

UM DEBATE SISTEMÁTICO SOBRE AS POLÍTICAS DE FOMENTO À ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E AS SUAS PERSPECTIVAS

Paulo Vitor Levate¹
Lindomayara França Ferreira²;
Eduardo Gonçalves³

Resumo: Nos últimos anos, a fim de mitigar os desafios das mudanças climáticas e de escassez dos recursos, é possível identificar uma atratividade das tecnologias de energia solar fotovoltaica. Diante da abundância de recurso e das suas potencialidades econômicas, tem sido criado políticas e instrumentos de estímulo em diferentes economias. Nesse sentido, este artigo propõe reunir estudos teóricos e empíricos que discutam os processos de transição energética dos países, destacando as políticas destinadas ao estímulo da produção de energia solar fotovoltaica. Para tal, utiliza-se o método de revisão sistemática para realizar um panorama das evidências existentes na literatura no período entre 2000 e 2022. A partir dos resultados, verifica-se um avanço exponencial da temática na última década (2010-2020), especialmente em periódicos de políticas energéticas. Dentre os principais instrumentos de estímulos à energia solar, mencionadas nos 66 (sessenta e seis) artigos, destacam-se: os aspectos políticos, os subsídios, as regulamentações institucionais, as expectativas e demanda dos consumidores, além das condições climáticas locais. Em conclusão, a coordenação política e a articulação entre os agentes da sociedade civil podem ser identificadas como aspectos de interseção que não devem ser dissociados nas discussões sobre o tema.

Palavras-chave: Energia solar; Transição energética; Política energética.

Abstract: Based on targeted policies, countries can play a leading role and share responsibility for contributing to environmental goals and mitigating climate effects on a global scale. In this sense, this article proposes to bring together theoretical and empirical studies that discuss the determining factors in directing the promotion of photovoltaic solar energy. Specifically, identify the strategies adopted and their consequences under the national energy policy. To this end, the systematic review method is used to provide an overview of existing evidence in the literature for the period 2000-2022. From the descriptive results, there is an exponential advance of the theme in the last two decades, with a growing number of publications from the 2010s onwards. Subsidies, institutional regulations, consumer expectations and demand, and local weather conditions. In conclusion, political coordination and articulation between civil society agents can be identified as intersecting factors that should not be dissociated in discussions on the subject.

Keywords: Solar energy; Energy transition; Energy policy.

Código JEL: O39; O13.

Área Temática: Área 9 - Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

¹ Doutorando do Programa de Pós-graduação em Economia na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF/PPGE). E-mail: <lindomayara.franca@estudante.ufjf.br>.

² Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Economia na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF/PPGE). E-mail: <lindomayara.franca@estudante.ufjf.br>.

³ Doutor em Economia e Professor do Programa de Pós-graduação em Economia na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF/PPGE). E-mail: <eduardo.goncalves@ufjf.br>.

1 INTRODUÇÃO

Devido à pressão crescente sobre o aumento da demanda de energia, das crises energéticas, da escassez dos recursos e do aquecimento global, diferentes economias têm viabilizado o desenvolvimento seguro e sustentável no fornecimento de energia a partir de incentivos e instrumentos de políticas públicas (GONÇALVES, 2021). Com o fomento destinado para pesquisa e desenvolvimento (P&D) no setor e o aumento da competitividade em relação às tecnologias convencionais, a utilização de um *portfólio* de energias renováveis tornou-se ativas nas últimas décadas (2000-2020). O avanço se dá particularmente com algumas tecnologias novas sendo empregadas com sucesso em aplicações comerciais (Zhao *et al.*, 2015, Corsatea, 2014), e.g., tecnologias de fonte solar e eólica, apontadas como tecnologias algumas das tecnologias chave na mitigação de mudanças climáticas (FERREIRA *et al.*, 2021).

Considerado como um setor chave para a mitigação dos desafios contemporâneos, o setor energético tem sido alvo de políticas e acordos (inter)nacionais, dentre esses, o Acordo de Paris. Realizado em 2015 pelos países da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o Acordo é a resolução institucional mais recente que propôs diminuir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), impulsionando o desenvolvimento de novas e eficientes tecnologias de energia renovável (RAINHA; SINHA, 2019). Estabelecendo como meta o aumento de cerca de 20% de tecnologias renováveis na sua matriz energética, a China – país com níveis elevados de emissões –, tem criado um ambiente propício para o processo de transição energética sem precedentes (GONÇALVES, 2021). Nos Estados Unidos, as metas têm sido estabelecidas em direção a descarbonização até 2050, com uma redução do carvão de aproximadamente 10% para 5%, enquanto as fontes renováveis até 2050, proteja-se uma participação de 18,7%, ante parcela de 9,3% em 2021 (MONTENEGRO, 2022).

Dentre as tecnologias renováveis emergentes, no período entre 2010 e 2020, a energia solar destacou-se como um tipo de tecnologia de elevada projeção de atratividade. Identificada como uma tecnologia limpa que não compromete ou aumenta o aquecimento global, a fonte alternativa aos combustíveis fósseis (petróleo e carvão) tem ganhado impulso (KALAIR *et al.*, 2021). Desde 2009, ocorre um declínio exponencial nos preços dos painéis solares (80%), de acordo com os dados do IRENA (2018), o custo médio ponderado global da eletricidade proveniente de energia solar concentrada (CSP) diminuiu em 26% e o da energia solar fotovoltaica (PV) em 13%, em 2018, tornando-as fontes competitivas comercialmente (KEMERICH *et al.*, 2016). Em 2020, a paridade com as tecnologias convencionais já havia sido alcançada no nível da média mundial. A *Energy Information Administration* (EIA) dos Estados Unidos cumpriu a previsão de custos unitários para a produção de 1 MWh de eletricidade para o período até 2022 para várias fontes de energia, desde que seja obtido de instalações recém-construídas (MELNYK *et al.*, 2020). Em partes, o aumento das instalações fotovoltaicas mundial, pode ser atribuído a crescente escassez de combustíveis fósseis, a redução dos custos, juntamente com a necessidade de descarbonizar o setor energético (SOLANGI *et al.*, 2011).

O grupo de países da União Europeia (UE), por exemplo, se alicerçam em políticas impulsionadas principalmente por preocupações com as mudanças climáticas, especialmente por esforços para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e seus custos sociais associados (HAVRANEK *et al.*, 2015). Entre as políticas regulatórias, as tarifas *feed-in* (*FiT*) e os padrões de portfólio renovável (RPS) são os mais populares para promover o desenvolvimento da indústria de energia renovável. Eles podem contribuir significativamente para a expansão das atividades industriais nacionais em termos de energia sustentável (ZHANG *et al.*, 2017)

Os Estados Unidos (EUA), por sua vez, foram mais lentos do que outros países, como Alemanha e Japão, para implantar a tecnologia solar fotovoltaica. Ainda assim, os EUA continuam sendo um dos maiores e mais importantes mercados de energia solar fotovoltaica. A

energia solar foi impulsionada pelas políticas estaduais de RPS. Além disso, a implantação de energia solar foi fortemente impulsionada pelas leis federais de Crédito Fiscal de Investimento e de medição de energia líquida em nível estadual (ADELAJA *et al.*, 2010). A transição do sistema de energia para longe dos combustíveis fósseis é uma tarefa urgente para os governos de todo o mundo. A promulgação de políticas de apoio, incluindo regulamentos e subsídios, é necessária para estimular e permitir essa transição energética (BREETZ *et al.*, 2018)

Diante da abundância de recurso e das suas potencialidades econômicas, tem sido criado políticas e instrumentos de estímulo em diferentes economias, e.g., as tarifas *feed-in*⁴ no Japão, EUA e Alemanha. Estabelecido por lei, a eletricidade solar fotovoltaica alimentada na rede pública pelos proprietários das instalações deve ser comprada pelas concessionárias a um preço elevado (na ordem de grandeza do preço de produção fotovoltaica em torno de 0,5 €/kWh) (HOFFMANN, 2006). Cabe destacar que esses mecanismos de demanda garantem a estabilidade de longo prazo dessas tecnologias mais disruptivas, reduzindo os riscos e as incertezas associadas a esses “submercados” (MAZZUCATO, 2014).

