

PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY GENERATION IN BRAZIL AND THE DEVELOPMENT OF THE LOCAL SUPPLY CHAIN

Carlos Henrique Cabral Duarte

*Bruno Platteck de Araújo**

Keywords: solar energy; equipment production chain; photovoltaic energy generation; green industrial policies; energy transition.

* Respectively, analyst and sector studies manager of the Capital and Consumer Goods Industries, Commerce and Services Department of the BNDES' Productive Development and Innovation Division. The authors thank Lucas Moura de Lucena for information and discussions on the subject.

Resumo

A geração de energia solar fotovoltaica está crescendo rapidamente no mundo e no Brasil. Países como China, Estados Unidos da América, Japão, União Europeia e Índia lideram essa expansão, mas a indústria está concentrada no Leste Asiático, com predominância da China. No Brasil, a geração fotovoltaica expandiu 72% ao ano nos últimos cinco anos. Em 2024, foi instalada nova capacidade de 15 GW, com investimento de aproximadamente R\$ 30 bilhões, totalizando 52 GW, tornando a geração fotovoltaica a segunda fonte em capacidade instalada e a terceira em geração de energia. Quase a totalidade dos módulos fotovoltaicos são importados, gerando um déficit comercial anual superior a US\$ 3,5 bilhões desde 2022. A participação de módulos nacionais caiu de 35% para 1% em 2024. Este artigo discute a crise da indústria fotovoltaica no Brasil, as políticas públicas e as oportunidades para fortalecer a cadeia de fornecedores e promover a inovação tecnológica. Conclui com sugestões de políticas para o desenvolvimento da indústria local.

Abstract

Photovoltaic solar energy is rapidly growing worldwide and in Brazil. Countries such as China, the United States of America, Japan, the European Union, and India lead this expansion, but the industry remains concentrated in East Asia, mostly in China. In Brazil, photovoltaic energy has grown 72% annually over the past five years. In 2024, 15 GW of new capacity was installed, with investments over BRL 30 billion, reaching a total of 52 GW. This made photovoltaic energy the second largest in installed capacity and third in generation. Almost all photovoltaic modules are imported, resulting in an annual trade deficit of over USD 3.5 billion since 2022. The share of domestically produced modules dropped from 35% to 1% in 2024, with only four companies still in operation. This article reviews Brazil's photovoltaic supply chain, the public policies, and opportunities for strengthening the local industry and promoting technological innovation. It concludes with policy suggestions for expanding photovoltaic energy and developing the local supply chain.

Introdução

A energia solar fotovoltaica emergiu como uma das principais fontes de energia renovável na última década, impulsionada pela crescente demanda energética e pela necessidade de descarbonização. A geração fotovoltaica, caracterizada pela conversão direta da radiação solar em eletricidade, cresceu exponencialmente, consolidando-se como solução promissora para a transição energética.

Entre 2010 e 2023, a capacidade instalada global de geração solar cresceu mais de 35 vezes, passando de 40 GW para 1400 GW (IRENA, 2024). Esse crescimento foi impulsionado por significativas quedas nos custos de instalação, economias de escala, inovações tecnológicas e políticas industriais para desenvolvimento da cadeia de fornecedores.

A indústria de equipamentos para geração fotovoltaica, especialmente de células, módulos e inversores, desempenha papel central nesse contexto. A China, os Estados Unidos da América (EUA), a Índia e os países membros da União Europeia (UE) adotaram políticas industriais para expandir a geração e constituir cadeias produtivas competitivas. Contudo, a manufatura global se concentrou no leste asiático, com a China assumindo a liderança absoluta nesse setor.

No Brasil, a energia fotovoltaica cresceu de forma significativa. Há uma década, a capacidade instalada era considerada marginal. Porém, em 2024, a produção atingiu 52 GW, tornando-se a segunda maior fonte em capacidade instalada na matriz elétrica, com mais de 20% da capacidade instalada total.

A expansão da energia fotovoltaica no Brasil ganhou tração por meio de leilões de energia na década de 2010, cujos investimentos em infraestrutura

tiveram forte apoio dos bancos públicos, com destaque para o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Associada ao financiamento, a política de conteúdo local da Agência Especial de Financiamento Industrial S.A. (FINAME) para credenciamento de sistemas fotovoltaicos, lançada em 2014, impulsionou a localização da indústria no país, fomentando o estabelecimento de uma cadeia produtiva local.

Após a crise política e econômica de 2014-16, o crescimento desacelerou e houve reformulação dos incentivos à energia fotovoltaica. A geração distribuída (GD) e o mercado livre substituíram os leilões como principais motores de expansão. A queda nos preços dos módulos importados e a alta dos juros do BNDES desarticularam a política em construção.

Diante disso, o modelo de expansão da geração fotovoltaica no Brasil tem sido marcado pela dependência de produtos importados, particularmente módulos. A participação no mercado doméstico dos módulos nacionais caiu de 35% para menos de 1% nos últimos cinco anos. O respectivo déficit comercial ultrapassa US\$ 3,5 bilhões anuais desde 2022, evidenciando fragilidades na cadeia local de fornecedores.

Diante desse cenário, este artigo analisa a cadeia de fornecedores de módulos e sistemas de geração fotovoltaica no Brasil. Avalia os impactos das políticas implementadas no adensamento produtivo e apresenta sugestões para que as políticas energética e industrial conciliem a diversificação da matriz elétrica brasileira com o fortalecimento da indústria local.

O artigo possui cinco seções, além desta introdução. A primeira seção apresenta um panorama da indústria de energia solar no mundo, destacando a expansão da geração de energia, a estrutura dessa indústria e sua distribuição geográfica. A segunda analisa a evolução da geração de energia fotovoltaica no Brasil, abordando a geração centralizada (GC) e a GD. A terceira discute as políticas públicas para o setor. A quarta apresenta

um panorama da cadeia produtiva local. Na última seção são indicadas algumas recomendações para as políticas públicas.

Panorama da indústria de energia solar fotovoltaica no mundo

Tecnologias para fabricação de módulos fotovoltaicos

A geração de energia solar ocorre via efeito fotovoltaico ou heliotermia.¹ Este artigo foca no efeito fotovoltaico, que converte radiação solar incidente sobre materiais semicondutores em eletricidade. O material bruto mais utilizado é o silício, que deve ser purificado e “dopado”² para que se torne um semicondutor mais eficiente. Células fotovoltaicas são fabricadas a partir de *wafers* de silício cristalino,³ que são laminados a partir de lingotes e sofrem tratamentos químicos. Ao final, recebem terminações elétricas para formar células geradoras de energia.

As células fotovoltaicas de silício cristalino dominam o mercado. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020), tem havido preferência crescente pela utilização do silício monocristalino frente ao policristalino, além de pequena utilização do telureto de cádmio (CdTe). O silício cristalino representava cerca de 97,5% das vendas

1 A geração heliotérmica consiste na produção de eletricidade por meio da conversão da energia solar em térmica e, posteriormente, elétrica, assunto não detalhado neste texto.

2 O processo de dopagem do silício solar consiste na adição ao silício puro de impurezas específicas (átomos de outros elementos) para alterar suas propriedades elétricas, tornando-o mais eficiente na conversão de luz solar em eletricidade.

3 *Wafers* de silício cristalino são lâminas finas de silício ultrapuro, usadas na fabricação de células e painéis fotovoltaicos. Eles são cortados a partir de lingotes de silício cristalino.

em 2022 (IEA PVPS, 2023), enquanto filmes finos correspondiam a 2,5% do mercado. Existem ainda células de materiais híbridos, que se encontram em estágio inicial de comercialização.

As tecnologias de silício cristalino, filme fino e híbridas têm vantagens e desvantagens em termos dos custos de fabricação e rendimentos (Tabela 1). Cada uma delas possui características próprias de eficiência, desempenho sob condições climáticas diversas, faixas de absorção de luz, custos de produção e preços de venda. Assim, apesar da participação dominante do silício cristalino no mercado, decorrente de maciços investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e processos fabris, não há tecnologia ideal para todas as aplicações.

Tabela 1 | Comparativo entre as tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas

Características técnicas	Silício cristalino	Filmes finos	Híbridas
Faixa de eficiência	15-25%	9-30%	25-40%
Área ocupada	Maior	Menor	Dado não disponível
Participação no mercado mundial	97,5%	2.5%	–
Preço médio efetivo no mercado internacional	Baratos	Medianos	Dado não disponível
Aproveitamento da radiação difusa	10-20%	5-15%	15-25%
Cadeia de fabricação	Maior	Menor	Experimental

Fonte: IEA PVPS (2023), com os dados sobre faixa de eficiência do National Renewable Energy Laboratory (NREL), United States Department of Energy (DOE) e Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE).

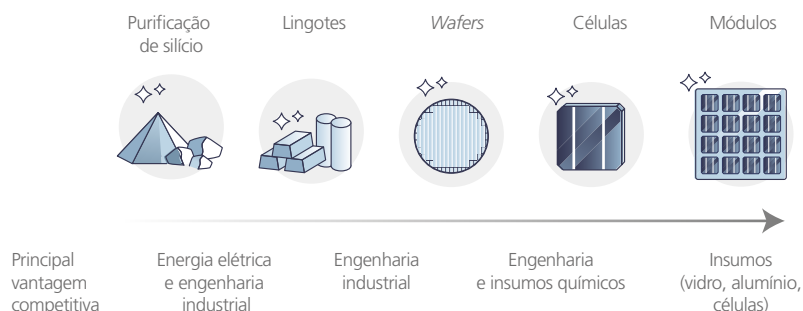
A cadeia de produção com a tecnologia de silício cristalino

A cadeia de fabricação dos módulos à base de silício cristalino se inicia na extração do minério, passando pela sua purificação, formação do

lingote, fatiamento e produção dos *wafers*, dopagem das células e, por fim, a montagem dos módulos.

A primeira etapa é o beneficiamento do quartzo bruto por meio de processos de lavagem, britagem, moagem e separação granulométrica para obter silício com diferentes níveis de pureza: desde o grau metalúrgico até o grau solar, com 99,9999% de pureza.

Figura 1 | Cadeia de produção do silício cristalino



Fonte: Elaboração própria.

O silício de grau solar surgiu como subproduto do silício utilizado na indústria eletrônica, que exige uma pureza ainda superior, da ordem de 99,999999%. A maioria dos fabricantes utiliza o processo Siemens de crescimento de cristais em altos fornos, concebido originalmente para a indústria de semicondutores. A transformação do silício cristalino em lingotes ocorre por deposição de impurezas a partir de gases (difusão) e implantação iônica (recozimento), tornando-o um semicondutor eficiente.

Além do processo Siemens, reatores de leito fluidizado (*fluidized bed reactor* – FBR) também são usados para produzir silício cristalino, pois consomem menos energia e permitem a fabricação de produtos mais

granulares. Em 2022, a empresa chinesa GCL Technologies iniciou a operação de três plantas utilizando esse processo (IEA PVPS, 2023).

Existem, ainda, processos experimentais de crescimento de cristais semicondutores de carbeto de silício (SiC) a partir de dopagens com fósforo (Ingenito *et al.*, 2019). O carbeto de silício apresenta alta resistência térmica e elétrica, porém ainda é necessário aprimorar sua eficiência e custos de fabricação. A dopagem com utilização de grafeno é uma rota possível para alcançar esses objetivos.

Os lingotes semicondutores produzidos na etapa inicial do processo passam, depois, por um processo de laminação (corte). Em seguida, são realizadas deposições metálicas no substrato de silício semicondutor para que se formem junções semicondutoras do tipo P-N (dopagem).

Até recentemente, as células do tipo P, feitas dopando o silício com boro ou gálio – tecnologia *passivated emitter and rear contact* (PERC) – e carregadas positivamente, eram as mais usadas em painéis solares por sua eficiência e custo-benefício. No entanto, os reatores FBR viabilizaram a produção de células do tipo N, dopadas com fósforo e carregadas negativamente – tecnologia *tunnel oxide passivated contact* (TOPCon).

Células TOPCon são mais eficientes, sofrem menos degradação pela luz solar e duram mais que as do tipo PERC. Com os desafios de engenharia tendo sido superados para minimizar desgastes causados por umidade e radiação ultravioleta, a indústria está gradualmente substituindo células do tipo P pelas do tipo N (Moehlecke *et al.*, 2017). Conforme tendência relatada em IEA PVS (2024), em 2024 já foram produzidas mais células TOPCon do que PERC.

Após a laminação e deposição, tratamentos superficiais aumentam a absorção de luz pelas junções e reduzem sua reflexão (foto-sensibilização),

formando *wafers* fotovoltaicos. Em seguida, ocorre a individualização, metalização dos contatos elétricos e passivação da superfície para que ali sejam definidas células fotovoltaicas. Algumas células utilizam uma pasta condutora à base de grafeno, substituindo metais caros e raros, como a prata e a platina, na soldagem dos contatos traseiros à grelha frontal da célula.

