

AS POLÍTICAS DE INOVAÇÃO EM SOLAR FOTOVOLTAICA (FV) NOS PAÍSES LÍDERES: O QUE O BRASIL PODE APRENDER?

EDILAINE VENANCIO CAMILLO

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Política Científica e Tecnológica, Brasil
edilaine.camillo@gmail.com

JENYFEER ANDREA MARTÍNEZ BUITRAGO

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Política Científica e Tecnológica, Brasil
Jenyfeer.buitrago@ige.unicamp.br

ANDRÉ TOSI FURTADO

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Política Científica e Tecnológica, Brasil
furtado@ige.unicamp.br

RESUMO

O Brasil tem adotado recentemente medidas para expandir a adoção da tecnologia FV, sinalizando a introdução definitiva da energia solar FV na matriz elétrica. Nesse contexto, o artigo apresenta uma análise comparativa das políticas de inovação de um conjunto de países líderes no desenvolvimento e adoção da tecnologia FV com o objetivo último de buscar lições que possam reorientar a estratégia brasileira de promoção à tecnologia FV. Os países analisados – Estados Unidos, Alemanha, Japão e China – foram selecionados em função de sua liderança em capacidade instalada em solar FV, atuação em toda a cadeia produtiva de sistemas FV e estágio em que entrou na indústria (início ou final da trajetória). As políticas foram mapeadas desde a crise do petróleo até o ano 2014 e classificadas por esfera de atuação – *technology push* ou *demand pull* e por tipo de instrumento. Por fim, foram analisadas as políticas brasileiras de estímulo ao desenvolvimento da tecnologia e à criação de mercado local encontrando-se que, comparado aos países líderes, as medidas adotadas pelo Brasil ainda são incipientes e há muito que se fazer para que se componha uma estratégia nacional de desenvolvimento da indústria que combine de forma coordenada instrumentos específicos de fomento à tecnologia, à indústria e ao mercado.

1. INTRODUÇÃO

As células solares fotovoltaicas foram inventadas nos laboratórios Bell (Estados Unidos) em 1954, sendo usadas para aplicações de satélites desde o fim dos anos de 1950. O choque do petróleo dos anos 70's levou à instituição de políticas para o desenvolvimento da tecnologia em países tais como Estados Unidos, Alemanha e Japão, o contribuiu para o pioneirismo desses países no desenvolvimento da tecnologia. Porém, essas políticas, com foco em predominantes em programas de P&D, perderam relevância frente à queda dos preços do petróleo em meados dos anos 1980, relegando sua aplicação só para pequenos nichos de mercado. Questões ambientais e outras relacionadas à segurança energética impulsionaram a retomada das políticas de promoção à solar FV no início dos anos de 1990 com uma perspectiva mais multifacetada e de longo prazo, que acabaram por impulsionar o

desenvolvimento da tecnologia nas últimas décadas. Já a sua difusão se acelerou especialmente a partir de meados dos anos 2000.

Nos últimos anos, a dinâmica da indústria de solar FV tem-se modificado pela entrada de novos países ao processo de difusão. A competitividade crescente da indústria decorre principalmente da entrada da China – e o crescimento exponencial do seu mercado e da sua indústria de painéis fotovoltaicos – o que desencadeou mudanças nas políticas dos países que foram tradicionalmente líderes com a tecnologia. Esses países têm implementado novos programas de pesquisa e projetos demonstrativos, visando manter ou recuperar a competitividade por meio do avanço na fronteira do conhecimento.

O Brasil tem adotado recentemente medidas para expandir a adoção da tecnologia FV, sinalizando que a introdução definitiva da energia solar na matriz elétrica. Mas comparado aos países líderes, as medidas adotadas pelo Brasil ainda são incipientes e há muito que se fazer para que se componha uma estratégia nacional de desenvolvimento da indústria que combine de forma coordenada instrumentos específicos de fomento à tecnologia, à indústria e ao mercado.

Nessas circunstâncias, o artigo apresenta uma análise comparativa das políticas de inovação de um conjunto de países líderes no desenvolvimento e adoção da tecnologia FV com o objetivo último de buscar lições que possam reorientar a estratégia brasileira de promoção à tecnologia FV. Trabalha-se com a perspectiva evolucionária do desenvolvimento econômico, tendo por pressuposto que as políticas de inovação devem ser coordenadas, multifacetadas, coevoluir com a tecnologia e a indústria e ser adequadas ao contexto de desenvolvimento local (Dosi, 1982; Nelson, 1994; Kim, 1997; Kemp, 1997).

Busca-se, especificamente, (i) demonstrar que as políticas coevoluem com a tecnologia e com a indústria, de forma que o estágio de desenvolvimento da tecnologia e o contexto local deve ser levado em consideração na implementação de uma estratégia nacional; (ii) avaliar caso brasileiro com base na experiência desses países para, por fim, buscar lições que possam reorientar a estratégia brasileira de promoção à tecnologia FV.

O artigo está organizado em seis seções, considerando esta introdução e as conclusões. A segunda apresenta uma contextualização da energia solar fotovoltaica, tanto em termos de tecnologia quando de países que vem liderando o seu desenvolvimento e a expansão do mercado. A terceira seção introduz os processos metodológicos seguidos durante a pesquisa. A quarta se concentra na análise das políticas tecnológicas e de criação dos países líderes, se iniciando com uma breve apresentação do raciocínio teórico que embasa a análise. A quinta seção analisa as medidas de estímulo a inserção da solar fotovoltaica no país, tendo por base a experiência dos países internacionais.

2. A ENERGIA SOLAR FVOLTÁICA

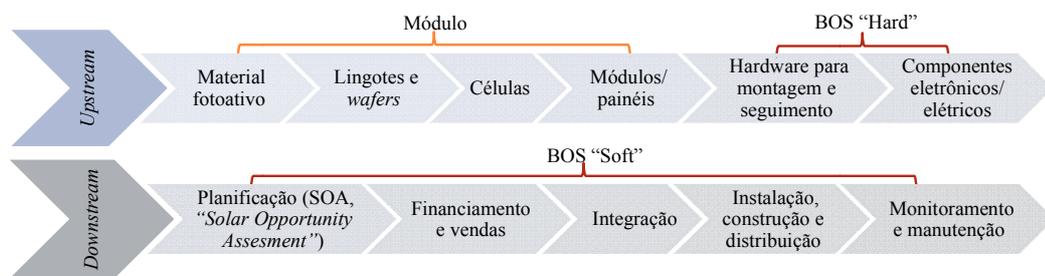
As fontes de geração que usam a energia do sol podem ser classificadas em passivas e ativas, e de concentração e não concentração. As tecnologias ativas – térmicas e fotovoltaicas (FV) – transformam a radiação solar em energia.

Os sistemas solares FV são formados pelas tecnologias do módulo – composto de células solares – e pelas tecnologias complementares (ou BOS, por sua sigla em inglês “*Balance of System*”). As células solares¹ necessitam de um material que absorva a luz (material ativo) e

¹ Existem diferentes tipos de células e nível de difusão no mercado (IRENA, 2012): primeira geração – células de silício cristalino (mono e multic-Si) e EFG Ribbon(EFG ribbon-sheetc-Si); segunda geração – células de

sua principal função é capturar fótons e livrar elétrons (efeito fotoelétrico). Já o BOS é formado por todos os dispositivos necessários para integrar os módulos e converter a corrente e os níveis de voltagem dos sistemas à rede, além dos procedimentos para fabricar e instalar os sistemas. Os sistemas podem ser conectados à rede centralizada e distribuída ou ter aplicação isolada. A Figura 2 apresenta a cadeia de valor que corresponde aos distintos componentes dos sistemas solar FV.

Figura 2: Cadeia de valor da indústria solar FV



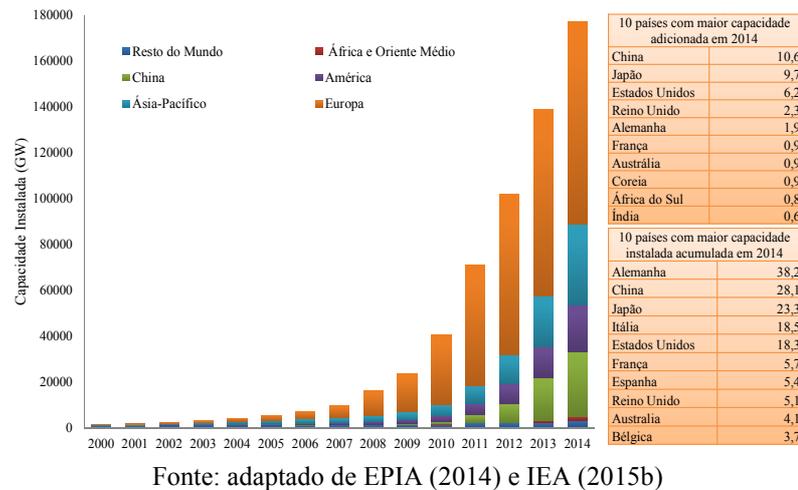
Fonte: elaboração própria

Vale observar que se trata de uma indústria de alta tecnologia e que as etapas mais intensivas em valor e conhecimento é a da fabricação do material fotoativo (purificação do silício) e dos lingotes e *wafers*. Até final dos anos 2000, essas etapas eram dominadas pelos países pioneiros em termos de conhecimento e de equipamentos. A China, que entrou na indústria em meados nos anos 2000 – visando à exportação de módulos para os Estados Unidos e Japão –, passou a ter um percentual de nacionalização relevante nessas etapas da cadeia apenas recentemente².