Assumindo a crescente demanda por energias renováveis e o papel da tecnologia solar, faz-se imprescindível ampliar as discussões sobre as políticas de incentivo para a energia solar. Nessa perspectiva, o presente artigo propõe responder as seguintes questões: i) Como os países estão lidando com o processo de transição energética, especificamente no caso da energia solar fotovoltaica? ii) Qual o panorama das principais políticas utilizadas no incentivo a utilização de energia solar fotovoltaica? Para responder essas perguntas, tem-se como objetivo central reunir estudos teóricos e empíricos que discutam os processos de transição energética dos países, destacando as políticas destinadas ao estímulo da produção de energia solar fotovoltaica. Para tal, utiliza-se o método de revisão sistemática, ao qual reúne por meio de palavras-chave resultados de pesquisas anteriores, apresentando um panorama das evidências existentes e lacunas a serem exploradas.

A partir desse contexto, este artigo está organizado em mais quatro seções, além desta introdução. A segunda seção abordará o panorama atual dos países no contexto da produção e utilização de energia solar fotovoltaica. A terceira seção se subdividirá em duas subseções: inicialmente apresentará o método de pesquisa adotado – i.e., os procedimentos e os critérios de seleção; posteriormente, apresentará uma análise descritiva dos dados. A quarta seção realizará uma análise da literatura selecionada; e, por fim, a última seção discutirá as considerações finais.

2 PERSPECTIVA HISTÓRICA E OS DESAFIOS DA ATUALIDADE DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

Quase todas as fontes de energia (hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis) são formas indiretas de energia solar. Além disso, a radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica, pode ainda ser convertida diretamente em energia elétrica, por meio de efeitos sobre determinados materiais, entre os quais se destacam o termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2008). Dados da Aneel (2008) destacam que muitos países começaram a exigir a participação da energia solar no aquecimento de água, destacando-se primeiramente Israel e, posteriormente, a Espanha, no ano de 2006, que exigiu um percentual mínimo de produção de energia solar em novas edificações. Em 2007, a iniciativa foi acompanhada por países como Índia, Coreia do Sul, China e Alemanha, onde os percentuais exigidos variaram entre 30% e 70%, dependendo do clima, nível de consumo e disponibilidade de outras fontes de energia (KEMERICH *et al.*, 2016).

⁴ As tarifas são determinadas por contratos de longo prazo, em um período entre 10-20 anos. Esse tempo é necessário para que as produtoras possam desenvolver fontes alternativas, sem elevar seus custos.

Ao redor do mundo, o processo de transição energética se acentua cada vez mais e enfrenta barreiras técnicas, econômicas e políticas. Peters *et al.* (2012) destacam que, no caso de inovações verdes, o apoio a políticas é um gatilho importante por três razões principais. Primeiro, como a maioria das tecnologias verdes ainda exige investimentos substanciais em P&D até atingir competitividade, elas sofrem principalmente com a disseminação de conhecimento (RENNINGS, 2000). Segundo a incerteza sobre retornos futuros de investimentos em P&D verde é particularmente alta (JAFFE *et al.*, 2002). Terceiro, os efeitos externos negativos inerentes à maioria das questões ambientais colocam em desvantagem a relativa competitividade das tecnologias verdes.

Com isso, ganham notoriedade as energias renováveis, que contém um enorme valor de utilização potencial e menos poluição ambiental, contribuindo para um desenvolvimento sustentável. Entre estas, a energia solar, que inclui a energia solar térmica e fotovoltaica, por vezes tem sido considerada a alternativa mais acertada para os combustíveis fósseis, por ser uma fonte inesgotável e não emissora de gases estufa e outros poluentes (VEUGELERS, 2012; CHOE *et al.*, 2013; ZHAO *et al.*, 2015).

Cabe destacar que embora promissor, esse tipo de tecnologia apresenta inúmeros desafios, dentre esses, a disponibilidade de recursos e a difusão de energia mais limpa, especialmente para os países em desenvolvimento. Grande parte dessa preocupação vem da necessidade de lidar com as mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, permitir o desenvolvimento econômico. O rápido crescimento econômico em países como China e Índia não apenas aumenta as atuais emissões de carbono desses países, mas também resulta em altas taxas de crescimento de emissões nesses países. Em 1990, a China e a Índia foram responsáveis por 13% das emissões mundiais de dióxido de carbono (CO₂). Em 2004, esse número já havia subido para 22%, e projeta-se um aumento para 31% até 2030 (EIA, 2007).

Para promover P&D em PV, o governo da Índia criou a Comissão para Fontes Adicionais de Energia no Departamento de Ciência e Tecnologia. Posteriormente, foi fundido com o departamento de Fontes de Energia Não Convencionais, em 1992 (GOEL, 2016). Apesar do estabelecimento dessas organizações, a capacidade instalada de energia renovável foi limitada a apenas 29% da capacidade instalada total em 2002. A falta de exploração dos recursos não convencionais disponíveis levou à formação de muitas políticas, que mais tarde moldaram o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica. Essas políticas visavam um acréscimo na capacidade instalada de 25 GW até 2012 (RAINA; SINHA, 2019). Desde 2015, a Índia tem viabilizado planos de substituição integral da sua principal fonte (carvão) por energia solar, estabelecendo metas de produção de 100 GW de energia fotovoltaica, até 2030. Desde então, o país se posiciona entre os principais países investidores de energias renováveis, com destaque para a solar fotovoltaica (PORTAL SOLAR, 2022).

A China, por sua vez, é uma das maiores consumidoras e produtoras de energia solar no mundo. O país tem o compromisso de utilizar 35% de combustíveis não fósseis em sua matriz elétrica, a fim de minimizar os impactos de atividades industriais, comerciais e domésticas na natureza (PORTAL SOLAR, 2022). Os custos para o uso da energia solar na China são menores se comparado com outros países, em partes, isso se dá pela criação de um ambiente de incentivos governamentais estabelecidos ao longo dos anos no país. Por ser a maior fabricante de painéis solares do mundo, a China também conta com a maior usina solar já construída, com capacidade de produzir 1.500 MW. Números apontam que a China é responsável por consumir mais de 50% da produção de placas solares do mundo inteiro, o que coloca o país no caminho certo para vislumbrar a independência energética (MELYNK *et al.*, 2020).

Em 2020, a capacidade das usinas de energia solar no mundo aumentou 14%, para 142 GW de capacidade recém-instalada. Se em 2010 havia apenas sete países no mundo com capacidade instalada superior a 1 GW, no final de 2020 já havia um total de 43 GW (MARKIT, 2020). Com um considerável declínio do apoio financeiro governamental para o

desenvolvimento da energia solar – dado a sua conquista de competência competitiva e sobrevivência natural – e embora ainda seja líder em energia solar, a sua diferença em relação a outros países e regiões começou a diminuir. Se no pico de 2017 foram instaladas 50 GW de usinas solares no país, em 2020 esse aumento foi bem menor. Em contraste, outros países e regiões do mundo continuam aumentando sua capacidade fotovoltaica. A Europa, em 2019, quase dobrou sua capacidade e aumentou mais de 5%, em 2020; nos EUA, em 2021 houve um crescimento em torno de 20%, em relação ao ano anterior (MELYNK *et al.*, 2020).

Dentre os principais incentivos destinados a esse “submercado”, destacam-se: taxas de financiamentos mais baixas para sistemas fotovoltaicos e deduções de impostos estão entre as políticas de incentivo. Em 2008, o departamento de energia dos EUA anunciou o investimento de US\$ 17,6 milhões em seis companhias de energia, tornando a PV competitiva, por meio do desenvolvimento tecnológico. Em 2010, incentivos fiscais e financiamentos foram adotados em 40 Estados, com taxas de financiamentos mais baixas para sistemas fotovoltaicos (PORTAL SOLAR, 2022). Em 2019, devido ao crescimento constante da distribuição de energia solar no mundo, estima-se que, em 2022, o uso da fonte alternativa chegue a 30% (EIA, 2022).