Os módulos fotovoltaicos geralmente são produzidos a partir de *wafers* semicondutores por meio de processos de corte a *laser* das células, soldagem e encapsulamento em vidro, além de cabeamento interno, montagem e selagem de proteção quanto à incidência de poeira e água.

A vida útil dos módulos fotovoltaicos costuma ser de 25 anos, podendo atingir até trinta anos, sendo que os fabricantes que atendem aos padrões internacionais de qualidade garantem 80% da potência nominal do módulo ao final desse período (Montenegro, 2013).

A cadeia de produção com a tecnologia de filme fino

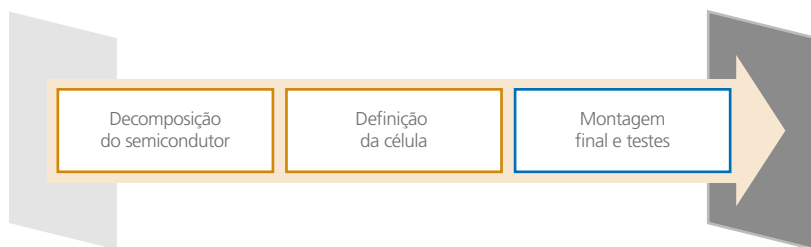
A fabricação de células fotovoltaicas de filme fino consiste na deposição física ou química de camadas semicondutoras sobre substrato ultrafino, como polímero plástico, aço inox ou vidro. Essas camadas podem conter materiais fotovoltaicos inorgânicos, como silício amorfo (a-Si),⁴ telureto de cádmio (CdTe),⁵ cobre, índio e gálio seleneto (CIS/CIGS),⁶ ou orgânicos – *organic thin-film photovoltaic* (OPV).

4 As células de a-Si são fabricadas pelo processo de “empilhamento” de camadas para aumentar sua eficiência. No entanto, esse processo é mais caro do que para células de silício cristalino quando considerada a relação eficiência *versus* custos.

5 As células de CdTe são as únicas que possuem a relação eficiência *versus* custo superior à do silício cristalino.

6 Os painéis solares que utilizam as células CIGS possuem maior eficiência, porém o elemento químico cádmio é altamente tóxico.

Figura 2 | Cadeia de produção do filme fino



Fonte: Elaboração própria.

Quanto às células orgânicas do tipo OPV, em particular, há diversas vantagens em relação às de silício cristalino, como o fato de poderem ser feitas de plásticos não tóxicos, leves, semitransparentes e flexíveis, porém ainda não contam com processos fabris consolidados.

A fabricação de células solares de filme fino envolve a impressão das células em superfícies ou rolos, utilizando processo semelhante à flexografia, seguida de tratamento térmico. Os módulos são definidos após a aplicação de eletrodos nas extremidades do filme e encapsulamento em vidro ou polímero. Assim, são dispensadas molduras ou folhas traseiras (*backsheet*).

As tecnologias baseadas em materiais híbridos

A fabricação de células fotovoltaicas também pode usar materiais híbridos, orgânicos e inorgânicos, à base de perovskita (*perovskite solar cells* – PSC). Na coleta de luz, essas células combinam elementos inorgânicos – metais como o chumbo (Pb) ou estanho (Sn) adicionados a um haleto contendo iodo (I), bromo (Br) ou cloro (Cl) – com cátions de materiais orgânicos – como o metil amônio (CH_3NH_3^+) ou formamidínio ($\text{CH}(\text{NH}_2)_2^+$). Essa composição alia a flexibilidade e o baixo custo dos orgânicos à alta eficiência e estabilidade dos inorgânicos.

Em alguns casos, o uso de tinta à base de grafeno sobre as perovskitas aumenta a estabilidade e eficiência das células (Bagade *et al.*, 2023). A tecnologia de revestimento a jato de tinta industrial líquida com PSCs e grafeno permite a impressão de células de perovskita sobre superfícies. Materiais híbridos são hoje a tecnologia fotovoltaica mais promissora (IEA PVPS, 2023).

Células mistas do tipo *tandem* combinam filmes de materiais híbridos com o silício cristalino. Seu recorde de eficiência de 33,7% foi alcançado em laboratório pela Universidade de Ciência e Tecnologia Rei Abdullah (Kaust, na sigla em inglês), da Arábia Saudita, em 2023 (Jones, 2023).

A indústria global de módulos fotovoltaicos

O mercado global de energia solar cresceu de forma exponencial na última década. A geração de energia fotovoltaica tem sido responsável por quase a totalidade desse crescimento. Várias aplicações tornaram-se viáveis economicamente pela expansão das escalas de produção e a consequente queda nos custos dos equipamentos de geração de energia.

No século XXI, a indústria fotovoltaica se consolidou nos mercados desenvolvidos. Até 2004, a capacidade instalada de geração fotovoltaica era pouco significativa (REN21, 2014). Seu desenvolvimento inicial e massificação se beneficiaram de consideráveis incentivos estatais. O aumento da demanda e da escala de produção, aliadas ao desenvolvimento tecnológico, reduziram os preços dos insumos, impulsionando a difusão dessa tecnologia.⁷

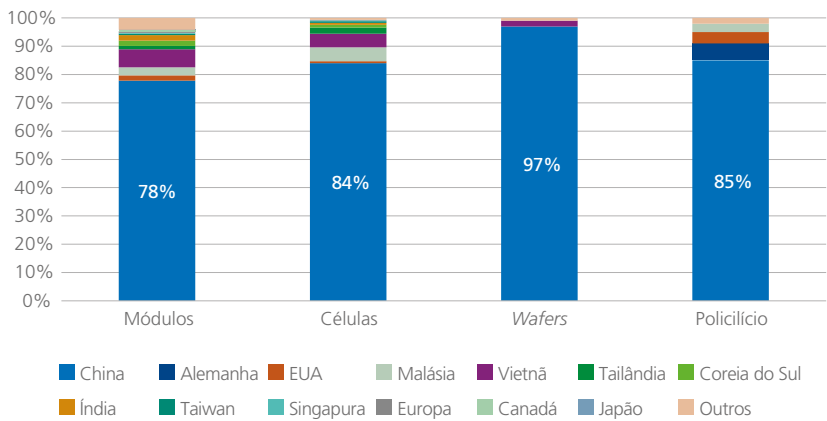
Inicialmente, Alemanha, EUA e Japão lideraram o desenvolvimento tecnológico, com Itália, Espanha e Noruega em papéis secundários. Mais

7 Segundo Hopkins e Lazonick (2013), o custo dos módulos fotovoltaicos em 1980 era de cerca de US\$ 23/watt.

recentemente, a China se tornou protagonista, impulsionando novas soluções e expandindo seu mercado.

Segundo Platzer (2015), diversos fabricantes localizaram suas plantas fabris em países onde a demanda era alta. Assim, nos últimos dez anos, houve expressiva consolidação da cadeia na China. O país aproveitou economias de escala para competir por preço, impulsionadas por maciços incentivos governamentais à fabricação local. Como resultado, a produção é muito superior à demanda. O Gráfico 1 detalha a participação de mercado da indústria por tipo de componente e localização.

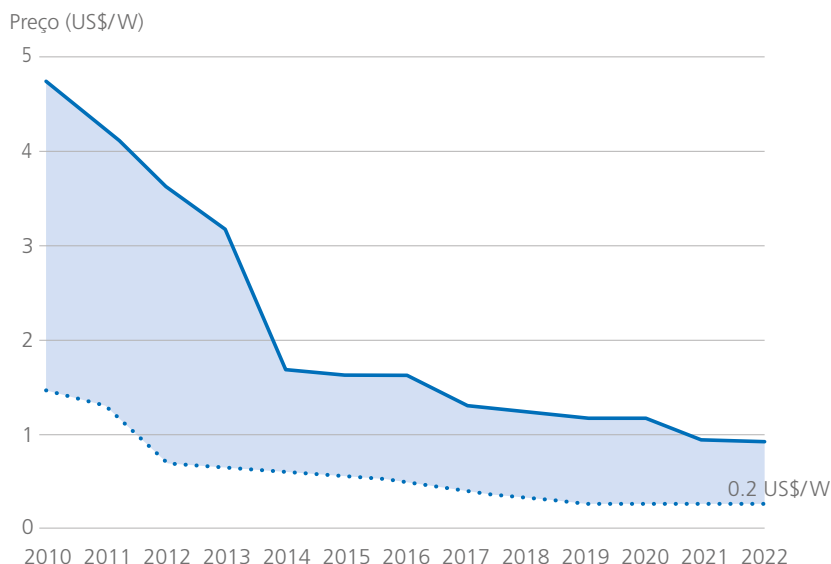
Gráfico 1 | Localização da cadeia de produção fotovoltaica no mundo



Fonte: Elaboração própria a partir dos dados de IEA PVPS (2024).

Em maio de 2018, o governo chinês reduziu seus subsídios (IEA PVPS, 2023), porém essa decisão causou antecipação de investimentos, levando a uma queda nos preços dos produtos até 2020. Em 2021, a pandemia elevou os preços dos insumos como células, vidros, cobre e alumínio. A partir de 2022, os preços dos insumos voltaram a cair. No fim de 2022, os preços dos módulos atingiram seu menor patamar histórico, 0,2 US\$/W (Gráfico 2).

Gráfico 2 | Evolução dos preços médios dos módulos fotovoltaicos no mundo



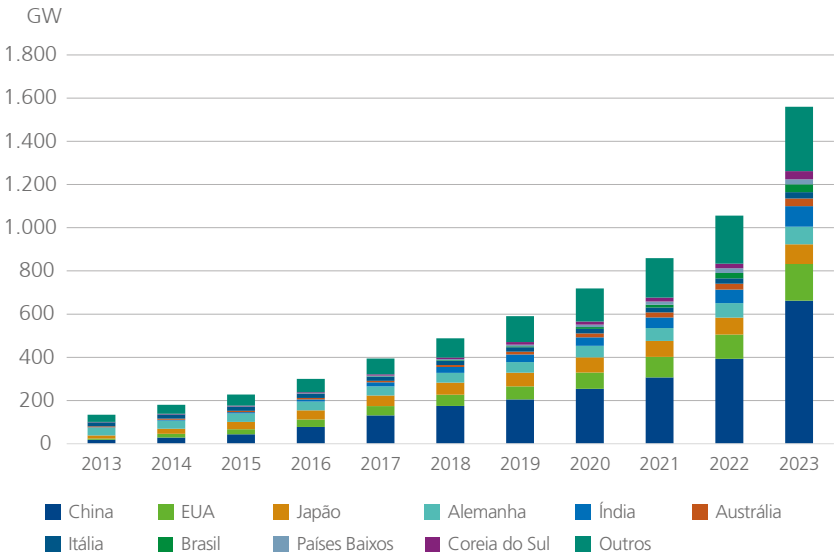
Fonte: Adaptado de IEA PVPS (2023).

Apesar dos baixos preços dos insumos, há grande variabilidade nos preços dos módulos. Os mais baratos são para sistemas montados em estruturas sobre o solo para GC, seguidos por aqueles montados sobre telhados de casas para GD. Módulos para sistemas isolados ou dispostos de forma flutuante são os mais caros, podendo superar 4,0 US\$/W.

A China lidera o mercado global de energia solar, com cerca de um terço da capacidade instalada, seguida pelos EUA, que representam 10% do total. Outros mercados relevantes são a Alemanha, Índia e Japão. O Brasil ocupa a oitava posição e tem apresentado crescimento significativo.

Em 2023, a energia fotovoltaica representou mais de 5% da eletricidade gerada no mundo, alcançando cerca de 1,6 TWh (Gráfico 3).

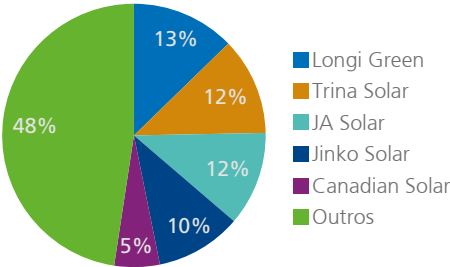
Gráfico 3 | Expansão da capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo



Fonte: Elaboração própria com base em dados da United States Energy Information Administration (EIA) publicados no Anuário Estatístico de Energia 2023 (EPE, 2024), para dados até 2022; e IEA PVPS (2024), para dados de 2023.

