF ECONOMIC COMPLEXITY (OEC). **Brazil – solar panels imports 2023–2024**. Cambridge, 2025. Disponível em: <https://oec.world>. Acesso em: 18 fev. 2026.

PREBISCH, Raúl. **O desenvolvimento econômico da América Latina e alguns dos seus principais problemas**. In: BIELSCHOWSKY, Ricardo (org.). *Cinquenta anos de pensamento na CEPAL*. Rio de Janeiro: CEPAL/Cofecon, 2000.

REN21 – RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. **Global status report 2025**. Paris, 2025.

SOLAR POWER EUROPE. **Global market outlook for solar power 2025**. Brussels, 2025.

WOOD MACKENZIE. **Global solar supply chain update 2024**. Edinburgh, 2024.

WOODHOUSE, Michael et al. **Crystalline silicon photovoltaic module manufacturing costs and sustainable pricing**. NREL Technical Report NREL/TP-6A20-72134, 2019.

YOUNG, Carlos Eduardo Frickmann. **Potencial de crescimento da economia verde no Brasil**. *Política Ambiental*, n. 8, 2011.