No caso do Japão, que se consolidou e se mantém na posição de 3º maior mercado de PV, por sua vez, introduziu uma série de programas e incentivos fiscais para aumentar a inserção da energia solar fotovoltaica no país desde a década de 1990. Cerca de 90% das instalações foram realizadas em edifícios residenciais e, embora tenha havido um crescimento significativo em termos de instalação, a energia solar contribuiu com menos de 1% para a geração de eletricidade no país antes do incidente de Fukushima (MUHAMMAD-SUKKI *et al.*, 2014).

3 MÉTODO

Tendo como objetivo reunir estudos teóricos e empíricos que discutam os processos de transição energética dos países, destacando as políticas destinadas ao estímulo da produção de energia solar fotovoltaica, o instrumento de pesquisa utilizado consiste no método de revisão sistemática da literatura. Por meio de palavras-chave e do uso do *Software Bibliometrix*, esse procedimento tem sido utilizado como um instrumento de mapeamento científico, pois permite inferir tendências de pesquisas e identificar mudanças nas fronteiras temáticas (TRANFIELD *et al.*, 2003; KITCHENHAM, 2004; ARIA; CUCCURULLO, 2017). Adotando critérios de inclusão e exclusão explícitos, as revisões sistemáticas apresentam aspectos replicáveis e transparentes, de caráter mais robusto em relação as revisões tradicionais. Os seus principais procedimentos consiste em três fases: i) planejamento da revisão; ii) desenvolvimento da revisão; e por fim, iii) relato da revisão (TRANFIELD *et al.*, 2003).

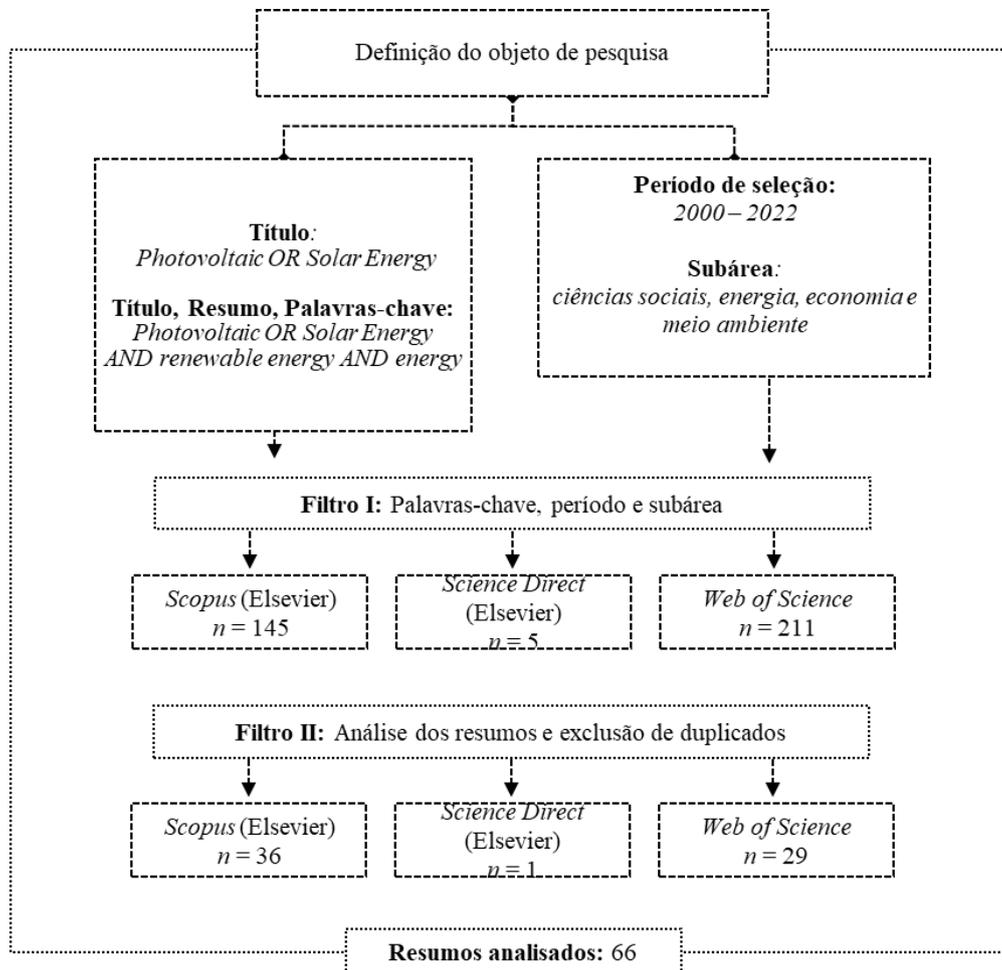
No presente trabalho, para as análises foram utilizadas as bases de dados dos periódicos⁵ revisados por pares *Scopus* (Elsevier), *Web of Science* e *Science Direct* (Elsevier), com o período de seleção entre 2000 e 2022⁶. No primeiro estágio da fase de desenvolvimento da revisão sistemática, foi realizado a busca por artigos científicos publicados em inglês com as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: “*Photovoltaic OR Solar Energy*”, no título. Adicionalmente, foram utilizadas as palavras-chave e operadores booleanos: “*Photovoltaic OR Solar Energy*” AND “*Renewable Energy*” AND “*Energy Policy*”, como filtro de identificação por título, resumo ou palavras-chave (Filtro I) e, neste caso, podem ser contabilizados trabalhos que possuem apenas uma das expressões, ou mais de uma, no título, resumo ou palavras-chave colocadas pelo autor. Cabe destacar que as escolhas desses termos potencialmente relevantes foram realizadas previamente, a partir de uma revisão geral na literatura, além disso, foi

⁵ Busca realizada por meio da Periódicos Capes.

⁶ Período de fronteira da literatura, com um maior número de publicações registrados nos periódicos selecionados.

adicionado os sinônimos mais usuais, para garantir um maior número de trabalhos, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Definição do objeto de pesquisa



Fonte: Elaboração dos autores.

Após os procedimentos iniciais aplicados em cada periódico e verificando quais trabalhos que não pertenciam a pelo menos uma das subáreas pretendidas – ciências sociais, energia, economia ou meio ambiente – foi identificado um número total de 361 publicações. Além disso, os trabalhos foram submetidos a uma análise mais detalhada dos seus resumos e, posteriormente excluídos as duplicações (Filtro II), resultando em uma amostra final de 66 artigos.

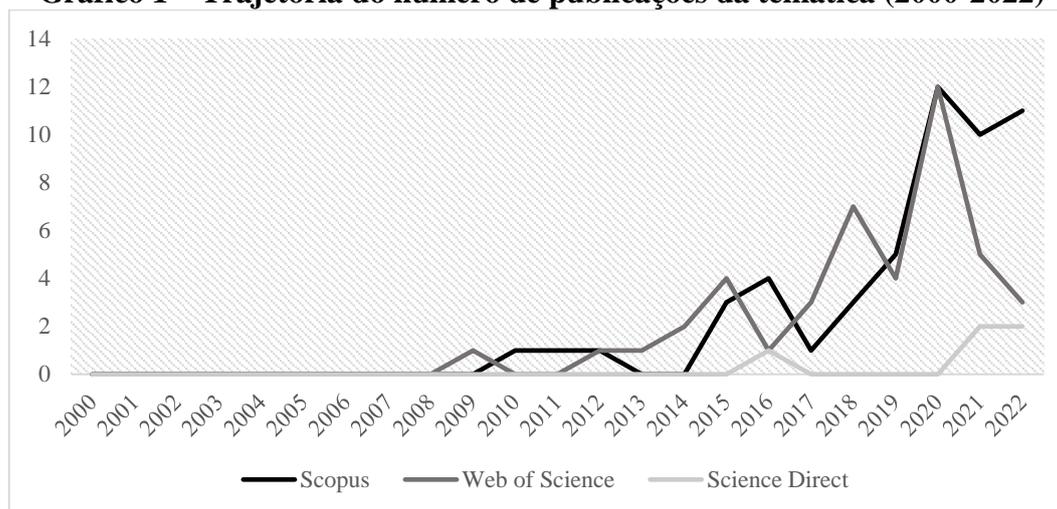
4 REVISÃO SISTEMÁTICA

A fim de atender ao objetivo proposto, a presente seção se subdivide em duas subseções, no primeiro momento realiza-se uma análise descritiva dos dados, posteriormente, uma análise sistemática dos principais resultados apontados pela amostra final de artigos.