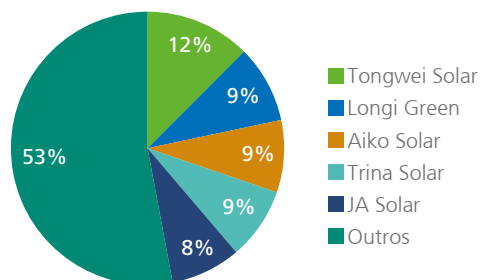
Em relação à capacidade de fabricação de células e módulos fotovoltaicos, os gráficos 4 e 5 demonstram a atual liderança das empresas chinesas, que ocupam as cinco primeiras posições no *ranking* (exceto a Canadian Solar, que é canadense). Outros países que ainda apresentam capacidade industrial relevante são os EUA e o Canadá.

Gráfico 4 | Principais fabricantes de módulos fotovoltaicos no mundo



Fonte: Elaboração própria com base em IEA PVPS (2024).

Gráfico 5 | Principais fabricantes de células fotovoltaicas no mundo



Fonte: Elaboração própria com base em IEA PVPS (2024).

A partir do século XXI, observava-se uma maior escala e porte nas empresas da base da cadeia produtiva (extração e fabricação de silício de grau metalúrgico e solar) e uma maior pulverização na sua parte mais a jusante (fabricação de lingotes, *wafers* e células, além da montagem e instalação de sistemas fotovoltaicos).

Na última década, os fabricantes chineses aumentaram as escalas nos elos finais de suas cadeias produtivas, impulsionados por rápidos avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de reatores FBR. A indústria chinesa dominou, inicialmente, as etapas finais da cadeia de valor e, em menos de uma década, integrou etapas de maior escala e complexidade tecnológica.

Atualmente, a concorrência global é intensa, com empresas chinesas dominando a cadeia e liderando a fabricação de células e painéis. Elas detêm a maior parcela do mercado, cooperam para padronizar produtos, reduzir custos de fabricação e simplificar processos de *design* e instalação, bem como investem fortemente em novas tecnologias e em capacidade de fabricação.

O reposicionamento dos fabricantes chineses alterou a dinâmica de concorrência, contribuindo para as dificuldades enfrentadas por

empresas de outros países. Podem ser citados os casos das empresas norte-americanas Evergreen Solar e Solyndra e das alemãs Q-Cells e Solon que declararam falência (Schultz, 2012).

Os fabricantes chineses provocaram competição por preço que gerou reações de muitos países. O primeiro conflito relevante ocorreu em 2011, quando a Coalition for American Solar Manufacturing (CASM) apresentou uma petição *antidumping* junto ao United States Department of Commerce (DOC) e ao United States International Trade Commission (USITC), alegando que fabricantes chineses vendiam produtos abaixo dos preços de mercado com subsídios do governo chinês. Os EUA impuseram uma sobretaxa de importação de 30% a células e módulos fotovoltaicos, reduzindo-a gradualmente até 15% em 2021. Além desse, há outros conflitos documentados que continuam gerando desdobramentos. Essas disputas se estendem para além dos EUA e China, existindo casos na UE e na Índia (Platzer, 2015). Nos próximos anos, projeta-se um crescimento menor na Europa e mais significativo em países emergentes, especialmente na Ásia e América Latina.

Panorama da indústria de energia solar fotovoltaica no Brasil

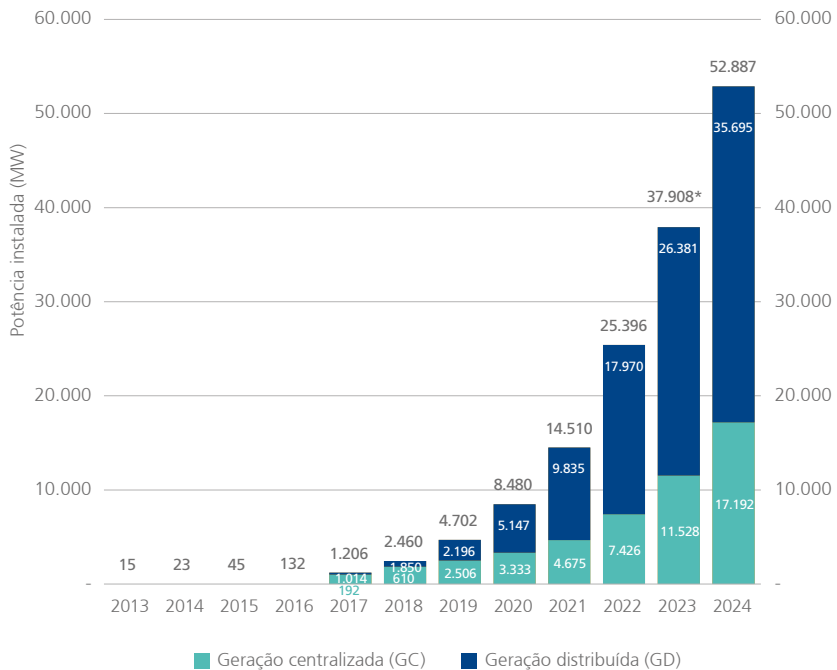
A expansão do mercado de energia fotovoltaica no Brasil iniciou com leilões para o mercado centralizado. O primeiro leilão ocorreu em 2014.⁸ Essa demanda inicial impulsionou a implantação da cadeia fotovoltaica

8 O novo modelo do setor elétrico, definido pela Lei 10.848, de 15 de março de 2004 e pela Lei 10.847, de 15 de março de 2004, criou os ambientes de contratação regulada (ACR) e livre (ACL) de energia. O ACR atende à GC, enquanto o ACL abrange o mercado livre. Esse modelo estabeleceu as bases para o ciclo de investimento em energia nos anos seguintes.

no país, fomentou a expansão da GD, especialmente a micro e minigeração, e estimulou o mercado livre de energia, que se tornou a principal frente de expansão do mercado no país.⁹

Desde 2021, a GC passou a responder por apenas um terço e a distribuída por mais de dois terços da capacidade de geração fotovoltaica no Brasil, adicionando 62% do total em 2024. O Gráfico 6 detalha a expansão e a situação atual do mercado brasileiro de energia fotovoltaica.

Gráfico 6 | Capacidade instalada de geração fotovoltaica no Brasil



Fonte: Adaptado de Absolar (2025).

*A variação observada no somatório deve-se ao arredondamento dos valores unitários.

9 A Resolução 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), modificada pela Resolução 687, de 24 de novembro de 2015, regulamentou o acesso à microgeração (menor que 75 kW) e minigeração (maior que 75 kW e menor ou igual a 1 MW) por meio da conexão aos sistemas das concessionárias de energia.

Evolução dos mercados de geração de energia solar fotovoltaica no Brasil

A geração centralizada (GC)

A GC no Brasil ocorre em grandes usinas (como hidrelétricas, termelétricas, eólicas e solares) conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). As usinas, geralmente, estão distantes dos grandes centros de consumo, exigindo linhas de transmissão para que a energia gerada chegue às redes de distribuição que atendem consumidores finais. Segundo a Resolução 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), elas abarcam parques solares com capacidade instalada acima de 5 MW.

A demanda por energia na GC é gerada principalmente pelo consumo de eletricidade nos centros urbanos e industriais, sendo influenciada por fatores como crescimento econômico, condições climáticas, mudanças demográficas e políticas de eficiência energética.¹⁰

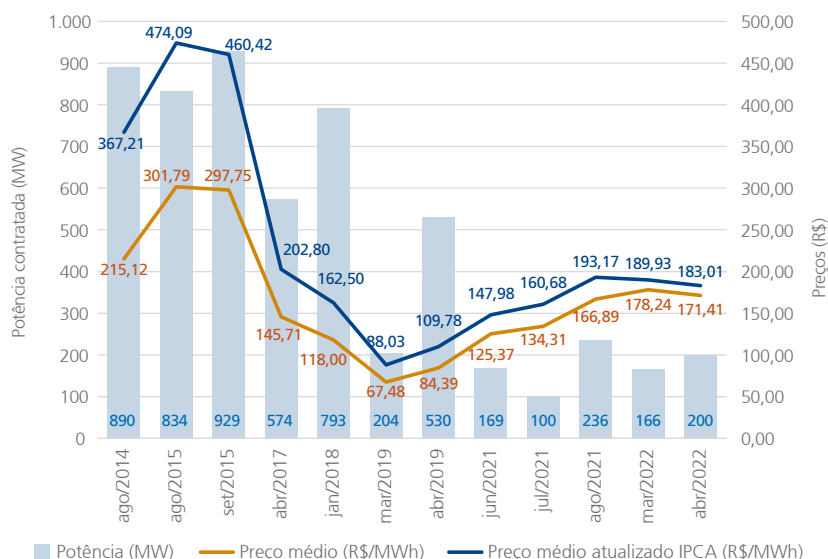
A contratação da energia gerada ocorre de duas formas no Brasil, por meio do ambiente de contratação regulada (ACR) e do ambiente de contratação livre (ACL). No ACR, a energia é contratada pelas distribuidoras de energia por meio de leilões de energia.¹¹ A partir de 2014, foram realizados pelo Governo Federal três leilões com objetivo de aquisição de energia de reserva. Posteriormente, foram realizados

10 A demanda é estimada com base em projeções de consumo e monitorada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e EPE para garantir que a oferta de energia acompanhe as necessidades do país.

11 Os leilões de energia no Brasil são organizados pela Aneel com o apoio do ONS e da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), bem como regulados pelo Ministério de Minas e Energia (MME), que define as diretrizes e a demanda a ser contratada. Há diferentes modalidades, como leilões de energia de reserva (LER), energia nova (LEN), energia existente (LEE) e de fontes alternativas (LFA).

outros leilões, todos em menor escala, mas eles foram interrompidos em 2022¹² (Gráfico 7).

Gráfico 7 | Contratação de energia fotovoltaica nos leilões de energia



Fonte: Adaptado de Aneel (2025).

A queda observada na contratação de energia fotovoltaica no ACR por meio dos leilões tem relação com um movimento estrutural de migração dos clientes para o mercado livre em busca dos menores preços de geração encontrados no ACL, que se tornou o “motor” do processo de expansão do setor elétrico nesse período.

O ACL deve permanecer como a principal fonte de demanda por equipamentos de geração fotovoltaica nos próximos anos. Cerca de 90% da expansão de capacidade prevista para o período 2023-2029 tem relação com o mercado livre de energia (Abraceel, 2023).

12 O último leilão de energia fotovoltaica ocorreu em 16.9.2022, com suprimento previsto para 2027. Segundo o Sistema de Informações de Geração de Energia (Siga) da Aneel, há 6,29 GWp em construção com entrada em operação escalonada.

A geração distribuída (GD)

A GD consiste em pequenas instalações em residências, comércios, propriedades rurais ou industriais para suprir total ou parcialmente a demanda local. Diferente da GC, a GD dispensa longas redes de transmissão e distribuição para conexão ao SIN.

A GD tem sido o principal motor da expansão da geração fotovoltaica no país, adicionando mais de 60% de capacidade ao ano desde 2019. Sua escalabilidade e flexibilidade tornam a energia fotovoltaica ideal para GD, atendendo tanto consumidores conectados à rede elétrica (*on-grid*), quanto aqueles em áreas isoladas (*off-grid*).¹³

Em 2014, a EPE projetou que a GD fotovoltaica no Brasil atingiria 539 MWh em 2021 (EPE, 2014).¹⁴ No entanto, o resultado superou em muito essas expectativas, com a GD tornando-se a principal frente de expansão da geração fotovoltaica no Brasil. Segundo o Balanço Energético Nacional referente ao ano de 2022 (Brasil; EPE, 2023), a autoprodução e GD em 2021 corresponderam a 9 TWh, representando 56% da geração fotovoltaica, contribuindo com 1,2% da energia total consumida no país.

Segundo o planejamento de longo prazo da EPE, a GD ganhará ainda mais relevância. As projeções no Plano Decenal de Expansão (PDE) para 2031 (Brasil; EPE, 2022) indicam que, em 2024, a geração fotovoltaica representará mais de 12% da produção total de energia no Brasil.

13 Sistemas isolados no Brasil, notadamente na região amazônica e no interior do Nordeste, enfrentam desafios de implantação, devido às altas temperaturas e umidade (no caso da Floresta Amazônica), que reduzem a vida útil de equipamentos e baterias.

14 Estimativa que envolve o dimensionamento da área útil nos telhados dos domicílios aptos a receber sistemas de geração fotovoltaica, a evolução dos custos e dos preços da energia nos diversos estados e municípios brasileiros, o perfil de consumo dos clientes no comércio e serviços, a evolução tecnológica e seu potencial de geração. A variabilidade dessas variáveis mostra que há dificuldades de mensuração do mercado potencial, dadas as incertezas nas premissas adotadas.