De fato, a emergência da China como fabricante de módulo mudou a dinâmica da indústria porque a liderança da produção foi deslocada mais uma vez e o ritmo de redução de custos imposto pelo país emergente gerou reflexos na competitividade da indústria dos países pioneiros. Com isto, a Ásia - com 87% da produção (67% somente na China) – vem liderando a produção mundial de módulos desde 2009(REN21, 2014). A análise da evolução das políticas tecnológicas e de mercado dos países pioneiros e da China ajudará a compreender melhor essas mudanças. A Figura 1 traz o crescimento exponencial da tecnologia em termos de capacidade instalada na última década, com destaque a China que se tornou em 2013 o maior mercado para solar FV no mundo.

película fina que podem ser de silício amorfo (a-Si ou a-Si/μc-Si) ou outros materiais (e.g. Cd-Te, CIS, CIGS); e terceira geração, que se encontra em fase de demonstração (e.g. células de polímeros, orgânicas, de concentração)
²La Tour, Glachant&Ménier (2011) destacam que a aquisição de linhas de produção completas (tipo turn-key) de fabricantes de equipamentos para a produção de módulos explica o rápido crescimento da indústria chinesa nos anos 2000. O mercado é muito mais competitivo do que a purificação do silício e a fabricação de wafers ou lingotes nas etapas de produção de células e a montagem de módulos e há mais fornecedores de linhas de produção completas no mercado internacional

Figura 1: Evolução da capacidade instalada de solar FV no mundo e principais países



Fonte: adaptado de EPIA (2014) e IEA (2015b)

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Seguiu-se uma metodologia exploratória descritiva, de abordagem qualitativa, com base em dados secundários. Foram aplicados os seguintes passos, tomando como referência a metodologia proposta em Camillo (2013):

- (i) *Seleção dos países a serem estudados.* Para observar as diferentes estratégias de política aplicaram-se os seguintes critérios: liderança em capacidade instalada em solar FV, atuação em toda a cadeia produtiva de sistemas FV e estágio em que o país entrou na indústria (início ou final da trajetória). Para tanto, foi realizada uma primeira revisão da literatura, focando em artigos publicados em revistas indexadas. Como resultado, foram selecionados Estados Unidos, Alemanha, Japão e China. Em se tratando da trajetória de desenvolvimento da tecnologia de geração de energia a partir da solar FV, observou-se uma clara divisão nos países estudados: Japão, Estados e Alemanha são pioneiros e China é *latecomer*.
- (ii) *Mapeamento das políticas de inovação dos países líderes.* Uma vez que a literatura consultada não permitia observar as estratégias de política dos países selecionados com o detalhe requerido, foi necessário revisar todos os relatórios disponíveis para os países estudados na IEA-PVPS, complementando-os, quando necessário, com artigos científicos e relatórios de instituições governamentais (departamentos, ministérios etc.). Nesse sentido, construiu-se uma base de dados com todas as medidas de incentivo identificadas e o período de tempo no qual elas foram implementadas – abrangendo desde a primeira crise do petróleo, quando começam os programas de P&D em solar FV nos países líderes, até o ano 2014.
- (iii) *Classificação e análise das medidas de incentivo por esfera de atuação.* As medidas de incentivo foram classificadas tanto por tipo de políticas – tecnológicas (*technology push*) e políticas de criação de mercado (*demand pull*) – quanto por tipo instrumento – programas de P&D, projetos demonstrativos, subsídios ao investimento etc. Uma vez feita essa categorização, foi analisada a forma como essas medidas de incentivo evoluíram no tempo – junto com a agenda de pesquisa e a tecnologia – e a convergência das medidas entre os países na medida em que o contexto interno ou externo se alterava.
- (iv) *Análise das políticas brasileiras.* Por fim, foram analisadas as medidas de incentivo adotadas no *Brasil* para o desenvolvimento da tecnologia e à criação de mercado local para deprender lições. No que se refere à tecnologia, foram consultados dados disponíveis nas

chamadas públicas do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), dos fundos setoriais da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Quanto ao mercado, foram acessados documentos oficiais do governo.

4. AS POLÍTICAS DE INOVAÇÃO DOS PAÍSES LÍDERES

Trabalha-se, nesta pesquisa, com a perspectiva evolucionária do desenvolvimento econômico, tendo por pressuposto que as políticas inovação devem ser coordenadas, multifacetadas, coevoluir com a tecnologia e a indústria e ser adequada ao contexto de desenvolvimento local. Com base nesta perspectiva, considera-se que as políticas podem tanto catalisar a emergência de novas trajetórias tecnológicas, quando moldar e direcionar trajetórias em andamento (Dosi, 1982; Nelson, 1994; Kim, 1997; Kemp, 1997).

Para isto, as políticas para novas tecnologias de energia devem combinar e coordenar tanto mecanismos de oferta de tecnologia (*technology push*) quanto à criação de mercado (*demand pull*) (Mowery&Rosemberg, 1976; Mowery& Nelson, 2012), além da criação de um contexto internacional apropriado (Kemp, 1997). Os instrumentos devem ser específicos ao sistema tecnológico em questão, considerando as oportunidades tecnológicas variam de acordo com o tipo de atividade econômica, mais precisamente no interior cada setor (Pavitt& Walker, 1976; Dosi, 1988), de forma que indústrias diversas necessitam políticas e instituições de suporte também diversas, moldadas as suas demandas específicas.

Uma ou outra esfera de intervenção – tecnologia ou mercado – pode ter maior ou menor relevância dependendo do estágio de desenvolvimento da trajetória tecnológica (Dosi, 1982; Freeman, 1991), mas não se pressupõe que as etapas de desenvolvimento da tecnologia, desde a pesquisa básica até a comercialização, sigam por etapas lineares (Kline & Rosemberg, 1996). E, nem que o mercado deve ser criado somente ao final deste processo, já que é necessário que se crie estímulos para que ocorra o aprendizado tecnológico e se acelere o desenvolvimento e a difusão da tecnologia. Há uma estrutura complexa de *feed-backs* entre o ambiente econômico e a direção da mudança tecnológica (Dosi, 1982). E, tendo em vista que o processo de inovação é interativo, as políticas também devem abarcar instrumentos que estimulem a interação entre os diferentes atores da indústria e, por consequência, a formação de sistemas de inovação (Freeman, 1987).

Além disso, é necessário destacar as etapas da trajetória tecnologias são diferentes para países desenvolvidos e países em desenvolvimento, o que também determina tanto a ordem de importância das políticas do tipo *technology push* ou de criação de mercado, quanto o tipo de instrumento de política tecnológico a ser adotado por cada país. Os países inovadores ou pioneiros partem geralmente de uma inovação radical e de investimentos consideráveis em pesquisa básica, enquanto que os países em desenvolvimento (seguidores) entram na indústria por meio da importação de tecnologia. Nesses países as atividades de P&D só se tornam relevantes na fase de aperfeiçoamento da tecnologia, se a estratégia for a de realizar melhoramentos criativos de produtos já existentes (Kim, 2005).

Sendo assim, a análise a seguir busca: (i) destacar a evolução das políticas dos países pioneiros ou inovadores – Estados Unidos, Alemanha e Japão – em função do desenvolvimento da tecnologia e da indústria; (ii) demonstrar que a China, por ter entrado tardiamente, na indústria, replica instrumentos dos países pioneiros mas numa outra seqüência, que reflete seu contexto de atraso tecnológico.

4.1. Políticas tecnológicas

As políticas tecnológicas dos países pioneiros – Estados Unidos, Alemanha e Japão – dão início à trajetória em solar PV logo após a primeira crise do petróleo, enfatizando desde o início a pesquisa básica e à inovação. Já a China entra na indústria por meio da importação de tecnologia e as atividades de pesquisa e desenvolvimento ganham relevância quando o país já atingiu uma escala produtiva considerável.