4.1 Análise Descritiva dos Dados

Entre o período de 2000 e 2022, é possível identificar um crescimento no número de publicações científicas da temática apenas nos últimos anos, conforme ilustra o Gráfico 1 até o ano de 2008 não houve registro de publicações pertinentes a temática na amostra selecionada, além disso, destaca-se uma acentuação no número de publicações no ano de 2020, parte disso pode ser atribuído aos fóruns de discussões que ocorreram nos anteriores (e.g., Acordo de Paris e COP 21).

Gráfico 1 – Trajetória do número de publicações da temática (2000-2022)



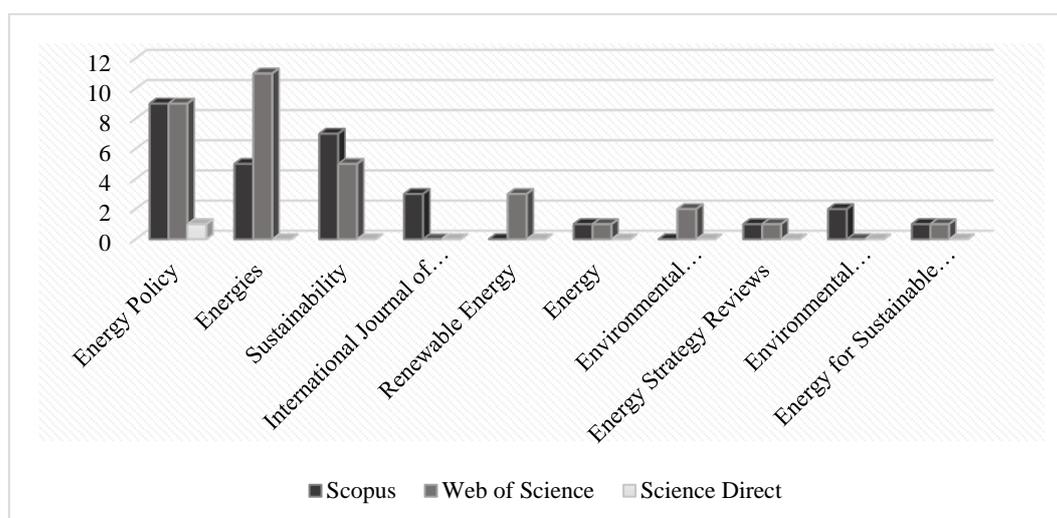
Fonte: Elaboração dos autores.

No que se refere aos termos mais relevantes nos resumos dos trabalhos – além dos termos utilizados no procedimento metodológico –, tem-se “*sustainability transitions*”, “*energy efficiency*” e “*energy transition*” como as palavras-chaves citadas com maior frequência, sendo esse último identificado nas três bases de dados como um tema de elevado grau de desenvolvimento e relevância.

No Gráfico 2 destaca-se os periódicos que tiveram maior notoriedade durante o período considerado. Os principais periódicos que mais publicaram artigos na temática foram os voltados para o setor de energia: “*Energy Policy*”, “*Energies*” e “*Sustainability*”, respectivamente. Ademais, periódicos de pesquisa climática, do meio ambiente e da engenharia, também foram identificados, conforme ilustra o Gráfico 2. Embora seja um campo de pesquisa recente, nos últimos anos têm sido perceptível um exponencial interesse na literatura.

A partir desses resultados preliminares, identifica-se um avanço da literatura, além disso, ressalta-se que os termos “*energy*” e “*sustainability*” se mantêm com alta relevância em todo o período de análise (nas bases de dados selecionadas); enquanto, “*China*” surge na última década com alta relevância e frequência na amostra de dados, sugerindo ser um país de referência sobre a temática. Por fim, em linhas gerais, conclui-se que os resultados apontam não só as direções para o desenvolvimento da temática deste artigo, mas também as importantes lacunas ainda existentes, especialmente no que se refere aos estudos de países desenvolvidos e em desenvolvimentos.

Gráfico 2 – Ranking dos principais periódicos da temática



Fonte: Elaboração dos autores.

4.2 Relato da revisão sistemática: políticas e perspectivas para a energia solar fotovoltaica

A notoriedade de novas fontes energéticas coincide com a adoção do Protocolo de Kyoto, em 1997, que fornece um forte sinal de que as decisões políticas são importantes para estimular o desenvolvimento de novas tecnologias energéticas. Esse processo ocorre concomitantemente à demanda crescente e às limitações do potencial hidrelétrico. No entanto, as práticas habituais e as políticas atuais não são suficientes para atingir o potencial da energia solar e aumentar o seu respectivo uso de energia limpa nem cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris (BARBOSA *et al.*, 2020; SHAREEF; ALTAN, 2019).

Com o intuito de distensionar todo esse processo, os governos dos países vêm aprovando políticas para promover a energia limpa. Como as políticas energéticas transformadoras ameaçam as indústrias estabelecidas e impõem custos substanciais, a adoção e manutenção de políticas requer um apoio político considerável (BREETZ *et al.*, 2017). Ainda apesar de generalizado reconhecimento de que as barreiras à transição energética são principalmente políticas, em vez de tecnológicas ou econômicas, ainda se carece de uma literatura coesa sobre as políticas que impulsionam, restringem e moldam a política de energia renovável (DELUCCHI; JACOBSON, 2011).

Outra questão latente nesse debate é a incerteza. Esse é um fator bastante debatido na literatura considerada e preponderante na decisão de investimentos em novas tecnologias energéticas (ROSLAN *et al.*, 2022; BAUNER; CRAGO, 2015; ZHAI, 2013; TORANI *et al.*, 2016; ASSERETO; BYRNE, 2020). Nesse sentido destaca-se aqui o trabalho de Balibrea-Iniesta (2020), em que o autor avalia um projeto de energia fotovoltaica com grande potência instalada, tendo como base o marco regulatório francês para as energias renováveis. Em particular, o trabalho centra-se na influência que o referido quadro regulamentar tem no valor dos projetos de geração de eletricidade a partir de energia fotovoltaica. Como em qualquer projeto de longo prazo, uma usina fotovoltaica enfrenta diversas fontes de incerteza na sua implementação, especificadas no trabalho como variáveis aleatórias para a avaliação econômica do projeto.

Assim, diante desse breve contexto inicial, a próxima subseção propõe responder o seguinte questionamento: i) Como os países estão lidando com o processo de transição energética, especificamente no caso da energia solar fotovoltaica?

4.2.1 Reestruturação do Sistema Energético

Na literatura selecionada para este trabalho, verifica-se vários relatos de países que estão dando maior robustez aos seus respectivos processos de transição energética, com destaque para a energia solar (GULZAR *et al.*, 2020; MADSUHA *et al.*, 2021; MORAGA-CONTRERAS *et al.*, 2022; PEGELS; LÜTKENHORST, 2014; TORANI *et al.*, 2016; GNATOWSKA; MORYN-KUCHARCZYK, 2021).

Como se trata de um processo ainda relativamente novo, a reestruturação do sistema energético traz consigo um ambiente de mudanças institucionais e de incerteza aos agentes econômicos (Setyawati, 2022; Dutt; Ranjan, 2022; Yi *et al.*, 2019), apesar de o retorno econômico do investimento em projetos de energia renovável ser não apenas possível, como também economicamente viável. Essa viabilidade ocorre desde que o valor presente líquido principal estimado seja positivo e com alta taxa interna de retorno (RAUSSER *et al.*, 2022).

Uma regra econômica a ser aplicada consistiria em comparar as receitas potenciais do negócio com os gastos monetários potenciais, i.e., os benefícios decorrentes da instalação dos painéis em termos da diferença entre os custos de eletricidade sem painéis e com painéis solares (DI BARI, 2020). Desse modo, incentivos ao investimento parecem ser mais eficazes para reduzir o custo da energia solar, ao mesmo tempo em que financiam a atividade apenas uma vez, em vez de depender de certos fundos futuros, dado um *tradeoff* entre o montante atual de fundos disponíveis para subsídios de investimento efetivos e a necessidade de longo prazo de financiamento público para subsídios de produção mais eficientes (FLOWERS *et al.*, 2016).