O avanço da GD no Brasil deve-se a medidas tomadas na última década. A Resolução 482/2012 e a Resolução 687, de 24 de novembro de 2015, ambas da Aneel, regulamentaram a microgeração e minigeração distribuída e sua conexão aos sistemas das concessionárias. Elas reduziram as barreiras regulatórias existentes para conexão da geração de pequeno porte proveniente de fontes de energia incentivadas, bem como introduziram o sistema de compensação de energia elétrica (*net metering*).¹⁵

Posteriormente, houve debates relacionados à cobrança de imposto sobre circulação de mercadorias e serviços (ICMS) na compensação de energia proveniente da GD. Antes, permitia-se a dupla incidência do ICMS na GD, sobrepondo-a à tarifação sobre o consumo do cliente final. Tal questão foi superada pelo Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015, do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz), que isentou a tributação sobre operações no sistema de compensação de energia elétrica (SCEE). Todos os estados e o Distrito Federal aderiram à isenção tributária prevista no convênio, que continua vigente.

Nesse mesmo ano, por meio da Portaria 538, de 14 de dezembro de 2015, o MME lançou o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), provendo estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis, em especial a energia fotovoltaica.

Com isso, tornou-se possível injetar a energia excedente no sistema integrado de energia, habilitando os geradores a ingressar no SCEE e receber deduções nas contas de energia. A minigeração distribuída passou a exigir garantias de fiel cumprimento. Esses movimentos culminaram

15 O *net metering* regula a troca de energia solar entre concessionária e consumidores: excedentes gerados viram créditos e déficits geram débitos. O balanço é calculado pela concessionária no momento do faturamento das contas de energia.

no marco legal da geração distribuída (Lei 14.300, de 6 de janeiro de 2022). O MME ainda mantém o ProGD em vigência.¹⁶

Por fim, a Resolução 1.059, de 7 de fevereiro de 2023, da Aneel, definiu critérios de cálculo da tarifa de uso do sistema de distribuição (Tusd), concedendo isenção total da Tusd até 2045 para usuários do SCEE registrados até 2022. Essa medida aprimorou as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída, bem como o funcionamento do SCEE.

Ainda há desafios na massificação da GD, por exemplo, em relação aos modelos de negócios mais adequados e legalmente admissíveis. Atualmente, há diferentes modelos que envolvem empresas de serviços de conservação de energia (*energy services company* – ESCO), o aluguel ou arrendamento de equipamentos e o fornecimento de sistemas de geração de energia por empresas de engenharia, que muitas vezes se envolvem na operação dos parques fotovoltaicos.

16 O ProGD possui como metas, até 2030, atingir 23% da geração através de energias renováveis, propiciar 10% de ganho de eficiência no setor elétrico e ampliar a GD. O MME avalia que o programa poderá movimentar cerca de R\$ 100 bilhões em investimentos.

Políticas públicas e instrumentos de apoio à geração de energia e à cadeia de fornecedores

Financiamento

A disponibilidade de crédito é essencial para viabilizar projetos de geração de energia solar. O Brasil conta com diversas alternativas para o financiamento a projetos oferecidas por bancos públicos e privados. O Quadro 1 apresenta as principais linhas de financiamento do BNDES e outros bancos públicos destinadas aos projetos de geração fotovoltaica nos últimos anos.

Tendo em vista o alto retorno do investimento em projetos de geração fotovoltaica, particularmente na GD domiciliar e comercial, em que o *payback* é inferior a cinco anos (Greener, 2023), instituições financeiras privadas desenvolveram produtos financeiros específicos. O Quadro 2 sintetiza esses instrumentos.

Quadro 1 | Linhas de financiamento de bancos públicos*

Banco	BNDES	BNDES	BNDES	Banco do Nordeste (BNB)	Banco de Brasília (BRB)	Banco da Amazônia (Basa)
Linha/ programa	Fundo Clima - transição energética	BNDES Finem - geração de energia	BNDES Finame Baixo Carbono	Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE Sol)	Fundo Constitucional do Centro-Oeste (FCO Verde)	Fundo Constitucional de Financiamento do Norte (FNO Energia Verde)
Modalidades	Direto	Direto e indireto	Indireto	Direto	Direto	Direto
Valores admissíveis	De R\$ 20 milhões a R\$ 500 milhões por grupo econômico a cada 12 meses.	Mínimo de R\$ 40 milhões.	Até R\$ 140 milhões.	Até R\$ 100 mil para micro e minigeradores e pessoa física.	Mínimo de R\$ 500 mil.	Até R\$ 20 mil para microempreendedores individuais.
Prazo de carência	Até oito anos.	Até seis meses da entrada do projeto em operação comercial com juros capitalizados nesse período.	Até um ano para financiamentos em taxa fixa do BNDES (TFB) e até dois anos nos demais casos.	Empresas e produtores rurais: até 36 meses. Pessoa física: até seis meses. Locação para GD: até 12 meses.	Até oito anos.	Até quatro anos.
Prazo total	Até 16 anos.	Até 24 anos.	Até dez anos.	Empresas e produtores rurais: até 12 anos. Pessoa física: até oito anos. Locação para GD: até 24 anos.	Até 15 anos, incluindo oito anos de carência.	Até 12 anos, incluindo quatro anos de carência.

(Continua)

(Continuação)

Banco	BNDES	BNDES	BNDES	Banco do Nordeste (BNB)	Banco de Brasília (BRB)	Banco da Amazônia (Basa)
Nível de participação	Até 100%	Até 80% do valor total do projeto. Limitada a 100% dos itens financiados.	Até 100%	Pequeno-médio porte: 100%. Porte médio I: 95%.	Até 100%	Pequeno-médio e médio porte I: 100%. Médio porte II: 95%.
Custo financeiro	8% ** a.a.	Taxa de longo prazo (TLP)	TFB, taxa fixa do BNDES em dólar (TFBD), TLP ou Selic	7,46% ** a.a. ou IPCA + 0,87 a.a.	7,46% ** a.a. ou IPCA + 0,87 a.a.	7,46% ** a.a. ou IPCA + 0,87 a.a.
Remuneração básica	A partir de 1,1% a.a.	Diretas: 1,1% a.a. Indiretas: 1,05% a.a.	0,95% a.a.	Bônus de adimplência de 0,14% a.a. como redutor do custo básico.	Bônus de adimplência de 0,14% a.a. como redutor do custo básico.	Bônus de adimplência de 0,14% a.a. como redutor do custo básico.
Faixa de spreads	A partir de 0,2% a.a.	A partir de 0,2% a.a. em operações diretas.	Até 3,5% a.a.	Dado não disponível.	Dado não disponível.	Dado não disponível.
Garantias aceitáveis	Reais ou pessoais, definidas na análise do projeto.	Diretas: reais ou pessoais, definidas na análise. Indiretas: definidas pelos agentes financeiros.	Definidas na negociação com os agentes financeiros.	Alienação fiduciária, aval, hipoteca e fiança.		
Fonte dos recursos	Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC).	Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT).	Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT).	Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste (FNE).	Fundo Constitucional de Financiamento do Centro-Oeste (FCO).	Fundo Constitucional de Financiamento do Norte (FNO).

*O financiamento também é possível em linhas genéricas, como o BNDES Automático, ou setoriais, como as que compõem o Programa Agrícola do Governo Federal (PAGF).
**Taxas pré-fixadas.

Fonte: Elaboração própria, com dados atualizados até 30.6.2024.

Quadro 2 | Linhas de financiamento específicas disponíveis de bancos privados

Banco	Santander	Bradesco	Bradesco	Itaú	Banco Votorantim (BV)
Linha/ programa	Santander Energia Solar	Bradesco - Leasing Ambiental	Bradesco - CDC Energia Fotovoltaica	Crédito para Energia Solar	Financiamento para Energia Solar BV
Modalidades	Direto	Direto	Direto	Direto	Direto
Valores admissíveis	A partir de R\$ 2 mil.	Dado não disponível.	Dado não disponível.	Dado não disponível.	Pessoa física: de R\$ 5 mil a R\$ 500 mil. Pessoa jurídica: de R\$ 5 mil a R\$ 3 milhões
Prazo de carência	Até três meses.		Até três meses.	Até quatro meses.	Até quatro meses.
Prazo total	Até oito anos.	De três a cinco anos.	Até cinco anos.	Até cinco anos.	Até oito anos.
Nível de participação	Até 100% dos equipamentos + custos de instalação.	Até 70% dos bens a serem alienados.	Até 100% do investimento.	Até 100% do investimento.	Até 100% do investimento.
Custo financeiro	A partir de 1,4% a.m.	Dado não disponível.	Dado não disponível.	A partir de 1,55% a.m.	Dado não disponível.

Fonte: Elaboração própria, com dados atualizados até 30.6.2024.

Apoio do BNDES a projetos de geração de energia fotovoltaica

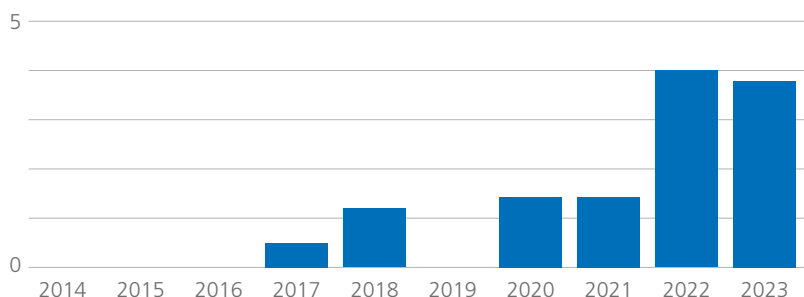
Até 2020, a demanda por crédito do BNDES para investimentos em geração fotovoltaica foi baixa. Entre 2017 e 2020, o Banco financiou apenas projetos de geração fotovoltaica distribuída via programas setoriais, como no Programa Agropecuário do Governo Federal (PAGF), Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (Pronaf) e BNDES Fundo Clima.

O BNDES financia os investimentos previstos em cada projeto, o que compreende tanto o investimento em equipamentos, quanto em mão de obra, serviços etc. No caso do financiamento para aquisição de equipamentos, o Banco exige que esses bens mantenham credenciamento Finame, que demanda determinado nível de agregação de valor local.

Os financiamentos do BNDES ganharam escala com a revisão da metodologia de credenciamento em 2020, que segregou os sistemas com painéis manufaturados localmente (tipo A) daqueles que possuíam, em sua configuração, componentes fabricados localmente, como seguidores ou inversores solares (cujos sistemas são mais baratos) e contassem com painéis importados (tipo B).

No fim de junho de 2024, a carteira de projetos do BNDES atingiu 5,2 GW, dos quais 4,6 GW se referiam à implantação de sistemas apenas com inversor ou rastreador nacional, enquanto 0,6 GW se referiam a projetos com painéis fabricados localmente. O Gráfico 8 apresenta o apoio à geração fotovoltaica na modalidade direta, sem agentes financeiros.

Gráfico 8 | Carteira de projetos de geração fotovoltaica do BNDES apoiados diretamente (R\$ bilhões)



Fonte: Elaboração própria com base em dados do BNDES.

Credenciamento de equipamentos para geração fotovoltaica na Finame/BNDES

A política de conteúdo local, que vincula o financiamento à comercialização de bens de capital a exigências de produção nacional, ainda é operacionalizada pela Finame. Para obter crédito Finame via agentes financeiros, ou por meio do BNDES, quando o crédito é concedido diretamente a empresas ou projetos, os bens de capital devem ser mantidos no Credenciamento de Máquinas, Equipamentos, Sistemas Industriais e Componentes do Sistema BNDES (CFI).

O credenciamento no CFI verifica se um item é considerado de produção nacional, avaliando se o fabricante possui planta industrial no país e se seu produto atende aos critérios de agregação de valor local. Bens de capital credenciados recebem um código e podem ser comercializados com financiamento indireto pelas linhas da Finame, ou apoiados diretamente pelo BNDES em projetos de investimento, caso em que se prescinde da intermediação de agentes financeiros.

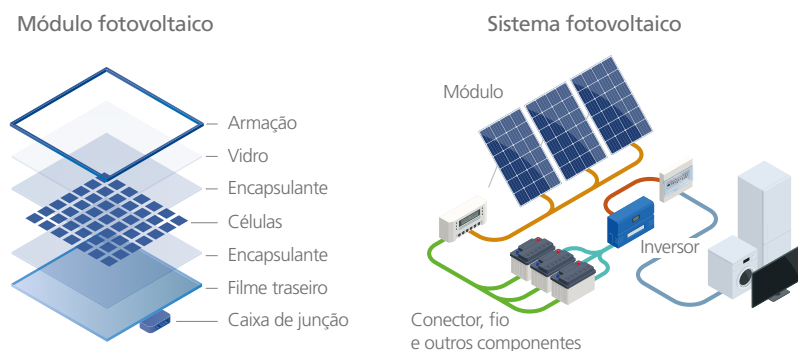
Diante da demanda por sistemas de geração de energia fotovoltaica decorrente dos leilões de energia iniciados em 2014, o BNDES entendeu ser relevante estabelecer uma metodologia específica de credenciamento.