No Japão, o *Sunshine Program* de 1974 acabou estimulando as fabricantes locais de eletrônicos a também investirem em P&D, numa proporção bem maior do que o subsídio governamental porque havia um orçamento estável e um comprometimento claro de longo prazo por parte do governo (Kimura & Suzuki, 2006). A Alemanha também intensificou, então, seus esforços tecnológicos em fontes alternativas de energia com o *Federal Research Program*, tendo a solar FV como uma das tecnologias promovidas. Nos Estados Unidos, o *Flat Plate Solar Array Project* (1975-1985), que buscava transferir o conhecimento concentrado pela NASA para aplicações terrestres (EERE, 2011). As pesquisas em *thin-film* também começam na década de 1970, marcando o pioneirismo do país nesta alternativa tecnológica.

A década de 1990 marcou uma nova etapa dos programas de P&D para solar FV nos países pioneiros: buscava-se ampliar a escala de produção, incorporando às agendas de pesquisa as tecnologias de processo e fabricação. No Japão, teve início a segunda fase do *Sunshine Program* (1993-2005) (*New Sunshine Project*) voltada para o aumento da demanda e da produção em massa (Chowdhury et al., 2014). Nos Estados Unidos, o *Photovoltaic Manufacturing Technology Project/FV Manufacturing R&D* de 1990 focava em engenharia de processo industrial e na P&D em materiais (silício cristalino). O *Thin-Film FV Partnership Project* de 1992 reforçava a opção dos Estados Unidos por seguir por duas rotas tecnológicas (a do silício cristalino e do thin-film).

Para testar a viabilidade e a segurança de inserção da energia solar na rede elétrica, os países pioneiros também começaram a investir em projetos demonstrativos ainda no início da década de 1980. O Japão criou o *New Energy Development Organization* (NEDO) para promover e executar os projetos demonstrativos em novas energias, tendo como foco a solar FV distribuída. Os projetos demonstrativos Estados Unidos e da Alemanha envolviam tanto sistemas de larga escala (de nível de concessionária de eletricidade), quanto de solar distribuída, indicando que os sistemas de grande porte também eram umas das apostas iniciais.

À medida que os conhecimentos sobre a tecnologia avançavam e a produção em massa de sistemas fotovoltaicos ganhava ênfase na agenda de pesquisa dos países pioneiros, a escala de teste dos projetos demonstrativos se ampliou e eles ganharam a função de gerar demanda para as fabricantes de módulos e outros dispositivos (Seção 4.2): a Alemanha implantou o *1000 Rooftops* (1991-1995), que teve uma segunda fase numa com o *100.000 Rooftops* (1999-2003); o Japão o *Residential FV System Dissemination Program* (1994-2005) e o *FV for public facilities* (1992-1998) e os Estados Unidos, o *Million Solar Roof* (1997-2006). Nos anos 2000, com o avanço da capacidade instalada, os projetos demonstrativos voltam-se, especialmente, para as principais barreiras técnica à difusão da solar FV em grande escala (integração e estabilização da rede elétrica, armazenamento de energia etc.).

Os projetos demonstrativos, além do *learning by doing* e de novas demandas de pesquisa, ainda estimulam a interação entre os principais atores da indústria e a formação de sistemas locais de inovação. Os institutos e laboratórios públicos especializados em energia solar também promovem a interação ao liderarem projetos de que envolvem atores diversos e ao

proporcionar infraestrutura de teste e pesquisa. Nos Estados Unidos e na Alemanha, por exemplo, têm-se desde o início da trajetória da indústria centros específicos em energia solar. A participação das universidades e de outros institutos especializados de pesquisa nos programas públicos de P&D complementa a infraestrutura de pesquisa necessária³.

Cabe ainda notar que a infraestrutura pública de pesquisa se expande conforme as demandas por novas plataformas de testes e aprimoramento dos processos industriais aumentam. A Alemanha, por exemplo, criou o *Solar Power Development Center* em 2006, com foco em linhas de produção em solar térmica e fotovoltaica, além de uma nova estação de teste, a *Photovoltaic Technology Evaluation Center* (FV-Tec). E, conforme a tecnologia se difunde e a escala de produção aumenta, alguns programas de P&D são concluídos e novos são implementados. O Japão encerrou o *Sunshine Program* em 2005, considerando que os objetivos do programa tinham sido atingidos (Chowdhury et al., 2014). Todavia, o *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI) continuou financiando uma série de projetos de P&D. Os Estados Unidos reorganizaram e estabeleceram novas linhas de pesquisa para solar FV com o *Solar America Initiative* de 2007 (IEA, 2008c).

Ressalta-se que, no caso da solar FV, os esforços de pesquisa desses países vão se tornando mais intensos e complexos à medida que a tecnologia avança e que esses esforços são direcionados por estratégias de longo prazo que são revisadas periodicamente. O Japão, por exemplo, faz *roadmaps* periodicamente para reorientar sua estratégia de desenvolvimento, sua agenda de pesquisa e suas metas de expansão da capacidade instalada para o médio e longo prazo. A Alemanha faz reuniões estratégicas a cada dois anos, para rever sua agenda de pesquisa.

A pesquisa básica e aplicada não perdem espaço mesmo com a rápida difusão da tecnologia: é a agenda de pesquisa que incorpora a busca de alternativas tecnológicas, como, por exemplo, as células orgânicas altamente duráveis. O aumento da eficiência e a redução de custo da tecnologia ainda continuam sendo um dos objetivos centrais, mas a preocupação com a manutenção da liderança tecnológica e a competitividade da indústria local⁴ também é evidente. Além disso, há vários indicativos da influência do contexto sobre agenda de pesquisa desses países: o Japão começou a produzir células *thin-film* somente a partir de 2007, logo após a crise do silício; o *Recovery Act* de 2008 proporcionou fundos específicos para solar fotovoltaica e a criação de um novo programa de P&D: o ARPA-E, focado em pesquisa de alto risco (IEA, 2009b). Este programa também colocou algumas barreiras à importação de sistemas fotovoltaicos, numa reação clara à entrada da China na indústria.

O fato marcante nesta história é que a indústria chinesa, ao contrário dos pioneiros, começa a ganhar relevância quando adota uma estratégia explícita de importação de tecnologia desses países em fins dos anos de 1990 (La Tour, Glachant&Ménier, 2011). Até então, as iniciativas do país não tinham ido além da criação de algumas linhas experimentais de produção de células de silício cristalino (Grau, Huo&Neuhoff, 2011; Qianget al., 2014). Para estimular a transferência de tecnologia, a China passa a condicionar a instalação de filiais de multinacionais de sistemas de solar FV à formação *joint-venture* com empresas chinesas (La Tour, Glachant&Ménier, 2011) e a isentar a importação de tecnologias para produção de células solares (Quiang et al, 2014).

³No caso do Japão, por exemplo, o primeiro laboratório da University of Osaka especializado em energia solar – o Laboratory for Chemical Conversion of Solar Energy – foi fundado em 1981. Outros três laboratórios foram criados na universidade desde então, acompanhando a expansão e a evolução das pesquisas energia solar da Universidade

⁴Os baixos custos praticados por esse país produziram reflexos nas agendas de pesquisa dos países pioneiros, cada vez mais focadas na busca por um grande salto tecnológico, como atingir 40% de eficiência das células de silício, que por ora, só foi alcançado em laboratório.

Em 2005, o governo chinês deixou explícito o objetivo de industrializar as etapas à montante da cadeia de valor de solar FV, com projetos de linhas de produção de células solares, lingotes e chips de silício. As fabricantes de equipamentos e instituições de P&D passaram a receber subvenção para desenvolver novas linhas de produção (Sun et al, 2014). Em 2006, a P&D entrou definitivamente na agenda de pesquisa do governo chinês com a inclusão da solar FV nos dois principais programas públicos de P&D⁵ em fontes alternativas: os Programas 863 e 973 (Quiang et al., 2014), entre outras medidas. O orçamento chinês para P&D em solar FV dobrou entre 2006 e 2010 (Grau, Huo&Neuhoff, 2011), reiterando as novas prioridades do governo. Já na agenda de pesquisa desse período predominavam como objetivos: o domínio local das tecnologias relacionadas à solar FV e dos equipamentos para a produção dessas tecnologias, especialmente das primeiras etapas da cadeia de c-Si e m-Si; e alcançar a eficiência de conversão e a eficiência produtiva dos países pioneiros.

É evidente, nesse caso, que o financiamento e os incentivos públicos à P&D em solar FV só ganha relevância quando galgar as etapas mais intensivas em conhecimento da cadeia de valor se torna um objetivo estratégico para o país. O conhecimento necessário para a industrialização das primeiras etapas da cadeia de solar FV não é tão acessível quanto nas etapas finais.