Esses investimentos e incentivos devem estar pautados nos fatores impulsionadores (*drivers*) a nível macro para promover o desenvolvimento da indústria fotovoltaica (ANAM *et al.*, 2022). Com isso, a adoção de energia solar seria um exemplo de uma classe maior de questões de adoção de tecnologia que podem ser influenciadas por variáveis técnicas de oferta (*technology push*) e de demanda (*demand pull*) e a compreensão adequada dos *drivers* pode ajudar os investidores em energia e os formuladores de políticas a tomar decisões apropriadas, atrair melhores investimentos e desenvolver estruturas políticas mais direcionadas para melhorar a sustentabilidade (ROSLAN *et al.*, 2022). Variáveis climáticas locais, como irradiação solar, a velocidade do vento e a temperatura ambiente determinam a viabilidade econômica do projeto fotovoltaico. A alta intensidade de radiação solar, os baixos custos de tecnologia de energia e a precisa capacidade de previsão podem efetivamente garantir a financiamento de projetos fotovoltaicos e operação efetiva de manutenção (YI *et al.*, 2019; ALI *et al.*, 2020).

Os fatores políticos possuem, dessa forma, um papel relevante nesse contexto, pois além de serem necessários, influenciam a decisão de localização de instalações fotovoltaicas (Lüthi, 2012), esses fatores contribuem para iniciativas governamentais, que irão se alinhar à influência internacional, participação privada no setor de energia e metas de energia solar, levando a uma conscientização pública geral (MARZIA *et al.*, 2017).

Nesse âmbito, os Ministérios de Energia e Recursos Minerais dos países ao redor do mundo tem em pauta vários e diferentes programas para maximizar o potencial de energia renovável, com todos podendo ter impactos econômicos e ambientais substanciais em segmentos vulneráveis da sociedade (SETYAWATI, 2021). O desenvolvimento e o financiamento da infraestrutura dos sistemas de energia solar normalmente estão muito atrelados a diferentes mecanismos financeiros, como doações, prêmios, subsídios, títulos comunitários e diversas práticas de múltiplos atores que desenvolvem e implementam instrumentos financeiros para facilitar investimentos em energia renovável (ISKANDAROVA *et al.*, 2021)

Os subsídios ao investimento têm seu papel superam as barreiras de capital para implantação, que aparecem como a maior barreira para a adoção de energia limpa. Por outro

lado, os subsídios à produção estimulam a geração renovável de eletricidade, em vez da dependência de combustíveis fósseis. Embora os incentivos à produção sejam mais consistentes com o comportamento desejado, sem o subsídio ao investimento, os geradores com altos e novos custos de capital terão menos condições de competir com fontes de energia tradicionais e existentes. O subsídio por unidade de capacidade instalada reduz os riscos, mas não garante que as empresas realmente produzam a longo prazo (FLOWERS *et al.*, 2016).

As expectativas dos residentes locais sobre os subsídios à geração de energia solar fotovoltaica também têm papel de destaque nesse contexto, com a renda mensal, escolaridade, idade e os postos de trabalho ocupados pelos residentes tendo um impacto significativo em suas expectativas de subsídios governamentais (Ding *et al.*, 2018) e percepções de preocupação ambiental e risco ambiental influenciando significativamente a intenção comportamental de pagar taxas de compensação ecológica (CHEN; KUO, 2022). Isso permite o desenvolvimento de competências em diversos tipos de público-alvo, através de ações de formação, e o apoio ao processo de planejamento energético dos municípios e regiões (GOMEZ PRIETO; 2016). O caso dos estados americanos da Califórnia e de Nova York, líderes na política de transição energética nos Estados Unidos, exemplificam essa questão. Ao analisar o desenvolvimento da agregação de escolha da comunidade e da energia solar compartilhada comunitária nesses estados, verifica-se que a energia solar compartilhada é mais avançada em Nova York, mas a escolha da comunidade é mais avançada na Califórnia (HESS; LEE, 2020).

Nesse sentido, a construção de projetos fotovoltaicos com base na demanda de energia e na faixa de radiação solar pode melhorar a eficiência da geração de energia fotovoltaica. Quanto mais ativos investidos, maior o nível técnico da geração de energia fotovoltaica e o nível de gestão dos empreendimentos. Nas regiões mais desenvolvidas, geralmente existem indústrias mais modernas, tecnologias avançadas, níveis gerenciais mais elevados e melhores recursos humanos, o que sem dúvida aumentará a taxa de utilização dos recursos de energia solar (YI *et al.*, 2019). Esse fato possibilita a criação de mercados para implantação em escala maior e a redução dos preços das energias renováveis e a acessibilidade até mesmo fora da rede acessível, como em áreas remotas de países em desenvolvimento (PEGELS; LÜTKENHORST, 2014).

Na literatura são relatados diversos casos de países que vêm numa trajetória crescente do processo de reestruturação de seu sistema energético. A Suíça tem empregado um grande estímulo para a reestruturação, com a eliminação progressiva das usinas nucleares suíças e a diminuição da dependência sazonal de importações de energia (LONERGAN; SANSAVINI, 2021). Taiwan, por sua vez, propôs combinar energia renovável com inovação tecnológica para promover o desenvolvimento da agricultura. Esse processo consiste na geração de energia solar e um Sistema Inteligente de Alimentação de Aves, resultando em uma redução das emissões de CO₂ em cerca de 95% (YANG *et al.*, 2020). A China, o principal emissor de GEE do mundo, planeja reduzir as emissões de CO₂ por unidade de produto interno bruto em 60-65% até 2030, em comparação com 2005. Para isso, pretende construir 100 GW de energia solar, 200 GW de energia eólica, além de usinas de carvão de baixo carbono de 300 g/kWh (JO; JANG, 2019).

No entanto, nem sempre esse processo ocorre de forma equânime pela ausência de mecanismos de eco-compensação, que garantam manutenção de longo prazo e uma situação ganha-ganha para as partes interessadas (CHEN; KUO, 2022). O caso da República Tcheca é um exemplo de como os princípios de mercado podem ser mal interpretados, pois, ao seguir a estratégia da UE, em exigir uma parcela crescente de energia proveniente de fontes renováveis, adotou-se uma política de subsídio sem discussão pública, nem análise de custos (LUŇÁČKOVÁ *et al.*, 2017). Ainda nesse sentido, a posição da Índia, que se trata de um caso de um industrializador tardio no setor fotovoltaico, combinada com as pressões econômicas políticas domésticas prevalentes, tornou difícil o início do processo em promover a fabricação de painéis e células solares e a consequente implementação da energia solar. Embora a Europa,

os Estados Unidos e o Japão tenham sido os primeiros industrializadores nos segmentos de fabricação de energia solar, os países do Leste Asiático tornaram-se industrializadores tardios bem-sucedidos de energia solar (BEHURIA, 2019). Por fim, nota-se que apesar de os países apresentarem características heterogêneas, os mecanismos políticos utilizados a fim de fomentar o maior uso e maiores investimentos em energia solar são implementados de forma bastante semelhantes. Dentro desse cenário, a próxima subseção propõe responder ao segundo questionamento deste trabalho: (ii) Qual o panorama das principais políticas utilizadas no incentivo a utilização de energia solar fotovoltaica?

4.2.2 Incentivos Governamentais e Políticas Tarifárias

Devido aos custos e incertezas embutidos na implementação de novas fontes energéticas, o apoio político é extremamente relevante para que as corporações tenham incentivo a investir em novas fontes energéticas (SONG *et al.*, 2016; STOKES; BREETZ, 2018; LÜTHI, 2012). Se isso não ocorre, as empresas são incapazes de evitar impactos indiretos em rivais que não invistam nesse desenvolvimento (ASSERETO; BYRNE, 2020; PEREZ; HANSEN, 2020; ZHANG *et al.*, 2015).

As empresas tendem a minimizar o risco se a conquista tecnológica for incerta e se espera o crescimento do mercado. Assim, as políticas de impulso tecnológico são vitais para internalizar as vantagens da energia renovável (ROSLAN *et al.* 2022; BAZEN; BROWN, 2008; BEST *et al.*, 2020; ALSAEDI *et al.*, 2021; LEÓN *et al.*, 2020; FERNANDEZ; WATSON, 2022).