Metodologia de credenciamento de sistemas fotovoltaicos

Em 2014, o BNDES lançou a metodologia de credenciamento de sistemas fotovoltaicos, com etapas de nacionalização gradativa. Seu objetivo foi apoiar um setor industrial nascente no país, que não atendia à regra geral de credenciamento vigente.

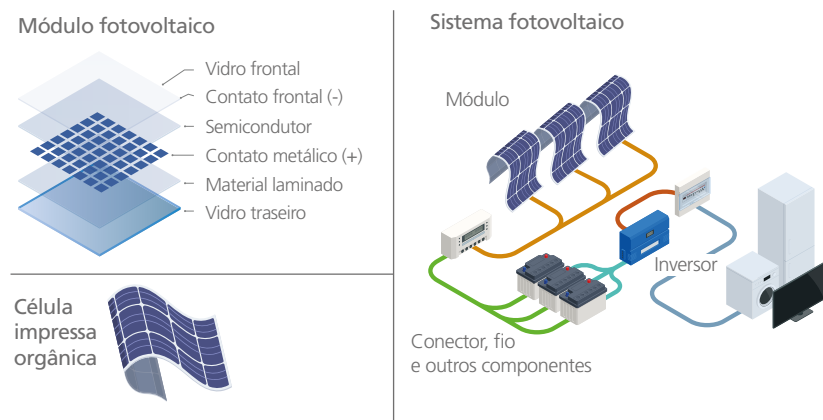
A metodologia setorial exigia que fabricantes de módulos e sistemas fotovoltaicos cumprissem etapas básicas de seu plano de produção local e utilizassem certos componentes nacionais. Também estabelecia regras distintas para as tecnologias de silício cristalino (Figura 3) e filme fino (Figura 4), além de separar as tabelas de nacionalização para módulos e sistemas fotovoltaicos.

Figura 3 | Componentes de módulos e sistemas fotovoltaicos na rota do silício cristalino



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4 | Componentes de módulos e sistemas fotovoltaicos na rota de filmes finos



Fonte: Elaboração própria.

A partir da identificação e nacionalização dos principais componentes, foram definidos critérios de credenciamento de sistemas, com obrigações segregadas em três etapas: (i) a primeira, até dezembro de 2017, quando passou a ser obrigatória a nacionalização do *frame* e da montagem do módulo; (ii) a segunda, de janeiro de 2018 até dezembro de 2019, quando se passou a exigir caixas de junção de procedência nacional; e (iii) a terceira, a partir de janeiro de 2020, quando se passou a exigir células de fabricação nacional (BNDES, 2017).

Além disso, a partir da segunda fase, foi exigido que o inversor solar estivesse credenciado de acordo com as normas tradicionais do BNDES, para que todo o sistema pudesse ser credenciado e se tornasse passível de financiamento. A metodologia definiu, ainda, itens que deveriam ser obrigatoriamente nacionais, itens opcionais e *premium*.

Integradores responsáveis pelo projeto e instalação de sistemas solares passaram a ser passíveis de credenciamento, devendo indicar os

componentes a serem utilizados nos projetos comercializados, bem como seus respectivos fornecedores.

A regra de credenciamento previa, originalmente, a fabricação de módulos fotovoltaicos no país, buscando avançar em direção à fabricação local de células, *wafers* e lingotes de silício de grau solar. A regra passou por duas revisões para adequá-la à realidade do setor, considerando os investimentos realizados e as dificuldades encontradas nos projetos em desenvolvimento.

Uma primeira revisão em 2017 retirou a obrigatoriedade de células fabricadas no país e tornou opcional a compra de inversores nacionais, exigindo-os a partir de 2020. Contudo, sua implantação enfrentou dificuldades, sobretudo devido à baixa oferta de inversores nacionais para potências menores e a ausência de inversores em série com monitoramento sistêmico remoto, do tipo *string*, então não fabricados no país.

Uma nova revisão foi realizada em 2020, prevendo regras específicas de acordo com a potência do sistema. Além disso, foi criada uma modalidade (tipo B) que permitiria a aquisição de módulos importados, desde que adquiridos outros componentes fabricados localmente:

- i) Sistemas geradores com potência até 375 kW: precisam contar com partes fabricadas no país – módulos fotovoltaicos e/ou inversores; condutores elétricos de origem nacional; e inversores (*trackers*) ou estruturas de sustentação fixas.
- ii) Sistemas geradores fotovoltaicos de potência superior a 375 kW (tipo A): devem contemplar concomitantemente módulos fotovoltaicos credenciados; inversores credenciados; *trackers* credenciados ou estruturas de sustentação fixas de origem nacional; e condutores elétricos de origem nacional.
- iii) Sistemas geradores fotovoltaicos de potência superior a 375 kW (tipo B): devem atingir um índice de estrutura de

produtos (IEP) mínimo de 30% e ter em sua composição ao menos um de três componentes de procedência local entre módulos fotovoltaicos, inversores ou *trackers* credenciados, ou estruturas fixas de origem nacional.

Portanto, a fabricação local de células e módulos fotovoltaicos deixou de ser um item de cumprimento obrigatório. A última revisão foi implementada em meio a um cenário no qual o BNDES passou a operar com taxas de juros mais elevadas a partir da adoção da taxa de longo prazo (TLP). No momento, a regra estabelecida em 2020 permanece vigente.

Metodologia de credenciamento de sistemas estacionários de armazenamento de energia com baterias e com hidrogênio

O BNDES aprovou, em 19 de maio de 2022, nova metodologia setorial relacionada ao segmento de energias renováveis para credenciamento de sistemas estacionários de armazenamento de energia com baterias e hidrogênio (BNDES, 2022). Esse novo regulamento autorizou o credenciamento de baterias que suportem, pelo menos, quatro mil ciclos de recarga e profundidade de descarga igual ou maior que 80%, desde que sua fabricação apresente índice de credenciamento crescente.

São avaliados todos os componentes das baterias, como ânodo, cátodo, eletrólitos, separadores, carcaças, fios e conectores, além de sistemas de controle de carga, *racks* e sistemas de refrigeração. O regulamento para *battery energy storage system* (BESS) também abrange conjuntos de baterias, gestão de energia, inversores, climatização, estruturas metálicas, elementos elétricos (painéis elétricos, transformador e cabeamento) e sistemas de incêndio, seguindo a lógica de nacionalização progressiva.

Processos produtivos básicos (PPB) e o Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (Padis)

Antes da metodologia de credenciamento do BNDES, já se reconhecia que o desenvolvimento da geração fotovoltaica traria externalidades positivas para a cadeia de equipamentos com eletrônica digital embarcada, devido às similaridades nas etapas de fabricação do silício cristalino, *wafers* e células semicondutoras.

Por esses motivos, fabricantes de equipamentos e componentes eletrônicos fotovoltaicos, além de contar com o cumprimento de processos produtivos básicos (PPB)¹⁷ para efeito de credenciamento Finame, vêm podendo usufruir dos incentivos previstos no Decreto-Lei 288, de 28 de fevereiro de 1967, que cobre a Zona Franca de Manaus (ZFM), e na Lei 8.248, de 23 de outubro de 1991 (Lei de Informática), que cobre todo o país, bem como em suas alterações posteriores.

Assim, os fabricantes dos produtos listados no Quadro 3, desde que cumpram os respectivos PPBs, podem contar com créditos financeiros, calculados com base nos investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) realizados.

17 Um PPB é o conjunto mínimo de etapas de produção que uma empresa deve realizar no Brasil para que determinado produto seja considerado como fabricado no território nacional. PPBs são regulamentados pelo Governo Federal.

Quadro 3 | PPBs fixados para produtos da cadeia fotovoltaica

Portarias MCTI/MDIC*	Escopo
277/2001-ZFM	Gerador fotovoltaico
276/2001-ZFM	Carregador para gerador fotovoltaico
408/2015-ZFM e 409/2015-BR	Componentes semicondutores, inclusive células fotovoltaicas
2524/2021-BR e 2525/2021-ZFM	Seguidor solar
3808/2021-ZFM e 3809/2021-BR	Células e módulos ou painéis fotovoltaicos
5519/2021-ZFM	Cabos para sistemas fotovoltaicos
54/2024-BR e 55/2024-ZFM	Sistema de armazenamento de energia
63/2024-BR e 64/2024-ZFM	Inversor fotovoltaico

Fonte: Elaboração própria.

*Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação/Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços.

Em particular, o PPB de geradores fotovoltaicos exige que painéis e carregadores/controladores de carga sejam fabricados no país conforme seus PPBs. Além da montagem e soldagem local de todos os componentes em placas de circuito impresso, a montagem de partes mecânicas e elétricas deve ser a partir de componentes desagregados, com a integração final do equipamento no país.

Os PPBs de painéis e células adotam sistemas de pontuação que priorizam a realização de etapas físico-químicas, bem como de corte, soldagem e empacotamento do produto em território nacional. As atividades de PD&I e desenvolvimento tecnológico no país, além de soldagens, vedações e montagens também são valorizadas, porém com menor peso.

Na prática, o cumprimento das etapas produtivas e condicionantes em cada PPB visa o mesmo objetivo das metodologias do BNDES: o adensamento local da cadeia produtiva fotovoltaica. Porém, o cumprimento dessa legislação foi interrompido durante o período em que sua conformidade com os acordos comerciais internacionais subscritos pelo Brasil foi contestada na Organização Mundial do Comércio (OMC), até

o ano de 2019. Os incentivos foram reformulados para a retomada desse mecanismo, substituindo a redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI) por créditos tributários. Desde 2021, novas portarias estabeleceram PPBs para equipamentos e componentes fotovoltaicos, ainda necessitando acompanhamento.

O segmento de células e módulos fotovoltaicos também está incluído no escopo do Programa de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico da Indústria de Semicondutores (Padis), criado pelo Decreto 6.233, de 11 de outubro de 2007. O programa originalmente zerava alíquotas do programa de integração social (PIS), da contribuição para o financiamento da seguridade social (Cofins), do imposto sobre produtos industrializados (IPI) e do imposto de importação (II) na compra de insumos e máquinas/equipamentos para o ativo imobilizado ou produção, desde que tais produtos estivessem relacionados nos anexos do decreto.

O Padis também zerava tributos incidentes sobre vendas - IPI, PIS/Cofins e imposto de renda de pessoa jurídica (IRPJ) - e oferecia incentivos relacionados ao IRPJ e à contribuição de intervenção no domínio econômico (Cide). As contrapartidas incluíam a abertura de CNPJ, aprovação de projeto pelo MCTI, realização de atividades produtivas e PD&I no país, além da aprovação dos relatórios anuais de prestação de contas.

A Lei 14.302, de 7 de janeiro de 2022, corrigiu as assimetrias presentes no Padis, incluindo todos os fabricantes de semicondutores e insumos como beneficiários de créditos financeiros. Depois, a Lei 14.968, de 11 de setembro de 2024, criou o Programa Brasil Semicondutores (Brasil Semicon, sucessor do Padis), garantindo isenção total de impostos para toda cadeia de insumos na fabricação de módulos fotovoltaicos no país.

Incentivos tributários

Além dos incentivos e políticas abordados nas seções anteriores, os seguintes incentivos tributários também são direcionados à expansão da geração fotovoltaica no país:

- Convênio ICMS 101, de 12 de dezembro de 1997: concede isenção do ICMS nas operações com equipamentos e componentes para energias renováveis.
- Convênio ICMS 109, de 21 de outubro de 2014: autoriza que unidades federadas concedam diferimento de ICMS nas aquisições de máquinas, equipamentos e insumos produtivos.
- Lei 13.169, de 6 de outubro de 2015: isenta de PIS/Cofins a micro e minigeração para uso próprio de consumidores residenciais, comerciais e industriais.
- Lei 13.203, de 8 de dezembro de 2015: estabelece redução tarifária de até 50% na transmissão e distribuição devido a produção independente ou autoprodução.

A cadeia produtiva de equipamentos para geração solar fotovoltaica no Brasil

Esta seção apresenta o mapeamento dos fabricantes estabelecidos no país nos principais elos da cadeia de fornecedores de módulos e componentes de geração fotovoltaica e identifica algumas das oportunidades para o desenvolvimento dessa indústria.