A agenda de pesquisa do país em 2011, por exemplo, que incorpora temas como design de sistemas e componentes e tecnologias de aquecimento e de armazenamento (IEA, 2012a), já indicava que o país estava em busca de novos desafios tecnológicos e de aumentar sua competitividade melhorando seu padrão de qualidade. As metas de redução de custo, aumento da eficiência de conversão e da taxa de suprimento local de silício também se tornaram mais ambiciosas. Ademais, o país começou a investir massivamente em projetos demonstrativos e infraestrutura de testes de componentes para avaliar a viabilidade de inserção de potências cada vez maiores de solar FV à rede (IEA 2012a e 2013a). Os testes visam tanto aumentar a competitividade da indústria local de componente quanto adaptá-los ao contexto chinês. Embora já tivesse em 2012 uma capacidade instalada significativa em solar FV, o país se deu conta que para transpor às barreiras à injeção da energia na rede, seria necessário contar com projetos demonstrativos de grande escala⁶.

O quadro a seguir apresenta os principais instrumentos de política tecnológica adotados pelos países selecionados desde meados da década de 1970 até 2014 categorizados em: importação de tecnologia, programas de P&D, projetos de demonstrativos e infraestrutura pública de pesquisa. Vale notar que os países pioneiros não têm instrumento de importação de tecnologia e que os anos da instituição ou encerramento dos programas permitem observar a evolução das políticas.

⁵A pesquisa em solar FV na China, assim como no Japão, está distribuída entre universidades, como a Nankai University, que tem uma longa história de pesquisa em CIGS, e institutos públicos de pesquisa⁵, como 811 Research Institute e o Research Institute of China Electric (IEA, 2012a).

⁶Em 2011, sete instituições envolvidas com a realização de testes no país (IEA, 2012a), sendo três deles especializados em pesquisa e testes em solar FV o país planejou implementar 24 projetos demonstrativos, 28 plataformas de testes e mais de 50 novos padrões de inspeção de qualidade 2015 (IEA, 2012 e 2013b). Novas aplicações e equipamentos para geração de solar concentrada também começaram a ser testadas em 2013, com construção de uma planta em caráter demonstrativo – a *Shengguang high concentration CPV photovoltaic Power plant* (IEA, 2013b).

Quadro 1: Políticas tecnológicas dos países selecionados por categoria de instrumento

	Importação/Transferência de tecnologia	Programas de P&D	Programas demonstrativos e testes de campo	Infraestrutura pública de pesquisa
Japão		1974-1984: Sunshine Program (MIT) 1993-2005: New Sunshine Program (MIT) 2002: Plan on technical R&D for photovoltaic power systems 2001-2005: Development of Advanced Solar Cells and Modules (METI) 2006-: Programas de pesquisa financiados pelo Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)	1980-1984: Projeto demonstrativo (NEDO) 1986-1990: projeto para provar viabilidade de inserção da energia solar na rede elétrica 1992-1998: PV for public facilities 1994-2005: Residential PV System Dissemination Program 1998: FV System Field Test Program for Industrial Organization 2001: Support Program to Arrest Global Warming 2002: Demonstrative research on clustered FV systems 2003: FV Field Test for Public Facilities 2006-2010: Verification of Grid Stabilization with Large-Scale FV, Power Generation System and Development of Electric Energy Storage System for Grid-Connection with New Energy Resources 2006-2009: FV systems Advanced Practical Technology 2011-2014: Demonstration Project of Next -Generation Energy and Social System 2011-2014: Japan USA Smart Grid Collaborative Demonstration Project in New Mexico; Verification Test of a Smart Grid System for Remote Islands in Hawaii	2003-2010: Advanced Industrial Science and Technology (AIST) 2011: Research Center for Photovoltaics (RCFV) 2014: Fukushima Renewable Energy
Estados Unidos		1975-1985: Flat Plate Solar Array Project (DOE) 1990-2005: The Photovoltaic Manufacturing Technology Project/ FV Manufacturing R&D - FV-MAT/FVMR&D (DOE) 1992-2006: Thin-film FV Partnership Project 2007: Solar America Initiative (DOE) 2007: Technology Pathway Partnership (TPP) 2007-2010: University Process and Product Support 2009: Research Projects Agency Energy (ARPA-E) 2011: Sunshot	1980-84: DOE Large System, DOE Residential, DOE grid test 1986-1998: FV USA 1993-2005: Pioneer Program I e II (Califórnia) 1997 - 2006: Million Solar Roof (DOE) 1994-2000: Technology Experience to Accelerate Market in Utility Photovoltaics (Team-Up) 2007: System analysis 2007: System test evaluation 2007: Component Test Evaluation 2008: Solar America Cities 2010: 6 novos projetos demonstrativos (DOE)	1977: Solar Energy Research Institute (NREL) 1991: National Renewable Energy Laboratory (NREL) Photovoltaic System Evaluation Laboratory (PSEL) 2007: Process Development and Integration Laboratory (PDIL) 2008: Underwriters Laboratories (UL) 2009: Novas plataformas de teste
Alemanha		Desde 1974: Federal Energy Research Program (BMU e BMBF) 2010: Innovation Alliance FV 2010: Development of the cluster "Solar valley"	1986: 70 grandes instalações de solar FV 1988-2000: Rational use of Energy and Use of Renewable Energy Sources (REN) 1991-1995: 1000 rooftops	1981: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems Centre for Silicon Photovoltaic (CSP)

		Mitteldeutschland” (Federal High-Tech Strategy) 2011: Lab to Fab (Plataform Developments in R&D) 2013: FuE for Photovoltaic	1999-2002: 300 Parish for Solar Energy 1994-2002: Sun at School 1999-2003: 100.000 rooftops	2006: Solar Power: Development Center 2006: Photovoltaic Technology Evaluation Center (FV-Tec)
China	1998: Directory of Key Development Industries, Products and Technologies Encouraged by the Country 1998: isenção de impostos sobre importação de equipamentos 2003: Directory of High and New Technology Products Encouraging Foreign Investments	2005: subvenção para P&D 2006: 863 e 973 Program 2006: Directory of High and New Technology Products 2006: subvenção para P&D em linhas produção 2009: Fund for technology based firm	2006: projetos financiados pelo MoST e NRDC 2009-2012: Golden Sun Demonstration Project (MoST e NEA) 2011: projetos financiados pelo 863 Program	1979: Beijing Solar Energy Research Institute National Engineering Research Center for Renewable Energy 2001: Engineering Research Center of Solar Power & Refrigeration (SPR) Shanghai Solar Energy Engineering Research Center Trina Solar Key Laboratory of Photovoltaic Science and Technology National Solar FV Product Quality Supervision and Inspection Center Yangzhou FV Product Test Center

Fonte: elaboração própria com informações de DOE (1986), Jacobsson, Andersson&Bångens (2002), IEA (2003a), (2003b), (2003c), (2004a), (2004b), (2004c), (2005a), Kimura & Suziki (2006), NREL (2006), IEA (2007a), (2007b), (2007c), (2008a), (2008b), (2008c), Brown & Hendry (2009), IEA (2009a), (2004b), (2010a), (2010b), Grau, Huo&Neuhoff (2011), La Tour, Glachant&Ménier (2011), IEA (2011a), (2011b), EERE (2011), IEA (2012a), (2012b), (2012c), (2012d), (2013a), (2013b), (2013c), Chowdhury et al. (2014), IEA (2014a), (2014b), (2014c), (2014d), Honghang et al (2014), Qiang et al. (2014), IEA (2015a).

4.2. Políticas de criação de mercado

Os processos de criação de mercado para energia solar FV nos países pioneiros compreende vários tipos de incentivos, que vão se transformando à medida que o processo de difusão da tecnologia se intensifica e a tecnologia avança. Foram identificados três tipos principais instrumentos: o subsídio ao investimento à instalação de sistemas solar FV; o subsídio ou incentivo ao preço da energia gerada e a criação de reserva de mercado, estabelecendo um percentual a ser gerado por fontes alternativas ou solar FV ou uma meta de expansão. A China num momento muito posterior aos países pioneiros adotou instrumentos semelhantes. Enquanto que os países pioneiros coordenaram políticas tecnológicas e políticas de criação de mercado para fomentar o desenvolvimento e a difusão da tecnologia local, o país asiático começou a estimular o mercado local depois que já tinha uma indústria de módulos.

Analisando a trajetória da solar FV, podem ser identificadas duas etapas nas políticas de criação de mercado dos países pioneiros: uma, do início dos anos de 1990, que visa expandir a escala de utilização para provar a viabilidade e promover o aprendizado tecnológico; e outra, já nos anos 2000, que visa acelerar a difusão e o desenvolvimento da tecnologia. Essas etapas também se relacionam com as mudanças ocorridas nas políticas tecnológicas descritas na seção anterior.