Experiências internacionais mostram que o apoio do governo, por meio de políticas como redução de impostos, empréstimos para energia renovável e tarifas para indústrias, desempenham um papel importante no desenvolvimento da indústria fotovoltaica (Child *et al.*, 2017; Farangi *et al.*, 2020; Goyal, 2019), mas isso já foi demonstrado não ser uma regra geral (Madvar *et al.*, 2018; Vazquez; Hallack, 2018), o que impossibilitaria alcançar o objetivo esperado.

O desenvolvimento e a expansão da energia solar estão fortemente atrelados à quantidade de incentivos dispendidos (Bianco *et al.*, 2021), aos diferentes níveis de implementação do sistema e à eficiência energética do uso final no custo da eletricidade (ALQAHTANI; PATIÑO-ECHEVERRI, 2019). Dessa forma, os subsídios podem ser de origem local (Groote *et al.*, 2015), mas também de iniciativas governamentais nacionais, influência internacional, bem como a participação privada no setor de energia (Marzia *et al.*, 2017); e, nesse sentido, pode haver o aumento do interesse em investimentos, inclusive individuais, em energia fotovoltaica (RATAJ *et al.*; TORANI *et al.*, 2016).

Um dos mais utilizados e descritos na literatura é o esquema *FiT*. Esse instrumento consiste numa das principais políticas utilizadas, em que o produtor recebe pagamentos totais por kWh de eletricidade gerada, pagamento esse garantido pelo governo (CHERRINGTON *et al.*, 2012; IRFAN *et al.*, 2019; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2020). O esquema *FiT* consiste numa das melhores opções para diminuir os problemas de investimento e preço, além de promover o aprendizado pelo uso (*learning by using*) (SONG *et al.*, 2016). No entanto, o ajuste conservador da política de *FiT* aumenta a carga financeira do governo, impactando nas empresas fotovoltaicas e podendo reduzir o investimento em P&D (FU *et al.*, 2021).

Os impactos mais profundos do *FiT* podem resultar em parte do fato de que, neste esquema específico, o progresso técnico aumenta o excedente dos produtores e, dessa forma, os induz a inovar (PALAGE *et al.*, 2018). Um esquema *FiT* que pagasse apenas pelo excedente de eletricidade fotovoltaica para as necessidades locais e exportado para a rede, significaria um tempo de retorno simples muito longo para tornar a compra de matriz atraente. Seria preferível

exportar para a rede toda a eletricidade fotovoltaica para pagamento *FiT*; ou uma taxa *FiT* mais baixa para eletricidade usada no local (PLATER, 2009).

De fato, a grande maioria das instalações *FiT* consistem em sistemas solares fotovoltaicos domésticos. As residências tornam-se geradores de eletricidade conectados à rede durante os primeiros anos do esquema, alguns apoiados por esquemas de “alugar um telhado” oferecidos por empresas privadas, nos quais a empresa instalava painéis solares no telhado sem custo, ou muito baixo, para o proprietário, mantendo a propriedade do *hardware* e recebendo os pagamentos do *FiT* (ISKANDAROVA *et al.*, 2021).

Todavia, o mecanismo *FiT* só irá atingir resultados satisfatórios se a tarifa de preço *FiT* em questão atingir um patamar superior aos custos de energia elétrica, o que varia de país para país (Ramirez *et al.* 2016), i.e., quando os custos iniciais forem baixos o suficiente para tornar a energia fotovoltaica economicamente lucrativa ou quando os preços da eletricidade forem altos o suficiente para equilibrar esses custos. Alemanha, Itália, Espanha e Grécia parecem ser os mais atraentes países a investir em projetos fotovoltaicos principalmente, devido às condições financeiras favoráveis na Alemanha e aos excelentes níveis de irradiação solar na Itália, Espanha e Grécia.

Nesse sentido, o caminho passa a ser o de encontrar um nível de taxa *FiT* ideal que gere um bom lucro, um retorno anual moderado sobre o investimento e um período de retorno aceitável (Muhammad-Sukki *et al.*, 2014), vislumbrando ainda um cenário para que, cortes futuros do subsídio em questão, gerem como resultado uma tendência de manutenção de um retorno saudável do investimento (CHERRINGTON *et al.*, 2012).

O esquema *FiT*, no entanto, pode ser utilizado sozinho ou em conjunto com outra política. Uma delas é a *Net-Metering (NM)*⁷, baseada em um acordo de cobrança entre concessionárias e seus clientes para que a eletricidade que o produtor não usa volte à rede. Ramirez *et al.* (2016) demonstraram que todos os países⁸ considerados na análise, exceto a Itália, apresentam um padrão semelhante para os sistemas fixos de 100 kW, onde o *FiT* mínimo aumenta paralelamente ao aumento de *NM*.

Outra associação plausível ocorre entre *FiT* em conjunto com sistemas de armazenamento de energia (ESS) e Certificados de Energia Renovável (REC) (PALAGE *et al.*, 2018). As políticas de armazenamento de energia surgem como forma de aumentar a integração fotovoltaica. Isso pode se dá fortalecendo a estrutura de lucro dos ESS através do mercado de REC, atraindo assim o investimento em ESS vinculados a energia solar e, finalmente, aumentando a disseminação da geração fotovoltaica. O objetivo é aumentar a disseminação da geração fotovoltaica atraindo investimentos em ESS, fortalecendo a estrutura de lucro dos ESS com o mecanismo de mercado de REC (JO; JANG, 2019).

Paralelamente ao programa de subsídios, o governo também pode introduzir outra política de energia renovável conhecida como *Renewable Portfolio Standard (RPS)*. Essa política obriga as concessionárias a gerar uma porcentagem específica de eletricidade a partir de fontes renováveis – incluindo a energia solar fotovoltaica (ZHAI, 2013). Países como Estados Unidos, Japão, Alemanha e China, que figuram entre os maiores produtores de energia solar, utilizam esse mecanismo para promover o desenvolvimento saudável da indústria fotovoltaica (FU *et al.*, 2021).

Nesse sentido, reduzir os custos de construção, operação e manutenção da infraestrutura de energia fotovoltaica, além de outros custos, são os objetivos das políticas. Assim, reduz-se o custo nivelado de eletricidade (LCOE) de geração de energia fotovoltaica, aumenta-se os

⁷ Os créditos se acumulam durante 36 meses, de tal forma que os bônus energéticos podem ser utilizados em uma outra área, desde que as duas unidades estejam inseridas na mesma área de concessão e reunidas por comunhão de fato ou direito.

⁸ Alemanha, Itália, Reino Unido, França, Espanha, Bélgica, Grécia, República Tcheca, Holanda, Romênia, Bulgária, Áustria e Dinamarca.

lucros da indústria e melhora-se o desenvolvimento da indústria sob *FiT*. O declínio no LCOE da geração de energia fotovoltaica reduz a dependência da indústria de energia fotovoltaica de preços subsidiados. Assim, o governo também reduzirá o nível do *FiT* e o preço do subsídio em intervalos. Logo, a redução do *FiT* e do preço de subsídio contribui para o desenvolvimento a longo prazo da indústria de energia fotovoltaica sob o esquema *RPS*. No geral, o progresso técnico tem um efeito positivo no desenvolvimento da indústria de energia fotovoltaica da China sob *FiT* e *RPS* (ZHANG *et al.*, 2017).

Haveria ainda políticas que se restringem a casos específicos. O primeiro deles é o Programa de Incentivo Solar (*SIP*) do Catar. A junção dos esquemas *FiT* e *SIP*, quando implementados, possibilitariam habilitar e endossar sistemas fotovoltaicos em telhados no Catar (ALRAWI *et al.*, 2022). Da mesma forma, há também, no caso do Canadá, o Programa de Oferta Padrão de Energia Renovável (*RESOP*), onde são identificados os fatores que estão dificultando ou promovendo a utilização do *RESOP* e a adoção de sistemas solares fotovoltaicos (ADACHI; ROWLANDS, 2009).