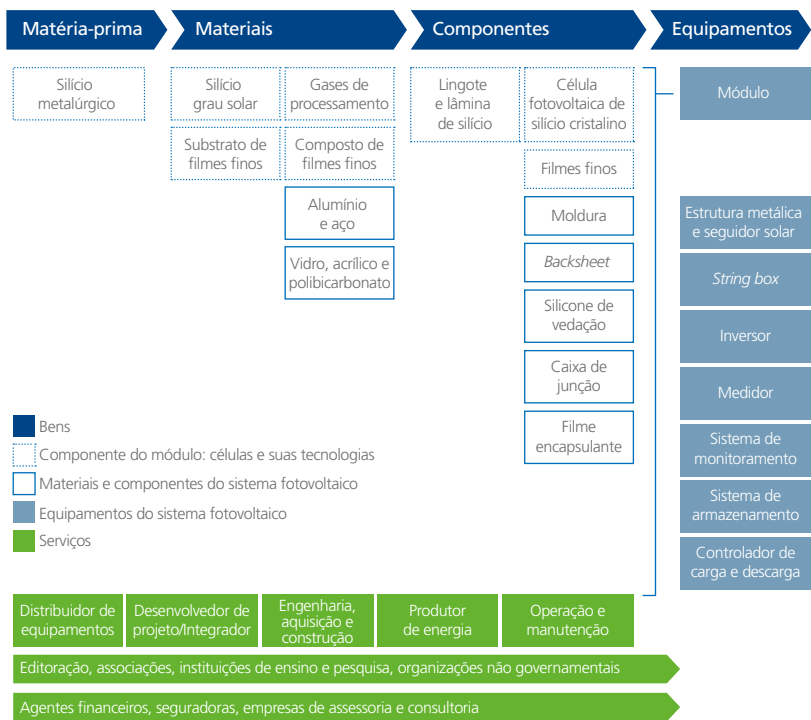
A cadeia produtiva de módulos e componentes fotovoltaicos estabelecida no país

Diversos insumos são utilizados em sistemas de geração fotovoltaica, como o silício de grau solar, gases para processamento físico-químico, *wafers* de silício purificado, *backsheet* e silicone para vedação, fios e cabos para montagem de caixas de junção, bem como alumínio e aço para montagens de molduras e estruturas de módulos fotovoltaicos.

Além dos módulos, os sistemas de geração fotovoltaica incluem inversores, medidores de energia, baterias e sistemas de armazenamento, controladores de carga e rastreadores solares. Esses itens são essenciais para o funcionamento de sistemas fotovoltaicos e representam fração relevante dos seus custos.

A cadeia produtiva inclui prestadores de serviços, como empresas de consultoria e engenharia, fornecedores do tipo *engineering, procurement and construction* (EPC), operação e manutenção (O&M), distribuidores de equipamentos, agentes financiadores, instituições de ensino e pesquisa, entre outros (Figura 5).

Figura 5 | Cadeia de valor fotovoltaica



Fonte: Adaptado de Ramos et al. (2018).

Módulos fotovoltaicos

Atualmente, quatro fornecedores fabricam painéis fotovoltaicos no país, todos com base na tecnologia de silício cristalino bifacial. Eles possuem produtos credenciados no CFI, porém sua produção está praticamente paralisada, devido ao reduzido patamar de preços e elevada concorrência com produtos chineses. Os atuais fabricantes são a BYD, Sengi, Balfar e Minasol, que informaram ter capacidade instalada de produção de módulos fotovoltaicos totalizando, aproximadamente, 1.250 MW/ano. Em 2024, esses fabricantes operavam com nível de ocupação de sua capacidade

entre 1% e 5%, mas podem escalar rapidamente sua produção, desde que disponham de capital de giro e adotem turnos adicionais de trabalho.

Algumas empresas possuem módulos fotovoltaicos credenciados para financiamento caso a caso, como a Intelbras e a Renovigi (empresa do grupo Intelbras), que precisam demonstrar a fabricação dos produtos no país conforme as regras de credenciamento a cada financiamento pleiteado. A Weg atua no mercado com marca própria, porém no formato *white-label*, assumindo a garantia e performance de produtos fabricados por terceiros. Apesar de ter anunciado planos para instalação de capacidade fabril própria, declinou do investimento em função das oscilações de preço e riscos da migração tecnológica das células de tipo P para N.

Nos últimos anos, outros fabricantes de painéis fotovoltaicos interromperam suas atividades ou deixaram o país. As empresas de filmes finos deixaram o mercado local devido às incertezas mercadológicas e à predominância do silício cristalino como padrão global.

No mercado internacional, das dez maiores empresas fabricantes de módulos fotovoltaicos, oito são chinesas (Longi Green, Jinko Solar, Trina Solar, JA Solar, Astroenergy, Tongwei Solar, Risen Energy, DAS Solar), uma é canadense (Canadian Solar) e uma é norte-americana (First Solar) (Aleina, 2024).

Sistemas geradores fotovoltaicos

Há grande quantidade de fornecedores de sistemas de geração fotovoltaica credenciados no BNDES, a maioria mantém tanto sistemas de tipo A quanto de tipo B credenciados. A estimativa de sua participação no mercado é dificultada devido à grande pulverização das vendas.

Algumas empresas atuam no mercado como fabricantes de sistemas e integradores, utilizando assim financiamentos do BNDES caso a caso, adotando estratégias diferenciadas para atender seus clientes. Fornecedores que atuam com células do tipo A geralmente têm múltiplos sistemas credenciados, pois trabalham com mais de um fornecedor de módulos nacionais (Balfar, BYD, Sengi ou Minasol). Além disso, alguns fabricantes de módulos também credenciam sistemas, *trackers* e inversores para atender diretamente clientes de maior porte.

Ao final de 2024, havia 129 sistemas credenciados por fornecedores localizados nas regiões Sul e Sudeste (Tabela 2). Dentre eles, 78 eram de tipo A, sendo 46 sistemas entre 750 W e 75 kW e 32 com potência superior a 75 kW. Já os 51 sistemas de tipo B, que geralmente utilizam painéis solares importados, eram todos de potência superior a 75 kW.

Tabela 2 | Tipos de sistemas fotovoltaicos credenciados

Tipo	Potência	Quantidade
Tipo A	Entre 50 W e 75 kW	46
	Acima de 75 kW	32
Tipo B	Entre 50 W e 75 kW	–
	Acima de 75 kW	51
Total		129

Fonte: Elaboração própria.

A segregação dos sistemas credenciados de acordo com seus tipos e potências demonstra claramente que os sistemas com menor conteúdo local (tipo B) são destinados a plantas de geração fotovoltaica de maior capacidade.

Inversores

Inversores são os componentes responsáveis por converter a corrente contínua gerada por painéis fotovoltaicos em corrente alternada para que possa ser utilizada pelos consumidores. Um inversor pode ser usado para todo o conjunto ou inversores separados podem ser usados para cada sequência de módulos (IEA PVPS, 2023). São um componente crítico no funcionamento da maioria dos sistemas fotovoltaicos.

O país desenvolveu competências locais nesse segmento por meio de fornecimentos à Eletrobras (enquanto ainda estatal) e a suas concessionárias. Os inversores nacionais, especialmente para GD, demandam desenvolvimentos específicos, devido aos requisitos operacionais particulares do sistema interligado, podendo utilizar, na geração fotovoltaica, eletrônica de potência em nível de módulos (do inglês, *module-level power electronics* – MLPE), por exemplo para integrar as funções de controle e monitoramento de energia a cada painel fotovoltaico.

Inversores podem ser credenciados pelo BNDES ao atender o índice de credenciamento ou por cumprir um PPB, conforme habilitação em portarias conjuntas emitidas pelo MCTI e MDIC. Segundo esses normativos, o fabricante tem a opção de fornecer sistemas fotovoltaicos com inversores importados, pois sua nacionalização não é obrigatória.

A fabricação de inversores no Brasil está concentrada em modelos de grande porte, acima de 1 MW de potência, com poucas exceções, como a Weg, que produz para GD. Outras empresas de capital nacional credenciadas são DMS, NHS, Noma do Brasil, Technomaster, Tracel e WD Master. Entre as estrangeiras com produtos credenciados, destacam-se as chinesas Central Solar e Link e a espanhola Ingeteam. Já fabricantes como Livoltek, PHB, Renovigi e SNA não mantêm produtos credenciados.

Os fabricantes locais enfrentam forte concorrência de produtos importados, particularmente chineses, como os da Huawei, Deye e Growatt (Badra, 2024). Atuam também no mercado interno diversas outras empresas como, por exemplo, as europeias Siemens, Fronius, Fimer e Santerno.

Rastreadores solares

Rastreadores solares (ou *trackers*) são equipamentos com um ou mais eixos, ligados à estrutura metálica dos painéis para movimentar os módulos e, assim, otimizar a captação da irradiação solar. Seu uso é especialmente atrativo em sistemas terrestres com alta irradiação direta, aumentando o rendimento energético em 10% a 20% nos modelos de eixo único e em 20% a 30% nos de eixo duplo (IEA PVPS, 2023).

Rastreadores também devem ser credenciados para serem considerados componentes de sistemas fotovoltaicos credenciados. Há, no momento, alguns fabricantes que atendem a esse requisito, entre eles: Array STI, Brafer, Brametal, Convert, GameChange, Nextracker (Flextronics), Romagnole, Soltec e Trina Solar. Destaca-se que alguns deles estão localizados na região Nordeste, onde se formaram competências nesse segmento. Há ainda, no mercado nacional, fornecedores não credenciados que importam produtos para revenda.

O fornecimento de rastreadores não enfrenta restrições de capacidade. A caixa de controle, com gabinete plástico ou metálico, contendo placas de circuito impresso, é fabricada no país. O rastreador possui estrutura metálica com acionamento integrado, incluindo controladores, motores e redutores. Devido à eletrônica digital embarcada, podem ser credenciados devido ao cumprimento de PPBs.

Baterias estacionárias e sistemas de armazenamento

A utilização de sistemas de armazenamento de energia apresenta sinergia com a geração fotovoltaica, uma vez que essa é uma fonte de energia intermitente. Apesar disso, o uso desses sistemas ainda é incipiente no Brasil.

Sistemas híbridos combinam geração e armazenamento de energia. Usinas híbridas utilizam sistemas de geração fotovoltaica (ou eólica) e de armazenamento para estabilizar a injeção de energia na rede e fornecer serviços auxiliares, como estabilidade de tensão e resposta rápida a picos de energia. Também aumentam o fator de capacidade das unidades produtoras, permitem postergar a injeção do excedente gerado em sistemas interligados, protegem o consumidor quanto à elevação dos preços e, adicionalmente, reduzem custos ou eliminam prejuízos com a falta de fornecimento (EPE, 2018).

Sistemas de armazenamento usam baterias estacionárias, projetadas para fornecimento contínuo de energia em locais fixos. Baterias são essenciais em sistemas *off-grid* para fornecer energia em períodos de pouca ou nenhuma luz solar. Até recentemente, quase todas as baterias usadas em sistemas fotovoltaicos eram do tipo chumbo-ácido (IEA PVPS, 2023). Porém, baterias com elementos de níquel-cádmio (NiCad), níquel-hidreto metálico (NiMH) ou íon-lítio (Li-Ion) passaram a ser utilizadas, trazendo as vantagens de não poderem ser sobrecarregadas ou profundamente descarregadas.

Sua vida útil varia, dependendo do regime e das condições operacionais, entre cinco e dez anos, podendo ser recondiionadas com a substituição desses elementos. No momento, apenas Moura e Weg estão credenciadas como fabricantes de baterias estacionárias.

Há poucos fabricantes com produtos de comprovada eficácia sendo comercializados no mercado interno. Devido ao uso de minerais críticos, pode-se antever dificuldades para entrada de insumos importados no mercado local, bem como restrições à comercialização de componentes. Assim, essa cadeia de valor apresenta oportunidades para desenvolvimento tecnológico e fabricação locais.

Dada a relevância de baterias e sistemas de armazenamento para a geração fotovoltaica no país, bem como o número limitado de fabricantes credenciados, é recomendável fomentar PD&I para superar barreiras tecnológicas. São necessários desenvolvimentos ou melhorias para reduzir custos, bem como aumentar segurança, vida útil e eficiência (EPE, 2018).

Globalmente, há iniciativas para desenvolver baterias com novos materiais. Enquanto as de chumbo-ácido e chumbo-carbono estão obsoletas devido ao uso de contaminantes, as de íon de lítio, embora avançadas, podem aquecer ou explodir. Alternativas em desenvolvimento incluem baterias que utilizam, na acumulação de carga, fosfato de lítio-ferro, níquel-hidrogênio, óxidos de lítio-titânio e níquel-manganês-cobalto, brometo de zinco, além de baterias experimentais à base de sal fundido e cloreto de estrôncio. Além disso, o nióbio pode ser usado nos ânodos de baterias de íon de lítio para melhorar sua condutividade elétrica, resistência à corrosão, carregamento rápido e durabilidade.