A primeira etapa das políticas de criação de mercado dos países pioneiros é marcada pelos projetos demonstrativos. Estes projetos têm a função, além de testar e aprimorar a tecnologia, de criar demanda para a indústria de sistemas solar FV para geração de energia elétrica. No Japão e na Alemanha, são voltados para a instalação de sistemas distribuídos (programas de tetos solares para uso residencial ou comercial); e fundamentam-se no subsídio ao investimento para a instalação dos sistemas. Entre início dos anos de 1990 e meados dos anos 2000, o Japão implementou três programas com essas características: o *700 Roof Program* (1993-2005), *Residential FV System Dissemination Program* (1994-2005) e o *FV Field Test Project for Industrial Use* (1998-2002). O primeiro programa oferecia um subsídio de 50% dos custos de investimento que foi sendo reduzido até 3% em 2005. Os demais também ofereciam um subsídio de 50% ao investimento para instalações residenciais ou industriais sob a condição de que os beneficiários proporcionam regularmente dados de operação dos seus sistemas (Kimura & Suzuki, 2006; IEA, 2002b).

Ainda no início dos anos de 1990, a Alemanha implementou o *1000 Roofs Plan* (1990-1995), que cobria 70% dos custos de investimento, que foi ampliado para *100.000 Roofs Plan* (1994-2006) e o subsídio foi substituído pela concessão de financiamento a baixo custo (Chowdhury et al., 2014). A Alemanha também instituiu, ainda no início dos anos 1990, o *feed-in tariffs*, um incentivo ao preço da eletricidade de fonte renovável injetada à rede elétrica combinado a contratos de longo prazo (Chowdhury et al., 2014), coordenando, ao contrário do Japão e Estados Unidos, o incentivo ao preço com subsídio ao investimento já início do processo de difusão da solar FV.

No caso dos Estados Unidos, o *Million Solar Roof* (1997-2006) tinha uma configuração diferente dos programas de subsídio ao investimento dos demais países pioneiros. O programa, formulado e financiado pelo DOE, dava subvenção de US\$ 10.000 a US\$ 50.000 para instituições de natureza diversa associadas ao programa que faziam seleções regionais de projetos para geração distribuída (EERE, 2006). O formato desse programa ilustra a dinâmica da política norte-americana para criação de mercado para solar FV, que adota um modelo descentralizado de difusão da tecnologia. O estado norte-americano que mais é a Califórnia. A

Califórnia já tinha incentivos ao investimento em solar FV em meados da década de 1970, oferecendo abatimento no imposto de renda (Taylor, 2008).

De fato, os incentivos baseados no abatimento dos impostos (*taxcredits*) são os principais instrumentos do que seria a segunda fase da política de criação de mercado para solar FV dos Estados Unidos, que são adotados primeiramente em nível estadual. A Califórnia, por exemplo, reativa o incentivo de abatimento no imposto de renda em 2001, com o *Solar Income Tax Credit*. Em 2006, o *Federal Investment Tax Credit* (ITC) também passa a beneficiar a solar FV. Em 2006, também é instituído o *Federal Renewable Investment Tax Credit*, que concedia 30% de abatimento nos impostos para sistemas residenciais e comerciais conectados à rede (IEA, 2007c). Em 2009, devido ao *Recovery Act*, o limite de crédito é extinto e também se abre a possibilidade de escolher receber uma subvenção ou o abatimento no imposto (IEA, 2010b). Ainda em 2009, ITC passa a incluir as concessionárias de eletricidade como beneficiárias do incentivo (IEA, 20010b), acompanhando a nova dinâmica do mercado que se altera com a entrada dos sistemas centralizados conectados à rede a partir de 2007⁷.

O ano de 2009 também marca o início da segunda fase da política para criação de mercado para solar FV do Japão com a retomada dos subsídios ao investimento⁸ e com a imposição da compra do excesso de solar FV oriunda da geração distribuída⁹ pelo dobro do preço da eletricidade convencional, por meio ao *Action Promotion of Use of Nonfossil Energy Sources and Effective Use of Fossil Energy Source Materials by Energy Supplies* (IEA, 2010a). A *Renewable Energy Law*, de 2011, formaliza e estende o *Feed-in Tariff Scheme for Renewable Energy* para todas as renováveis no país. Nessa nova fase da política japonesa, os subsídios ao investimento são condicionados a um conjunto de critérios para forçar a redução dos custos e melhorar o desempenho da tecnologia, tais como estão: um preço teto para o sistema que vai reduzindo ano a ano; um percentual de eficiência de conversão dos módulos¹⁰, que vai aumentando ano a ano; a exigência de certificação dos sistemas a serem instalados; a garantia de desempenho e manutenção dos módulos pelos fabricantes ou organizações relevantes.

Essa estratégia de estimular a redução progressiva da solar FV já tinha sido adotada pela Alemanha no início dos anos 2000, com o *Renwable Energy Act* (EEG), que previa a redução anual de 5% no preço fixado em lei para a solar FV a partir de 2002 – a indústria já estava apta a produção sistemas mais baratos (IEA, 2003a). Em 2004, uma nova emenda da EEG aumentou o preço fixo pago à solar FV¹¹ para acelerar a difusão da tecnologia, mas manteve a redução anual das tarifas de 5% (IEA, 2007b). Já a emenda na EEG de 2008 instituiu um novo sistema de redução das tarifas associado a uma projeção de crescimento do mercado. A redução percentual das tarifas poderia ser maior ou menor – dentro de um intervalo de 5 a 8% -, dependendo do crescimento real do mercado no ano em questão (IEA, 2009a). As projeções para 2010 e 2012 eram de 2500-3500 MW, mas foram instalados, somente em 2011, 7500 de

⁷Cabe notar que além dos incentivos federais, a característica do sistema norte americano é a promoção descentralizada da tecnologia. Em 2013, por exemplo, 6 estados e 17 concessionárias ofereciam algum tipo de incentivos às tarifas e 17 estados tinham objetivos de quotas (*Renewable Portfolio Standards*) (IEA, 2014d).

⁸Vale notar que os subsídios ao investimento em solar FV foram encerrados em 2005, com o fim do *Roof Program* e do *Residential PV System Dissemination Program*. Embora tenha havido um crescimento oferta de incentivos regionais à solar FV (IEA, 2013b), a retirada dos incentivos federais ao investimento levou à estagnação do mercado de solar FV no Japão na segunda metade dos anos 2000.

⁹Para instalações comerciais e residenciais com capacidade de até 500kW.

¹⁰Em 2009, a eficiência de conversão exigida para silício cristalino era de 13,5% no mínimo e 7% para *thin-film* e 8% para policristalino. Em 2012, a eficiência de conversão para silício cristalino sobe para 16%, 15% para policristalino e 8,5% para *thin-film* (IEA, 2010a e 2012c).

¹¹Os sistemas de até 30kW (tetos solares) recebiam uma tarifa maior do que os sistemas maiores integrados à rede, mas os sistemas integrados à rede recebiam um bônus.

solar FV na Alemanha, ultrapassando em muito as projeções iniciais. Frente a esse crescimento, as tarifas para solar FV na Alemanha reduziram-se em quase um terço entre início de 2009 e início de 2011 (IEA, 2012b) e a revisão EEG de 2012 adotou o esquema de revisão mensal das tarifas para solar FV (IEA, 2014b). A última revisão da EEG determinou que as novas instalações (<500kWp) devem vender a eletricidade gerada ao preço de mercado, que deve ser acrescido de um prêmio (IEA, 2014b e 2015a), já não tendo mais garantia de preço fixo.

No caso da China, até o final dos anos 2000, a instalação de sistemas de solar FV tinha sido estimulada somente por meio de programas de subsídio ao investimento para atender comunidades isoladas: o *Brighthness Program*, de 1996, e o *Township Electrification Program*, de 2002. Os programas *Golden Sun* e do *Solar FV Building Project* de 2009, que ofereciam subsídios ao investimento para instalações comerciais e residenciais, marcam o início da promoção à sola FV distribuída e do auto-consumo pelo governo Chinês (Zhang et al., 2013; Zang& He, 2013; Qiang et al., 2014). Em 2009, o governo também realizou o primeiro leilão para seleção de projetos de solar FV de concessionárias de eletricidade (em nível de MW). As concessionárias que tiveram projetos contratados ganharam o direito de operar as plantas por 25 anos. Os projetos contratados, que tinham caráter experimental e demonstrativo para o governo chinês, deveriam entrar em operação em dois anos. Todavia, os preços da energia oferecidos no leilão ficaram muito abaixo do que o esperado, o que desencorajou o investimento em novos projetos (Zhang et al., 2013; Zang& He, 2013). Dessa forma, a introdução, em 2011, do *Renewable Energy Feed in Tariffs (RE)* – preço fixo concedido aos projetos de solar FV das concessionárias de eletricidade (estatais), cujo custo é repassado aos consumidores (IEA, 2012a) –, marca uma nova etapa da política de criação de mercado chinesa. A China passa a focar claramente as grandes plantas conectadas à rede elétrica, apostando, assim, na escala dos projetos para desenvolver rapidamente o mercado local¹². Além disso, a RE marca a escalada do mercado chinês para solar FV (Seção 2) (IEA, 2013a) e a busca pela redução da dependência da indústria local do mercado externo. Vale notar que o governo chinês também deixou claro que pode alterar os preços pagos à solar FV em função do desenvolvimento da indústria e da tecnologia (Zhang et al., 2013).