Há ainda a política de telhado solar (*RTS*) de Delhi. Apesar de o *RTS* não ter sido adotado tanto no segmento residencial quanto em outros segmentos, como estabelecimentos comerciais e industriais, isso não apenas torna difícil para o governo atingir suas metas, mas também aumenta as preocupações com a justiça energética, pois priva uma grande parte da população de se beneficiar do mecanismo político *RTS*. O segmento de consumo residencial em Delhi é bastante heterogêneo, consistindo de seções que diferem amplamente em relação à renda, espaço no telhado, educação e conhecimento tecnológico. Para uma ampla disseminação, os formuladores de políticas devem adotar uma abordagem capaz de considerar, simultaneamente, as barreiras financeiras, políticas, regulatórias, sociais e psicológicas. Apesar da disseminação do *RTS* em Delhi vir sendo lenta, está ganhando terreno constantemente (DUTT; RANJAN, 2022).

E, por fim, o uso de processos de leilão reverso é capaz de entregar contratos solares de baixo preço, como estão sendo empregados com sucesso na Índia e Indonésia (Best; Burke, 2019), o que ocorre por meio de reforma tributária, de subsídios, estratégias regulatórias e de *design* de incentivos. Esses procedimentos visam abordagens para reforçar as capacidades de gerenciamento da rede e minimizar as barreiras protecionistas, abrangendo sistemas de pequena e grande escala (BURKE *et al.*, 2019).

Em resumo, a literatura verificada neste presente trabalho destaca que as políticas *FiT* são implementadas em inúmeros países ao redor do mundo. O Quadro A.1, reportado no Apêndice, resume esses países e mostra as respectivas políticas adotadas por eles. O desenvolvimento bem-sucedido do mercado de energia solar na Alemanha e na UE como um todo, Estados Unidos e China confirmam que as políticas *FiT* são as mais eficazes para incentivar a implantação rápida e sustentável de energia solar (FU *et al.*, 2021). Ao contrário da Europa, onde o *FiT* é o principal impulsionador, o Japão optou pelo *RPS* em vez da *FiT*, principalmente devido à influência das empresas de serviços públicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerada como uma tecnologia promissora, de crescente competitividade econômica e elevado potencial para a mitigação dos desafios contemporâneos (e.g., escassez de recursos naturais e mudanças climáticas), a energia solar, nas últimas duas décadas (2000-2020), tem ganhado o fôlego político de diversas economias. Diante desse contexto, o presente trabalho propôs reunir estudos teóricos e empíricos que discutam os processos de transição energética dos países, destacando as políticas destinadas ao estímulo da produção de energia solar fotovoltaica.

Para tal, foi realizado uma revisão sistemática da literatura reunindo 66 trabalhos que discutem a transição energética e as políticas utilizadas nesse processo, com foco na energia solar fotovoltaica na perspectiva mundial. Embora seja um campo de pesquisa recente, a análise descritiva dos dados apresentou um avanço exponencial da temática nas duas últimas décadas, com um maior crescente número de publicações a partir do ano de 2016. A partir do presente estudo, compreende-se que quase todos os países que utilizam energia solar para geração de energia têm políticas específicas para a energia solar. Algumas das histórias de sucesso de utilização de energia solar podem ser exemplificadas no caso de países como os EUA, Alemanha, Espanha, Austrália, Japão, China e Índia, apesar de cada um deles estar em estágios diferentes desse processo. Para esses países, a existência de políticas destinadas ao “submercado” conseguiu aumentar significativamente a geração de energia solar, além de já começar a demonstrar efeitos sob a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

Em geral, as principais políticas de incentivos ao setor verificadas neste trabalho incluem a isenção de impostos, subsídios, tarifas *feed-in*, incentivos à formação e padrões de *portfólio* renovável. Globalmente, as análises dessas políticas têm se concentrado cada vez mais nos efeitos das externalidades negativas na qualidade ambiental, na saúde humana, no desenvolvimento econômico ou nos objetivos institucionais, como a gestão do crescimento das emissões de CO₂.

No que se refere aos fatores determinantes no direcionamento da transição energética, foram encontrados relatos de fatores relacionados ao mercado (*market pull*), variáveis técnicas de oferta (*technology push*) e de demanda (*demand pull*). As variáveis climáticas locais, como a alta intensidade de radiação solar e os baixos custos de tecnologia da energia solar podem efetivamente garantir a financiamento de projetos fotovoltaicos. No entanto, o maior destaque se dá com as diversas evidências na literatura considerada acerca do papel dos governos. O governo central constitui o elo principal da cadeia entre empresas privadas, universidades e o público e é o agente capaz de implementar políticas e coordenar o processo de transição energética.

Desse modo, a literatura tem apresentado implementações concretas e plenas de políticas de incentivo à energia solar, além de perspectivas de decisões políticas inseridas no contexto e alinhadas a metas globais de descarbonização, o que ocorre pelo fato de novas tecnologias envolverem custos de geração elevados. Estes custos tendem a cair, enquanto por outro lado, os custos marginais das fontes tradicionais estão aumentando, ou seja, as fontes de energia renováveis, principalmente a solar fotovoltaica, podem ser competitivas em um futuro próximo. O fortalecimento de ações de P&D; os investimentos públicos, tanto no financiamento de pesquisas quanto na difusão de estratégias; a maior relação entre instituições de pesquisa e ensino com as empresas; e, instrumentos regulatórios específicos, podem contribuir para se ter um setor industrial mais aberto a práticas eficientes visando uma melhor gestão ambiental.

REFERÊNCIAS

- ADACHI, C.; ROWLANDS, I. H. The role of policies in supporting the diffusion of solar photovoltaic systems: Experiences with Ontario, Canada's Renewable Energy Standard Offer Program. *Sustainability*, 2(1), 30–47, 2009.
- ADELAJA, A.; HAILU, Y. G.; MCKEOWN, C. H.; TEKLE, A. T. Effects of renewable energy policies on wind industry development in the US. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 2(3), 245–262, 2010.
- ALI, S.; POULOVA, P.; AKBAR, A.; JAVED, H. M. U.; DANISH, M. Determining the influencing factors in the adoption of solar photovoltaic technology in Pakistan: A decomposed technology acceptance model approach. *Economies*, 8(4), 108, 2020.
- ALQAHTANI, B. J.; PATIÑO-ECHEVERRI, D. Combined effects of policies to increase energy efficiency and distributed solar generation: A case study of the Carolinas. *Energy Policy*, 134, 110936, 2019.
- ALRAWI, O.; BAYRAM, I. S.; KOC, M.; AL-GHAMDI, S. G. Economic viability of rooftop photovoltaic systems and energy storage systems in Qatar. *Energies*, 15(9), 3040, 2022.
- ALSAEDI, Y. Impact of the nature of energy management and responses to policies regarding solar and wind pricing: a qualitative study of the Australian electricity markets. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2021.
- ANAM, M. Z.; BARI, A. B. M. M.; PAUL, S. K.; ALI, S. M.; KABIR, G. Modelling the drivers of solar energy development in an emerging economy: Implications for sustainable development goals. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 13, 200068, 2022.
- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Fonte: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. 2008.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11, p. 959–975, 2017.
- ASSERETO, M.; BYRNE, J. The Implications of Policy Uncertainty on Solar Photovoltaic Investment. *Energies*, 13(23), 6233, 2020.
- BALIBREA-INIESTA, J. Economic analysis of renewable energy regulation in France: A case study for photovoltaic plants based on real options. *Energies*, 13(11), 2760, 2020.
- BARBOSA, J. P.; SARAIVA, J. D.; SEIXAS, J. Solar energy policy to boost Brazilian power sector. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 12(3), 349–367, 2020.
- BAUNER, C.; CRAGO, C. L. Adoption of residential solar power under uncertainty: Implications for renewable energy incentives. *Energy Policy*, 86, 27–35, 2015.
- BAZEN, E. F.; BROWN, M. A. Feasibility of solar technology (photovoltaic) adoption: A case study on Tennessee's poultry industry. *Renewable Energy*, 34(3), 748–754, 2009.
- BEHURIA, P. The politics of late late development in renewable energy sectors: Dependency and contradictory tensions in India's National Solar Mission. *World Development*, 126, 104726, 2020.
- BEST, R.; BURKE, P. J. Adoption of solar and wind energy: The roles of carbon pricing and aggregate policy support. *Energy Policy*, 118, 404–417, 2018.
- BEST, R.; BURKE, P. J.; NISHITATENO, S. Evaluating the effectiveness of Australia's Small-scale Renewable Energy Scheme for rooftop solar. *Energy Economics*, 84, 104475, 2019.
- BIANCO, V.; CASCETTA, F.; NARDINI, S. Analysis of technology diffusion policies for renewable energy. The case of the Italian solar photovoltaic sector. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 46, 101250, 2021.
- BREETZ, H.; MILDENBERGER, M.; STOKES, L. The political logics of clean energy transitions. *Business and Politics*, 20(4), 492–522, 2018.