Medidores bidirecionais

Medidores bidirecionais são essenciais em sistemas fotovoltaicos que funcionam integrados ao sistema elétrico interligado (*on-grid*). Eles são utilizados para mensurar tanto a energia excedente injetada na rede como a energia consumida quando a geração local é insuficiente.

Medidores inteligentes, por sua vez, gerenciam sistemas geradores quando não se deseja interações com o sistema interligado, em modo de funcionamento *zero-grid*. Realizam também funções de automação, operando de forma integrada aos respectivos inversores. São itens passíveis de credenciamento segundo as regras vigentes, sendo, inclusive, análogos aos medidores elétricos residenciais.

Os fabricantes credenciados são Eletra e Nansen, mas há produtos de outras empresas brasileiras, como Weg e Ecil, que ainda não têm credenciamento. Grandes fornecedores globais também atuam no mercado brasileiro via importação, como Schneider Electric, Siemens, ABB e Growatt. No entanto, produtos importados enfrentam barreiras técnicas, especialmente requisitos de segurança e certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro).

Células fotovoltaicas

Atualmente, não há fabricação de células fotovoltaicas no Brasil. A metodologia de credenciamento do BNDES, inicialmente, exigia a produção local a partir de 2020. Contudo, essa condição foi flexibilizada posteriormente, uma vez que os investimentos e a escala para viabilizar uma unidade industrial de células são significativamente superiores aos necessários para a fabricação de módulos fotovoltaicos.

Na década de 2010, a produção de células de silício cristalino demandava ao menos 500 MW e investimentos acima de R\$ 450 milhões (Ramos *et al.*, 2018). Hoje, novas tecnologias e materiais permitem plantas menores, com capacidade da ordem de 10 a 20 MW/ano. Assim, é essencial acompanhar o mercado e as decisões de investimento para entender a dinâmica a ser estabelecida e antever os gargalos que possam surgir.

Esse segmento apresentou uma evolução inicial no país, com três fabricantes de módulos de silício cristalino habilitados no Padis para desenvolver projetos de nacionalização de produtos. Foram eles: S4 Solar, Pure Energy e BYD. Contudo, apenas a BYD permanece ativa no mercado interno, aguardando melhores perspectivas para retomar seus investimentos.

Na tecnologia de filmes finos não havia grandes obstáculos para fabricação local, mas sua maturação foi mais lenta do que do silício cristalino. Assim, não há previsão de investimentos para nacionalização de insumos ou fabricação local no curto prazo.

O projeto da entidade Swiss Center for Electronics and Microtechnology (CSEM) com tecnologia OPV merece destaque. Foi desenvolvido no país pela subsidiária Sunew, que implantou o processo industrial de impressão (*roll to roll*) de células e desenvolveu uma mistura das tintas fotovoltaicas.

A Sunew iniciou suas operações em 2014, após investimentos superiores a R\$ 100 milhões realizados pela CSEM, por empreendedores e por investidores. Em 2015, a empresa obteve os incentivos fiscais do Padis para atividades de concepção, desenvolvimento e projeto (*design*), processamento físico-químico, corte, encapsulamento e teste de filmes fotovoltaicos orgânicos. Chegou a produzir 11 mil metros lineares de filmes finos por ano para atender clientes como Petrobrás, Totvs e Natura. Com isso, tornou-se uma das principais fornecedoras de OPV no mundo.

Enfrentando dificuldades financeiras a partir de 2017, interrompeu sua produção em 2021, mantendo apenas atividades administrativo-financeiras e instalações produtivas enquanto aguarda novos clientes ou a possibilidade de futuras capitalizações.

Oportunidades para o desenvolvimento da cadeia de fornecedores no Brasil

O desenvolvimento da cadeia de fornecedores de sistemas de geração fotovoltaica geraria aplicações diversas e externalidades positivas para outros setores econômicos. O Quadro 4 sintetiza algumas das oportunidades e desafios de desenvolvimento dessa cadeia no país.

Quadro 4 | Oportunidades e desafios de desenvolvimento na cadeia fotovoltaica

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Silício 2804,69.00 – com grau de pureza inferior a 99,99%.	- O país possui as maiores reservas mundiais de quartzo leitoso e seu beneficiamento local ocorre de forma abundante. - O quartzo precisa ser beneficiado até elevado grau de pureza, produzindo silício de grau solar.	- Não há beneficiamento de silício de grau eletrônico ou solar no Brasil. - A produção de silício de grau metalúrgico no Brasil, segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), é realizada por empresas em Minas Gerais, porém é voltada para exportação.	- O silício de grau eletrônico é o principal insumo da indústria eletrônica. - Há rotas derivadas da produção de silício metalúrgico para produção de silício de grau solar, fibras óticas e vidros especiais. - A purificação do silício promove elevada agregação de valor.

(Continua)

(Continuação)

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Lingote de silício cristalino 2804.61.00 – com grau de pureza superior a 99,99%.	Lingotes devem ser manufaturados a partir de silício cristalino de grau solar por meio de processos físico-químicos altamente intensivos em capital, água e energia.	- Não há fabricação de lingotes no Brasil. - Seriam necessários investimentos superiores a US\$ 135 milhões para uma capacidade de 1.000 t/ano (Pizzini, 2010).	Os processos de fabricação de lingotes são similares para aplicações fotovoltaicas ou eletrônicas.
Wafer semicondutor 3818.00.10 – de silício. 3818.00.90 – de outros materiais.	Wafers são fabricados a partir da laminação e tratamento superficial de lingotes de silício cristalino.	- Não há fabricação de wafers no Brasil. - Seriam necessários investimentos da ordem de US\$ 150 milhões para processar insumos de 1.000 t/ano.	Os processos de fabricação de wafers são similares para aplicações fotovoltaicas ou eletrônicas.
Célula fotovoltaica 8541.42.90 e 8541.42.20 – inorgânicas. 8541.42.10 – orgânica.**	Células fotovoltaicas são fabricadas a partir de wafers de silício por processos de dopagem, soldagem, inspeção e testes.	- Não há fabricação de células no Brasil, porém fabricantes de painéis podem internalizar esta atividade. - Seriam necessários investimentos da ordem de US\$ 130 milhões para garantir fornecimento de 500 MW/ano (Ramos <i>et al.</i>, 2018).	Possível utilização das células em setores industriais diversos, como o automotivo, agroindustrial e aviação.

(Continua)

(Continuação)

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Módulo ou painel fotovoltaico 8541.43.00 – célula montada.	Módulos são produzidos a partir de células através de corte a <i>laser</i>, soldagem e encapsulamento em vidro; cabeamento, montagem e selagem.	- Há quatro fabricantes ativos no país de módulos fotovoltaicos. - Estima-se que investimentos para plantas de 100 MW/ano giram em torno de US\$ 10 milhões.	Há empresas que realizam processos análogos de encapsulamento de semicondutores no país.
Vidro 7003.19.00 – laminado em outras chapas ou folhas não armadas.	- Baixo teor de ferro em sua composição, que garante altas taxas de transmitância da luz solar e eficiência. - O baixo teor de ferro pode ser atingido por meio do beneficiamento da areia utilizada.	- Há fabricação no Brasil, porém empresas nacionais não produzem em grande volume e têm dificuldades para escoar sua produção devido aos acordos dos fabricantes de painéis com grandes fornecedores mundiais, que supostamente oferecem produtos de maior qualidade. - Há oportunidades para otimizar custos logísticos, caso ocorra ampliação da demanda, por meio da internalização desse elo, mediante parcerias entre fabricantes de painéis e vidros especiais.	- Aplicação em espelhos para energia heliotérmica. - Uso arquitetônico. - Proteção e encapsulamento de iluminação a <i>light emitting diode</i> (LED).

(Continua)

(Continuação)

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Cabeamento externo e caixa de junção 8535.30.19 - 1000V < tensão. 8536.90.90 – tensão ≤ 1000V.	• Têm a função de conectar diferentes componentes de um sistema fotovoltaico. • Devem respeitar os requisitos da NBR 16612/2017 para garantir resistência a intempéries, isolamento e temperatura de funcionamento adequados.	• Há diversos fornecedores de insumos no país, como terminais e conectores, fusíveis e disjuntores, fios e cabos e diodos, bem como caixas metálicas e plásticas. • Os fabricantes locais enfrentam concorrência de produtos importados.	• Possível utilização em setores industriais diversos, como o automotivo, agroindustrial e aviação.
Inversor 8504.40.90 – outros conversores estáticos.	• <i>On-grid</i>: capaz de interligar o sistema à rede da concessionária por meio da sincronização de sua frequência, que no Brasil é de 60Hz, e de sua tensão de saída. • <i>Off-grid</i>: necessidade de baterias e controladores de carga interligados. • A depender da aplicação e potência, possuem diferentes configurações.	• Há fabricantes credenciados no BNDES para fornecer inversores solares de grande porte. • Há poucos fabricantes de inversores para micro e minigeração credenciados.	• Uso em setores industriais diversos mediante configuração. • Fabricantes nacionais realizam PD&I local e detêm tecnologias desenvolvidas no país, utilizadas em inversores para micro e minigeração distribuída.

(Continua)

(Continuação)

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Sistema gerador fotovoltaico Corrente contínua: 8501.71.00 – potência ≤ 50 W; 8501.72.10 – $50W < \text{potência} \leq 75$ kW; 8501.72.90 – $75kW < \text{potência}$; Corrente alternada: 501.80.00.	Os requisitos de funcionamento são determinados pelo MME, Aneel e Inmetro.	Há diversos fornecedores locais.	- A metodologia de credenciamento do BNDES é semelhante à de geradores eólicos. - Compartilha regulamentação e mercado de energias renováveis com o setor eólico.

Fonte: Elaboração própria.

*Categorização conforme a Nomenclatura Comum do Mercosul (NMC).

**Os códigos NCMs 8541.42.90 e 8541.42.20 sucedem os 8541.40.16/8541.40.18, bem como o código 8541.20.10 sucede o 8541.40.17.

Embora exista uma configuração padrão para sistemas fotovoltaicos na metodologia de credenciamento do BNDES e nos incentivos fiscais vigentes, alguns equipamentos desempenham funções adicionais relevantes. Seu uso tem crescido rapidamente nos últimos anos, trazendo oportunidades, desafios e externalidades para outras cadeias produtivas (Quadro 5).

Quadro 5 | Oportunidades e desafios de desenvolvimento de outros equipamentos

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Medidor bidirecional de energia 9028.30 – contadores de eletricidade.	- Necessários em sistemas <i>on-grid</i> ou para implementar estratégias <i>zero-grid</i> em sistemas voltados para autoconsumo. - Devem satisfazer requisitos da NBR 16078/2012 sobre a precisão e confiabilidade de medição, integração com inversores e sistemas de monitoramento.	Há fabricantes locais de medidores de energia, apesar da função bidirecional ser particular em sistemas de geração fotovoltaica.	Há ampla gama de fabricantes de medidores de gás, água e energia no país com capacidade de fabricação para o setor de energia fotovoltaica.
Estrutura de sustentação fixa 7604.10.21 – perfil de alumínio não-ligado. 7610.90.00 – outras estruturas de alumínio. 7616.99.00 – outras obras de alumínio.	Devem respeitar os requisitos da NBR 8800/2008 para garantir resistência e durabilidade, leveza e estabilidade, bem como proteção contra corrosão, devendo ser preferencialmente modulares e acessíveis para facilitar a passagem de cabos.	- Há diversos fornecedores de insumos no país, como perfis de alumínio (para instalações em tetos de edificações) ou de aço (para montagens no solo). - Os fabricantes locais enfrentam concorrência de importados.	Possível utilização em setores industriais diversos, como o automotivo, agroindustrial e aviação.
Rastreador solar (tracker) 8479.89.99 – outras máquinas e aparelhos mecânicos.	Devem garantir precisão de posicionamento, durabilidade e resistência, preferencialmente tendo operação e manutenção facilitadas.	- Há diversos fabricantes no país que enfrentam concorrência de importados. - Há uma concentração dos fabricantes na região Nordeste, algo que estimula o desenvolvimento regional.	Fabricantes nacionais realizam PD&I local e buscam desenvolver tecnologias no país.