No entanto, a expansão do mercado de solar FV na China vem enfrentando uma série de barreiras, como a falta de infraestrutura de transmissão e distribuição para a conexão das plantas de solar FV. E, as tarifas de eletricidade da China são muito baixas, se comparadas a dos países pioneiros; e o não se sabe se o incentivo será sustentável no longo prazo (IEA, 2012a). Diante desse contexto, o governo chinês estabeleceu, em 2013, um conjunto de novas medidas, que podem ser consideradas como mais um passo para a consolidação das políticas de criação de mercado do país. O governo elevou o preço da solar FV e regulamentou o prazo de 20 anos para a concessão do incentivo; dividiu o país por áreas para diferenciar as tarifas recebidas pelas plantas instaladas em locais com maior ou menor potencial solar; reduziu o imposto sobre o valor adicionado da venda de eletricidade e estendeu o *feed-in tariffs* aos sistemas de geração distribuída¹³(IEA, 2014a).O quadro 2 apresenta os principais instrumentos de política de criação de mercado adotados pelos países selecionados desde meados da década de 1970 até 2014 já categorizados.

¹² As plantas centralizadas de solar PV compunham 82,8% do mercado chinês em 2013 (IEA, 2014a).

¹³ Cabe lembrar que o *Golden Sun*, voltado para a geração distribuída, foi encerrado em 2012.

Quadro 2: Políticas de criação de mercado dos países selecionados por categoria de instrumento

	Incentivo ou subsídio ao preço	Incentivos ao investimento ou financiamento	Metas/Planejamento da expansão
Japão	2009: Act on the Promotion of the Use of Non fossil Energy Sources 2012: Feed-in Tariff Scheme for Renewable Energy	1993-2005: 700 Roof Program 1994-2005: Residential FV System Dissemination Program (METI) (4-10kW) 1998-2010: Project for supporting new energy operators (METI) (50kW) 1998-2002: FV Field Test Project for Industrial Use (METI) (10kW modular) 2007: Tax Credits 2009: Subsidy for measures for off-grid renewable energy power generation systems 2009-2013: Subsidy for Installation of Residential Photovoltaic System 2012: linhas de financiamento para projetos de FV de grande de escala 2013: Subsidy for Project to promote introduction of renewable energy (Fukushima Prefecture)	1974-1992: Sunshine Program 1990: MITI Energy Outlook 1993: 400 MW para 2000; 4600 por 2020 2003: Renewable Portfolio Standard (RPS) 2007: revisão das metas do RPS 2008: Action Plan for Dissemination of FV Power Generation (metas para instalação de FV para 14 GW para 2020 e 53 GW para 2030) 2009: aumentou a meta para instalação de FV em 2020 de 14 GW para 28 GW 2013: revisão do RPS
Estados Unidos	1978: Public Utility Regulatory Act (PURPA) 2004-2005: Federal Renewable Production Tax Credit (PTC) 2006: Feed-in tariffs para geração de pequena escala (Califórnia)	1976-1986: Solar income tax credit (Califórnia) 1977: Energia solar deve ser usada em novas instalações públicas (Califórnia) 1992-2000: UFGV – Utility Photovoltaic Group Team-up 1997 - 2005: Million Solar Roof (DOE) 2001-2006: Solar income tax credit (Califórnia) 2005-2016: Federal Renewable Investment Tax Credit 2006-2016: Federal Solar Investment Tax Credit (ITC) 2009: concessionárias são habilitadas ao ITC / recursos do Recovery Act 2009-2016: Business Energy Investment Tax Credit (ITC) 2010: Five Year Accelerate Depreciation	Desde 1991: RPS estaduais 2007: 3GW de rooftops em 2017 2011: Sunshot
Alemanha	1991: Electricity Feed-In Law 2000: Renewable Energy Act (EEG) 2004: emenda do EEG 2008: nova emenda do EEG 2012: nova emenda do EEG 2014: nova emenda da EEG	1988-2000: Rational use of Energy and Use of Renewable Energy Sources 1990-1995: 1000 Roofs Plan 1999-2003: 100.000 Roofs Plan 1994-2006: Sun at School (BMW/BAFA) 2005: Solar Power Generation 2009: linhas de financiamento do Banco Central	1974-2002: Planos para energias renováveis 2002: Renewable Energy Law 2006: 12,5% (2010) e 20% (2020) 2008: aumenta objetivo de renováveis em 30% 2009: National Renewable Energy Action Plan 2011: Germany Energy Concept
China	2002: National Township Electrification Program 2009-2011: Programas de Concessão 2011: Renewable Energy Feed in Tariff 2013: New feed-in tariffs policy of distributed solar PV / Adjustment to Electricity Price Surcharge for Renewable Energy / 2013: PV Power VAT Policy	1996: Brightness program 2002: National Township Electrification Program 2009-2012: Golden Sun 2013: Opinions on Supporting Financial Services for Distributed PV Generation (NEA, CBD)	2007: Mandatory Market Share 2012: 12th Five Year Plan for Renewable Energy Development (NEA)

Fonte: elaboração própria a partir de: IEA (2003a), (2003b), (2003c), (2004a), (2004b), (2004c), (2005a), Kimura & Suzuki (2006), EERE (2006), IEA (2007a), (2007b), (2007c), (2008a), (2008b), (2008c), Taylor (2008), (2009a), (2004b), (2010a), (2010b), (2011a), (2011b), EERE (2011), IEA (2012a), (2012b), (2012c), (2012d), (2013a), (2013b), (2013c), Zhang et al. (2013), Zhang & He (2013), Chowdhury et al. (2014), IEA(2014a), (2014b), (2014c), (2014d), Qiang et al. (2014), IEA (2015a).

5. ANÁLISE DAS POLÍTICAS PARA PROMOÇÃO DA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL A PARTIR DAS EXPERIÊNCIAS DOS PAÍSES LÍDERES

Comparada aos países líderes, a geração de energia solar FV no Brasil está dando os seus primeiros passos. Até o final dos anos 2000, as iniciativas voltadas para promover este tipo de energia – o Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (PRODEM), de 1994, que em 2003 integrou o Programa Luz para todos – estavam voltadas essencialmente para os sistemas isolados. As instalações fotovoltaicas instaladas à rede não passavam de pequenos projetos experimentais liderados por universidades, centros de pesquisa e algumas concessionárias de eletricidade. Em 2009, a potência instalada em solar FV conectada à rede não chegavam a 200kWp.

Esse contexto começou a mudar em 2011, com a Chamada Nº 013/2011 da Aneel, que lançou o Projeto Estratégico: “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”, voltado para implantação de projetos demonstrativos¹⁴. No ano seguinte, a Resolução Normativa Nº 481/2012 da Aneel estabeleceu as condições para o acesso da micro (<100kW) e mini geração distribuída (101-kW-1MW) à rede e instituiu o sistema de compensação¹⁵. Em 2014, a solar FV participou pela primeira vez de um leilão de energia elétrica (LER/2014¹⁶), no qual foram contratados 889 MW a serem instalados até 2017. Os projetos contratados podem pleitear financiamento do BNDES (Linha Fontes Alternativas do Fim e Fundo Clima). Atualmente, a capacidade instalada em solar FV no Brasil é de 15,17MW (ou 0,0104% da capacidade instalada total em energia elétrica do país) e a potência outorgada é de 808,2 MWh. Ademais, o Plano Decenal de Energia (2013-2023) prevê que a capacidade instalada em energia solar alcance 4GW já em 2023 (EPE, 2014b).

Com isto, a energia solar FV entrou definitivamente no mercado brasileiro de energia elétrica. Mas até que ponto esse fato pode ser atribuído às políticas ou instrumentos de incentivo disponíveis? Vale observar que o que levou de fato à expansão da capacidade contratada foi o LER/2014, que com a competição exclusiva acabou por proteger o preço da solar FV. Comparada à quantidade e à combinação de incentivos para criação de mercado empregada pelos países líderes, é possível inferir que a entrada da solar FV no mercado brasileiro foi viabilizada por outros fatores, que vão muito além da política. Se compararmos o preço médio do leilão A-5/2014 (R\$ 196,11 o MWh), no qual foram contratadas usinas eólicas, hidrelétricas e termoelétricas (EPE, 2014b), concluímos que o preço médio pago para a solar FV não ficou tão acima daquele pago às fontes já competitivas no país. E, isto ocorreu em razão da combinação de dois fatores: a redução de custos da solar FV nos últimos anos e os níveis de preços atuais da energia elétrica do país. Ou seja, são as circunstâncias atuais que estão viabilizando a introdução da solar FV na matriz elétrica brasileira.

Pode-se, portanto, inferir que o Brasil não tem uma política de inovação específica para solar FV – ou mesmo para fontes renováveis de energia elétrica – que combine de forma coordenada instrumentos de política tecnológica e de criação de mercado nos moldes do que se viu para os países líderes. As políticas brasileiras relacionadas à solar FV

¹⁴Por meio da chamada, foram selecionados 17 projetos (equivalentes a 23.6 MW) a serem instalados até ano de 2015.

¹⁵A unidade consumidora recebe um crédito em quantidade de energia elétrica relativo à energia injetada na rede.

¹⁶Os projetos de solar FV (400 cadastrados no total) não concorreram com a energia eólica (a outra fonte contratada). As usinas solares foram vendidas por um preço médio de R\$ 215,12 por MWh, enquanto que a eólica foi vendida por R\$ 169,71 por MWh (EPE, 2014a).

também não seguem por etapas que são coerentes com as etapas locais de desenvolvimento da tecnologia e da indústria. As primeiras medidas concretas para criar uma indústria doméstica de sistemas fotovoltaicos e o desenvolvimento da cadeia produtiva local - O Programa Inova Energia (BNDES/ANEEL/FINEP)¹⁷ - foram instituídas em 2013, na mesma época que a solar FV foi autorizada a participar dos leilões de energia elétrica. Os primeiros planos de investimento para instalação das primeiras fábricas de painéis solares do país foram anunciados em 2015, sendo um deles uma iniciativa nacional e os outros dois de empresas estrangeiras (uma chinesa e uma espanhola).

Ou seja, mais uma vez o país se utilizou da estratégia atrelar a criação de mercado com atração de investimentos quando a indústria já estava em vias de consolidação no mundo – como já fez com a eólica (Camillo, 2013) –, sem buscar um caminho próprio de aprendizado local. Nesse caso, tem-se o agravante de se tratar de uma indústria de alta tecnologia e de que o país não produz silício em grau solar, o torna o país ainda mais dependente do investimento estrangeiro para adensar a cadeia produtiva – as barreiras à entrada nas primeiras etapas da produção de módulos são elevadas, haja vista o caso da China que teve que desenvolver suas próprias linhas de produção.

Em se tratando de estímulo do governo federal para o desenvolvimento da tecnologia, o que se tem são os instrumentos de fomento à P&D disponíveis no país de caráter geral – ou voltados para o setor de energia –, que podem financiar projetos relacionados à solar FV. Os instrumentos de incentivo federais que financiaram projetos de P&D em energia solar FV no Brasil nos últimos quinze anos foram: o Programa de P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), instituído pela Lei 9.991/2000, alterada pela Lei 12.212/2010; o Fundo Setorial de Energia Elétrica (CT-Energ/FINEP e MME) e os Editais do MCT/CNPq.

Ao contrário dos países líderes, esses programas não trouxeram, por mais de uma década, objetivos específicos de pesquisa em solar FV ou fontes alternativas. Os incentivos à P&D em solar começam a ganhar algum direcionamento no Brasil em 2010, com o Edital MCT/CNPq FNDCT N° 05/2010 que tinha uma linha específica para solar fotovoltaica. A chamada tinha por objetivo promover e capacitar laboratórios e formar recursos humanos para a P&D&I na área de energias renováveis. Foram, então, selecionados, 39 projetos executados por universidades e instituições de pesquisa.

Com vistas a avaliar o tipo de pesquisa dos projetos em solar FV financiados pelos incentivos acima mencionados, foram buscados os projetos de solar FV nas chamadas públicas e editais já finalizados. Os temas de pesquisa dos projetos selecionados podem dar indicativos do tipo de tecnologia de solar FV que está sendo investigado no Brasil, bem como o tipo de conhecimento que os atores envolvidos com as pesquisas estão produzindo. Também é possível avaliar se os objetos de pesquisa mudaram ao longo do tempo.

Em se tratando do programa de P&D Aneel, observa-se, primeiro, que os projetos¹⁸ relacionados à solar FV começam a tomar parte efetivamente do programa a partir de 2009, com destaque para o ano de 2011 que é o da chamada estratégica. Vale lembrar que esses projetos são oriundos da demanda de concessionárias de eletricidade, o que

¹⁷ O programa traz na sua linha 2 – Geração de Energia através de Fontes Alternativas – objetivos para o desenvolvimento da cadeia fotovoltaica, como tecnologias para a purificação de silício em grau solar e células fotovoltaicas de silício, *thin-film* e outros equipamentos e também do BOS (http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atualizacao/Inovacao/inovaenergia.html).

¹⁸ Os projetos estão disponíveis no website da Aneel (www.aneel.gov.br).

também explica a concentração dos temas de pesquisa em BOS (*hard e soft*), aplicação da tecnologia para verificar viabilidade e impactos na rede elétrica, redes inteligentes aplicadas à geração distribuída, geração distribuída e cogeração. No entanto, é interessante observar que na primeira metade de dos anos 2000 foram realizados alguns projetos relacionados à purificação de silício e células de silício cristalino, com objetivos de criação de protótipos e implantação de planta piloto. Isto mostra que já no início dos anos 2000, quando a indústria ainda não tinha entrado na etapa de difusão acelerada no mundo, já havia atores locais (instituições de pesquisa, principalmente) produzindo conhecimento no tema, ainda que se trate de uma iniciativa isolada.

Novos projetos em células solares apareceram no Programa P&D Aneel somente em 2012 e estão voltados para outros conceitos (orgânicas, corantes etc.) relacionados à terceira geração (Seção 2). Nos editais do MCT/CNPq FNDCT de 2010 e 2012 também há uma grande quantidade de projetos em outros conceitos de células: 20 de um total 47 projetos selecionados nos dois editais, contra três voltados para células de silício cristalino. Ou seja, o país tem como uma das estratégias nacionais de C&T o desenvolvimento da cadeia solar fotovoltaica até o grau solar (usados na primeira e segunda geração de células), o Plano Inova Energia também está seguindo a mesma linha, mas os incentivos públicos estão financiando pesquisas que sugerem o desenvolvimento local de outros conceitos de células. Fica, então, evidente o desalinhamento dessas pesquisas com as perspectivas locais de desenvolvimento da indústria, o que, em última instância, é um reflexo da falta de coordenação das políticas tecnológicas, industriais e de criação de mercado do país.

6. CONCLUSÕES

O artigo cumpre com os seus objetivos principais:

- ao demonstrar com as experiências dos países pioneiros e da China (*latecomer*) como a política, a tecnologia e a indústria coevoluem. Na medida em que a tecnologia e a indústria avançam nesses países, as políticas, tanto de mercado quanto as tecnológicas, entram em novas fases, incorporam instrumentos com novas funções e atualizam os programas e as agendas de pesquisa a elas vinculadas. O artigo demonstra que o contexto local, de países desenvolvidos ou em desenvolvimento, e também o contexto mundial da indústria (de mais ou menos competidores, de expansão ou retração do mercado etc.) impacta no direcionamento das políticas
- ao avaliar o caso brasileiro frente à experiência dos países líderes e concluir acerca do descompasso das poucas iniciativas nacionais e o contexto local de pouca experiência na nova tecnologia.

Em resposta à questão colocada no título do artigo, podem ser destacadas quatro principais lições para aprimorar as políticas para a promoção da solar FV no país:

(i) as políticas para a promoção da solar PV devem compor uma estratégia coordenada, com objetivos e metas específicos de longo prazo, mas que devem ser revisados e atualizados periodicamente à medida que a tecnologia e a indústria se desenvolvem. Essa estratégia deve conter política de oferta e demanda da tecnologia e também promover a criação de um sistema local de inovação. As políticas têm que coevoluir e ser coerentes com a etapa de desenvolvimento da tecnologia e da indústria no país e no mundo. O único programa que pode ser vinculado a essa Estratégia é o Plano Inova

Energia do BNDES. Faltam agendas e programas de P&D específicos para solar FV e direcionamento claro do mercado e acompanhamento dos avanços planejados.

(ii) o Brasil não conta com agendas de pesquisa que direcionem ou puxem o desenvolvimento da tecnologia do país e que evoluem à medida que a tecnologia avança. Como os atores locais submetem suas propostas de pesquisa em solar FV à concorrência geral, as pesquisas partem de iniciativas isoladas de atores locais (instituições de pesquisa ou empresas) interessados no tema. Vale observar que as fabricas instaladas no país para a produção de painéis com financiamento do BNDES deverão atender a percentuais progressivos de nacionalização da produção. Essas estratégias deveriam ser coordenadas a programas de pesquisa. Por ser uma indústria de alta tecnologia, a nacionalização progressiva da produção pode criar demandas tecnológicas que não podem ser supridas exclusivamente por iniciativa das empresas.