(Continua)

(Continuação)

Insumo/ componente*	Condição necessária para aplicação em sistemas fotovoltaicos	Condição atual da cadeia no Brasil	Transversalidade da tecnologia
Bateria estacionária 8507.20.10 - chumbo-ácido. 8507.60.00 - íon de lítio.	Devem satisfazer requisitos específicos de carga e potência, profundidade de descarga, eficiência e durabilidade, além de funcionarem de forma segura e integrada a inversores e sistemas de armazenamento.	- Há lideranças locais no segmento de baterias de chumbo-ácido e fornecedores de baterias de íons de lítio, porém não há fabricação local de células de armazenamento de energia. - O Brasil dispõe de boas reservas de minerais críticos e de materiais estratégicos usados na fabricação.	- Utilização potencial em outros setores como o automotivo. - Seu desenvolvimento local estimula a transformação de minerais críticos e materiais estratégicos no país.
Sistema de armazenamento de energia Acumuladores: 8507.20.90 – baseados em baterias de chumbo-ácido com peso < 1000 kg; 8507.80.00 – outros baseados em baterias. Sistemas: 8537.10.90 – tensão ≤ 1000 V; 8537.20.90 – outros.	Além de todos os requisitos de baterias, devem satisfazer as necessidades de gerenciamento de energia e monitoramento remoto.	Há diversos fornecedores no país, porém os fabricantes locais enfrentam concorrência de importados.	- Os fabricantes são os que atendem ao setor elétrico nas necessidades de gestão de sistemas de geração de energia. - Fabricantes deverão enfrentar novos desafios para desenvolver sistemas capazes de integrar e gerenciar o uso de fontes de energia híbridas.

Fonte: Elaboração própria.

*Categorização conforme a Nomenclatura Comum do Mercosul (NMC).

Os segmentos da cadeia fotovoltaica com maior potencial de desenvolvimento no país são: (i) equipamentos adicionais aos sistemas de geração, como inversores e rastreadores; e (ii) produtos de armazenamento de energia, como baterias e BESS. No primeiro caso, há competências locais que viabilizam o desenvolvimento de equipamentos competitivos; já no segundo caso, destacam-se a abundância de minerais críticos e a existência de uma política pública orientada à sua transformação.

Considerações finais

Com base na análise realizada neste artigo, é possível indicar recomendações para políticas públicas voltadas ao desenvolvimento da indústria fotovoltaica instalada no Brasil. Em primeiro lugar, recomenda-se o estabelecimento de uma estratégia de desenvolvimento que articule os instrumentos das políticas existentes, reforçando-os e corrigindo condições desfavoráveis à produção local que ainda persistem.

Os incentivos tributários à geração de energia fotovoltaica devem estar alinhados às demais políticas de desenvolvimento da cadeia produtiva. A redução ou eliminação de regimes ex-tarifários, a elevação do imposto de importação e a revisão das cotas de importação podem equilibrar a competitividade entre a fabricação local e a importação de módulos fotovoltaicos.

Para harmonizar a concessão de crédito entre as instituições financeiras públicas, é necessário adotar referências uniformes de agregação de valor local, como as estabelecidas pelo BNDES no credenciamento Finame. Isso pode fortalecer a política de financiamento em direção a um maior adensamento produtivo local, especialmente em programas federais. Recomenda-se, ainda, a diferenciação das condições de apoio, de modo a oferecer soluções mais vantajosas que apresentem maior agregação de valor local.

Nesse sentido, é importante divulgar amplamente os instrumentos lançados pelo BNDES nos últimos anos, como o Programa BNDES Mais Inovação, o Fundo Clima e o subprograma desse fundo voltado para máquinas e serviços. Alavancar os recursos do Fundo Clima, por exemplo, pode impulsionar a demanda na indústria local, sobretudo

se alinhados às regras de credenciamento da Finame, priorizando a aquisição de módulos e sistemas nacionais.

A organização de leilões de energia, por sua vez, é uma medida relevante que vem sendo discutida pelo Governo Federal para fomentar a implantação de capacidade híbrida de geração de energia, que inclui a geração mista (solar, eólica e hidrelétrica) e a combinação com sistemas de armazenamento de energia.

Além disso, é importante utilizar o poder de compra do estado, por exemplo, na implantação de capacidade de geração em instalações da administração pública federal, bem como ampliar programas sociais e de infraestrutura, como o Minha Casa, Minha Vida e o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). Essas medidas podem estimular a adoção de sistemas de geração fotovoltaica fabricados no país.

Para fomentar a inovação tecnológica, é crucial apoiar o segmento de minerais críticos e materiais estratégicos, considerando o emprego de tecnologias promissoras - como o carbeto de silício, o grafeno e a perovskita - para os sistemas de geração fotovoltaica, bem como o lítio e o nióbio para sistemas de armazenamento e baterias. Para dar escala a projetos desse segmento, é importante articular fontes de financiamento à inovação.¹⁸ Além disso, deve-se acompanhar o impacto das mudanças recentes na legislação e regulamentação, especialmente aquelas relacionadas aos PPBs e Padis, a fim de avaliar a necessidade de medidas adicionais que visem à geração de valor e ao desenvolvimento tecnológico nacional.

18 Nesse sentido, o BNDES lançou, em 2025, um fundo de investimentos em participações (FIP) e uma chamada de projetos com foco em minerais estratégicos, além de existir a possibilidade de financiamento por meio do programa BNDES Mais Inovação. Algumas outras fontes de financiamento são: a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), especialmente por meio do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT); a Aneel, por meio do Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação; a Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii); e o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (Senai).

Recomenda-se, ainda, refinar as normas de certificação, qualidade e metrologia. A Portaria 140, de 21 de março de 2022, do Inmetro, regulamentou normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), consolidando o regulamento técnico da qualidade e os requisitos de avaliação da conformidade para equipamentos de geração, condicionamento e armazenamento de energia elétrica em sistemas fotovoltaicos. Tal regulamento, aplicável a módulos, controladores de carga, inversores e baterias estacionárias de baixa intensidade de descarga, exige que os sistemas e equipamentos estejam em conformidade para que possam ser comercializados no Brasil. Diante disso, é importante reforçar a verificação de conformidade dos produtos com as normas técnicas vigentes no país.

Por fim, as normas e regulamentos vigentes também podem ser aprimorados para aumentar a percepção de confiabilidade e reduzir a percepção de risco na utilização dos produtos fotovoltaicos, bem como garantir a adequada aferição da medição na geração e no consumo de energia em transações comerciais. Nesse sentido, recomenda-se estudar a inclusão dos fotovoltaicos no arcabouço da metrologia legal.

Essas são recomendações preliminares de políticas que devem ser aprofundadas e detalhadas para restabelecer a articulação entre o ciclo de expansão da energia fotovoltaica no Brasil e o desenvolvimento da indústria nacional. O objetivo é alinhar a política energética à política industrial, promovendo a necessária transição para uma economia de baixo carbono combinada com o desenvolvimento industrial e a geração de emprego e renda no país.

Referências

ABRACEEL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA. *Expansão da oferta de geração para o mercado livre*. Brasília, DF: ABRACEEL, 2023. Disponível em: <https://abraceel.com.br/wp-content/uploads/2023/08/Estudo-Abraceel-2023-Expansao-geracao-ACL.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

ALEINA. Top 20 global photovoltaic module manufacturers revealed by PVBL. *PVTIME*, Changchun, 12 jun. 2024. Disponível em: <https://www.pvtime.org/2024-top-20-global-photovoltaic-module-manufacturers-revealed-by-pvbl/>. Acesso em: 9 jan. 2025.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Leilões*. Brasília, DF: Aneel, 15 fev. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/leiloes>. Acesso em: 9 jan. 2025.

BADRA, M. *Ranking* mostra marcas de inversores híbridos mais citadas pelos integradores. *Canal Solar*, Campinas, 19 set. 2024. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/ranking-marcas-inversores-hibridos-integradores/>. Acesso em: 9 jan. 2025.

BAGADE, S. S. *et al.* Recent advancements in applications of graphene to attain next-level solar cells. *Journal of Carbon Research*, Basel, v. 9, n. 70, p. 1-33, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2311-5629/9/3/70>. Acesso em: 8 jan. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Regulamento para o credenciamento de máquinas, equipamentos, sistemas industriais e componentes no credenciamento Finame (CFI)*. Rio de Janeiro: BNDES, 2017. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/a04f8185-e24c-445f-ae45-3d922b67c218/novo-regulamento-de-credenciamento.pdf?MOD=AJPERES&CVID=l-xjshy>. Acesso em: 8 jan. 2025.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Regulamento setorial para o credenciamento de sistemas estacionários para armazenamento de energia com baterias e com hidrogênio no âmbito do CFI do Sistema BNDES*. Rio de Janeiro: BNDES, 2022. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/1c09a756-f3ae-42bb-abdc-9629deda29c0/Regulamento+Setorial+para+Armazenamento+de+Energia.pdf?MOD=AJPERES&CVID=o4BFZ5Z>. Acesso em: 8 jan. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. Brasília, DF: MME; EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional (ano base 2022)*. Brasília, DF: MME; EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

CLOVER, I. EU, China request consultation with US over solar tariffs. *PV Magazine*, [s. l.], 8 fev. 2018. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2018/02/08/eu-china-requests-consultation-with-us-over-solar-tariffs-wto-filing-shows/>. Acesso em: 24 jan. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Nota Técnica DEA 19/2014*: inserção da geração fotovoltaica distribuída no Brasil – condicionantes e impactos. Brasília, DF: EPE, 2014. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20\(Revisada\)%5B1%5D.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2019%20-%20%20Inser%C3%A7%C3%A3o%20da%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20Fotovoltaica%20Distribu%C3%ADa%20no%20Brasil%20-%20Condicionantes%20e%20Impactos%20VF%20%20(Revisada)%5B1%5D.pdf). Acesso em: 8 jan. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Nota Técnica PR 04/18*: potencial dos recursos energéticos no horizonte 2050. Brasília, DF: EPE, 2018. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-416/NT04%20PR_RecursosEnergeticos%202050.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Nota Técnica EPE-DEE-03/20*: projetos fotovoltaicos nos leilões de energia: análises dos leilões A-4 e A-6 de 2019. Brasília, DF: EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-457/NT%20EPE-DEE-003-2020-r0.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 (ano base 2022)*. Brasília, DF: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

GREENER. *A evolução do mercado fotovoltaico no Brasil pelos dados do estudo estratégico de geração distribuída*. São Paulo: Greener, 28 fev. 2023. Disponível em: <https://www.greener.com.br/a-evolucao-do-mercado-fotovoltaico-no-brasil/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

HOPKINS, M.; LAZONICK, W. Soaking up the sun and blowing in the wind: clean tech needs patient capital. Cambridge, MA: University of Massachusetts Lowell, 2013. (Working Paper n. 13-08/01).

IEA PVPS – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Trends in photovoltaic applications 2023 and 2024*. Paris: IEA PVPS, 2023. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/10/PVPS_Trends_Report_2023_WEB.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

IEA PVPS – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Snapshot of global PV markets 2024*. Paris: IEA PVPS, 2024. Disponível em: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2024/>. Acesso em: 8 jan. 2025.

INGENITO, A. *et al.* Phosphorous-doped silicon carbide as front side full-area passivating contact for double-side contacted c-Si solar cells. *IEEE Journal of Photovoltaics*, Piscataway, v. 9, n. 2, p. 346-354, mar. 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8588322>. Acesso em: 8 jan. 2025.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Total solar capacity. *Our World in Data*, 2024. Oxford, Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity>. Acesso em: 9 jan. 2025.

JONES, F. A corrida pelas células solares de perovskita. *Revista pesquisa Fapesp*, São Paulo, 6 dez. 2023. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/a-corrida-pelas-celulas-solares-de-perovskita/>. Acesso em: 9 jan. 2025.

MOEHLECKE, A. *et al.* Desenvolvimento de células solares N+NP+ em lâminas de silício de 100 µm de espessura. *Matéria*, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/cC7S8fsRgYJgJBnQL6qnzZG/?lang=pt>. Acesso em: 22 jan. 2025.

MONTENEGRO, A. Avaliação do retorno do investimento em sistemas fotovoltaicos integrados a residências unifamiliares urbanas no Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/130917>. Acesso em: 10 jan. 2025.

PIZZINI, S. Towards solar grade silicon: challenges and benefits for low-cost photovoltaics. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Amsterdam, v. 94, n. 9, p. 1528-1533, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024810000310>. Acesso em: 10 jan. 2025.

PLATZER, M. *U.S. solar photovoltaic manufacturing: industry trends, global competition, federal support*. Washington, D.C.: Congressional Research Service, 2015. Disponível em: <https://sgp.fas.org/crs/misc/R42509.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

RAMOS, C. *et al. Cadeia de valor da energia solar fotovoltaica no Brasil*. Brasília, DF: Sebrae, 2018.

REN21 – RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21ST CENTURY. Solar PV. In: REN21. *Renewables 2014 - Global Status Report*. Paris: REN21, 2014. p. 47-50. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2014_Full-Report_English.pdf. Acesso em: 10 jan. 2025.

SCHULTZ, S. Bankruptcies have german solar on the ropes. *Spiegel Online International*, Hamburg, 3 abr. 2012. Disponível em <http://www.spiegel.de/international/business/q-cells-bankruptcy-heralds-end-of-german-solar-cell-industry-a-825490.html>. Acesso em: 24 jan. 2025.