(iii) o país não tem como prescindir dos projetos experimentais e demonstrativos com vistas a avaliar a viabilidade e possibilidade de expansão da tecnologia e sua adaptação ao contexto local (características da rede, condições climáticas etc.) e também estimular o desenvolvimento das tecnologias habilitadoras e complementares. Isto mostra que o Brasil não pode pular etapas na sua estratégia de expansão de mercado da solar FV. Os projetos demonstrativos da Chamada Aneel são um primeiro passo, mas o país tem implantar um programa de maior porte e de longo prazo, haja vista que a indústria está em seus estágios iniciais. A experiência dos países pioneiros reforça a necessidade de projetos demonstrativos adequados a cada etapa de desenvolvimento da tecnologia e também para testar novas alternativas tecnológicas, haja vista que esses países ainda investem muito em projetos demonstrativos.

(iv) país não pode considerar que a situação de quase competitividade da solar FV frente às fontes tradicionais de energia elétrica é definitiva. A paridade da rede depende de uma série de condições externas. Há que haver incentivos e sinalizações de estabilidade do mercado e do preço da solar FV no longo prazo porque a tecnologia ainda em desenvolvimento.

Como continuidade da pesquisa até aqui realizada, pretende-se estudar a trajetória de mais dois países que entraram tardiamente na indústria e que vem se destacando no avanço da capacidade instalada em solar FV, mas não apostaram no aprendizado tecnológico e no adensamento da cadeia produtiva local de equipamentos e sistemas. A análise das políticas desses países vai possibilitar pensar outros caminhos para o Brasil que não passe necessariamente pelo avanço do conhecimento endógeno e também o que país poderia perder ou ganhar se seguisse outra alternativa que não fosse o *catching-up* tecnológico.

REFERÊNCIAS

- Brown, J.; Hendry, C. (2009). Public demonstration projects and trials: Accelerating commercialisation of sustainable technology in solar photovoltaics. *Energy Policy*, 37(7), 2560–2573.
- Chowdhury, S.; Sumita, U.; Islam, A.; Bedja, I. (2014). Importance of policy for energy system transformation: Diffusion of PV technology in Japan and Germany. *Energy Policy*, 68. 285-293.
- DOE (1986), Flat-Plate Solar Array Project. Final Report.
- Dosi, G. (1982), Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technological change. *Research Policy*, 2 (3).

- Dosi, G., 1988. Sources, procedures and microeconomic effects of innovation. *Journal of Economic Literature* 36, 1126–1171.
- EERE (2006), Laying the Foundation for a Solar America: The Million Solar Roofs Initiative Final Report October 2006. Washington, DC: National Renewable Energy Laboratory.
- EERE (2011), Linkages from DOE’s Solar Photovoltaic R&D to commercial renewable power from solar energy. DOE.
- EPE (2014), Plano decenal de expansão de energia 2023. Brasília: MME/EPE
- EPIA (2014). Global Market Outlook for Photovoltaics 2014 – 2018. Bruselas: European Photovoltaic Industry Association.
- EPE (2014a), Leilão de Energia de Reserva de 2014. Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral.
- EUPVTP (2011). A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology. Edition 2. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN 978-92-79-20172-1, doi:10.2788/15824.
- Freeman, C. (1987), *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. Pinter Publishers, London.
- Freeman, C. (1991), Innovation, Changes of Techno-Economic Paradigm and Biological Analogies in Economics. *Revue économique*, 2, 211-232.
- Grau, T., Huo, M., & Neuhoff, K. (2012). Survey of photovoltaic industry and policy in germany and china. *Energy Policy*, 51, 20-37.
- IEA (2003a), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2002. BMWA.
- IEA (2003b), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2002, RTS, NEDO.
- IEA (2003c), The 2002 national survey report of photovoltaic power applications in The United States.
- IEA (2004a), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2003, BMU.
- IEA (2004b), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2003, RTS, NEDO.
- IEA (2004c), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2003, Sandia National Laboratories.
- IEA (2005a), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2004, Sandia National Laboratories.
- IEA (2007a), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2006, RTS, NEDO.
- IEA (2007b), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2006, BMU.
- IEA (2007c), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2006, Sandia National Laboratories.
- IEA (2008a), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2007, RTS, NEDO.
- IEA (2008b), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2007, BMU.
- IEA (2008c), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2007, NREL, Sandia National Laboratories.
- IEA (2009a), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2008, BMU.
- IEA (2009b), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2008, DOE.
- IEA (2010a), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2009. NEDO.
- IEA (2010b), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2009, DOE.
- IEA (2011a), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2010.
- IEA (2011b), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2010.
- IEA (2011c), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2010, DOE.
- IEA (2012a), National Survey Report of PV Power Applications in China 2011.
- IEA (2012b), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2011.
- IEA (2012c), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2011, RTS Corporation.
- IEA (2012d), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2011, NREL.
- IEA (2013a), National Survey Report of PV Power Applications in China 2012.

- IEA (2013b), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2012, RTS Corporation.
- IEA (2013c), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2012, NREL.
- IEA (2014a), National Survey Report of PV Power Applications in China 2013.
- IEA (2014b), National Survey Report of PV Power Applications in Germany 2013.
- IEA (2014c), National Survey Report of PV Power Applications in Japan 2013.
- IEA (2014d), National Survey Report of PV Power Applications in The United States 2013.
- IEA (2015a), Annual report 2014. Photovoltaic Power Systems Programme. ISBN 978-3-906042-34-3
- IEA (2015b), 2014 Snapshot of global PV markets. Photovoltaic Power Systems Programme. ISBN 978-3-906042-32-9
- IRENA. (2012), Renewable energy technologies: Cost and analysis series. Solar photovoltaics. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Jacobsson, S.; Andersson, B.; Bångens, L. (2002), Transforming the energy system – the evolution of the German technological system for solar cells. SPRU.
- Kemp, R. (1997), Environmental Policy and Technical Change: A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments, Cheltenham, Edward Elgar.
- Kim, L. (1997), Imitation to Innovation: The Dynamics of Korea's Technological, Boston: Harvard Business Press, 1997.
- Kimura, O; Suzuki, T. (2006), 30 years of solar energy development in Japan: co-evolution process of technology, policies, and the market. In Proc.Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change:Resource Policies: Effectiveness, Efficiency, and Equity. Alemanha: Berlin.
- laTour, A.;Glachant, M.;Mènière, Y. (2011), Innovation and international technology transfer: The case of the Chinese photovoltaic industry, Energy Policy 39, pp. 761–770, 2011.
- Mowery, D; Rosenberg, N. (1979), The influence of market demand on innovation. Research Policy, 8 (2), 102-152.
- Mowery, D. C, Nelson, R. R, Martin, B. R. (2010), Technology policy and global warming: Why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won't work). Research Policy, 39, 1011–1023.
- Nelson, R. R. (1994), The Co-evolution of Technology, Industrial Structure, and Supporting Institutions. Industrial and Corporate Change, 3 (1), 47-63.
- NREL (2006), Lessons Learned from the Photovoltaic Manufacturing Technology/PV Manufacturing R&D and Thin-Film PV Partnership Projects.
- O'Connor, A.; Loomis, R.; Braun, F. (2010), Retrospective Benefit-Cost Evaluation of DOE Investment in Photovoltaic Energy Systems. Washington, D.C.: DOE.
- Pavitt, K. & Walker, W (1976), Government policies towards industrial innovation. Research Policy, 5 (1).
- Peters, M.; Schneider, M.; Griesshaber, T.; Hoffmann, V. (2012), The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change – Does the locus of policies matter? *Research Policy*, 41(8), 1296-1308.
- Qiang, Z.; Honghang, S.; Yanxi, L.; Yurui, X.; Jun, S. (2014), China's solar photovoltaic policy: An analysis based on policy instruments. *Applied Energy* 129. 308-319.
- REN21. (2014). Renewables 2014. Global Status Report. Milan: REN21.
- Sun, H., Zhi, Q., Wang, Y., Yao, Q., & Su, J. (2014), China's solar photovoltaic industry development: The status quo, problems and approaches. *Applied Energy*, 118, 221-230.
- Taylor, M. (2008), Beyond technology-push and demand-pull: Lessons from California's solar policy, *Energy Economics* 30, 2829-2854.
- Zhang, Sufang; He, Yongxiu (2013), Analysis on the development and policy of solar PV power in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2, 393–401.
- Zhang, Sufang; Zhao, Xiaoli; Andrews-Speed, Philip; He, Yongxiu (2014), The erratic path of the low-carbon transition in China: Evolution of solar PV policy, *Energy Policy* 67, 903–912.