BURKE, P. J.; WIDNYANA, J.; ANJUM, Z.; AISBETT, E.; RESOSUDARMO, B.; BALDWIN, K. G. H. Overcoming barriers to solar and wind energy adoption in two Asian giants: India and Indonesia. *Energy Policy*, 132, 1216–1228, 2019.

CHEN, H.-S.; KUO, H.-Y. Green Energy and Water Resource Management: A Case Study of Fishery and Solar Power Symbiosis in Taiwan. *Water*, 14(8), 1299, 2022.

CHERRINGTON, R.; GOODSHIP, V.; LONGFIELD, A.; KIRWAN, K. The feed-in tariff in the UK: A case study focus on domestic photovoltaic systems. *Renewable Energy*, 50, 421–426, 2013.

CHILD, M.; HAUKKALA, T.; BREYER, C. The role of solar photovoltaics and energy storage solutions in a 100% renewable energy system for Finland in 2050. *Sustainability*, 9(8), 1358, 2017.

CHOE, H.; LEE, D. H.; SEO, I. W.; KIM, H. D. Patent citation network analysis for the domain of organic photovoltaic cells: Country, institution, and technology field. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, p. 492–505, 2013.

CORSATEA, T. D. Technological capabilities for innovation activities across Europe: evidence from wind, solar and bioenergy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 469–479, 2014..

DEGHANI MADVAR, M.; ALHUYI NAZARI, M.; TABE ARJMAND, J.; ASLANI, A.; GHASEMPOUR, R.; AHMADI, M. H. Analysis of stakeholder roles and the challenges of solar energy utilization in Iran. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 13(4), 438–451, 2018.

DELUCCHI, M. A.; JACOBSON, M. Z. Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part II: Reliability, system and transmission costs, and policies. *Energy Policy*, 39(3), 1170–1190, 2011.

DI BARI, A. A real options approach to valuate solar energy investment with public authority incentives: The Italian case. *Energies*, 13(16), 4181, 2020.

DING, L.; ZHANG, F.; SHUAI, J. How do chinese residents expect of government subsidies on solar photovoltaic power generation?—A case of Wuhan, China. *Energies*, 11(1), 228, 2018.

DUTT, D.; RANJAN, A.. Towards a just energy transition in Delhi: Addressing the bias in the rooftop solar market. *Energy Policy*, 160, 112667, 2022.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. (2007). *International Energy Outlook: 2007*. U.S. Department of Energy, Washington, DC.

FARANGI, M.; SOLEIMANI, E. A.; ZAHEDIFAR, M.; AMIRI, O.; POURSAFAR, J. The environmental and economic analysis of grid-connected photovoltaic power systems with silicon solar panels, in accord with the new energy policy in Iran. *Energy*, 202, 117771, 2020.

FERNANDEZ, A. J.; WATSON, J. Mexico's renewable energy innovation system: Geothermal and solar photovoltaics case study. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 43, 200–219, 2022.

FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, R.; SUÁREZ-GARCÍA, A.; ALVAREZ FEIJOO, M. A.; ARCE, E.; DÍEZ-MEDIAVILLA, M. Spanish photovoltaic solar energy: institutional change, financial effects, and the business sector. *Sustainability*, 12(5), 1892, 2020.

FERREIRA, L. F; et al. O setor energético no Brasil: um debate sobre a potencialidade das fontes renováveis no contexto ambiental e tecnológico. *Revista de Desenvolvimento Econômico*, v. 2, n. 49, p. 226 – 255, 2021

FLOWERS, M. E.; SMITH, M. K.; PARSEKIAN, A. W.; BOYUK, D. S.; MCGRATH, J. K.; YATES, L. Climate impacts on the cost of solar energy. *Energy Policy*, 94, 264–273, 2016.

FU, Y.; HU, C.; YANG, D. Conservative or Aggressive? The Dynamic Adjustment of the Feed-in Tariff Policy for Photovoltaic Power Generation in China. *Frontiers in Energy Research*, 9, 672920, 2021.

GNATOWSKA, R.; MORYŃ-KUCHARCZYK, E. The place of photovoltaics in Poland's energy mix. *Energies*, 14(5), 1471, 2021.

GOEL, M. Solar rooftop in India: Policies, challenges and outlook. *Green Energy & Environment*, 1(2), 129–137, 2016.

GOMEZ PRIETO, J. Impact of European Territorial Cooperation (ETC) on the promotion and use of solar energy in the Mediterranean. *Regional Studies, Regional Science*, 3(1), 185–192, 2016.

GONÇALVES, A. Perspectivas de futuro para a política energética chinesa e suas implicações nas relações sino-brasileiras. *Petrel* (54), v.03, n. 05, 2021.

GOYAL, N. Explaining policy success using the multiple streams framework: political success despite programmatic failure of the solar energy policy in Gujarat, India. *Politics & Policy*, 49(5), 1021–1060, 2021.

GROOTE, O.; PEPEMANS, G.; VERBOVEN, F. Heterogeneity in the adoption of photovoltaic systems in Flanders. *Energy Economics*, 59, 45–57, 2016.

GULZAR, M. A.; ASGHAR, H.; HWANG, J.; HASSAN, W. China's Pathway towards Solar Energy Utilization: Transition to a Low-Carbon Economy. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4221, 2020.

HESS, D. J.; LEE, D. Energy decentralization in California and New York: Conflicts in the politics of shared solar and community choice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 109716, 2020.

HOFFMANN, W. PV solar electricity industry: Market growth and perspective. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18–19), 3285–3311, 2006.

IRFAN, M.; ZHAO, Z.-Y.; AHMAD, M.; MUKESHIMANA, M. C. Solar energy development in Pakistan: Barriers and policy recommendations. *Sustainability*, 11(4), 1206, 2019.

ISKANDAROVA, M.; DEMBEK, A.; FRAAIJE, M.; MATTHEWS, W.; STASIK, A.; WITTMAYER, J. M.; SOVACOOOL, B. K. Who finances renewable energy in Europe? Examining temporality, authority and contestation in solar and wind subsidies in Poland, the Netherlands and the United Kingdom. *Energy Strategy Reviews*, 38, 100730, 2021.

JAFFE, A. B.; NEWELL, R. G.; STAVINS, R. N. Technological change and the environment". In: Maler, K.-G., Vincent, J. (Eds.), *Handbook of Environmental Economics. Handbooks in Economics Series* (ARROW, K. J., INTRILIGATOR, M.D., Series Eds.), vol. 1. North-Holland/Elsevier, Amsterdam, p. 461–516, 2003.

JO, B.-K.; JANG, G. An evaluation of the effect on the expansion of photovoltaic power generation according to renewable energy certificates on energy storage systems: A case study of the Korean renewable energy market. *Sustainability*, 11(16), 4337, 2019.

KALAIR, A.; ABAS, N.; SALEEM, M. S.; KALAIR, A. R.; KHAN, N. Role of energy storage systems in energy transition from fossil fuels to renewables. *Energy Storage*, 3(1), e135, 2021.

KEMERICH, P. D. C.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; SILVEIRA, R. B.; FRANÇA, J. R.; LEVANDOSKI, N. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 241–247, 2016.

LEÓN, J. A. P. Overview of policies for the generation from renewable energy focused in central tower concentrating solar power. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2020.

LONERGAN, K. E.; SANSAVINI, G. Business structure of electricity distribution system operator and effect on solar photovoltaic uptake: An empirical case study for Switzerland. *Energy Policy*, 160, 112683, 2022.

LÜTHI, S.; WÜSTENHAGEN, R. The price of policy risk—Empirical insights from choice experiments with European photovoltaic project developers. *Energy Economics*, 34(4), 1001–1011, 2012.

LUŇÁČKOVÁ, P.; PRŮŠA, J.; JANDA, K. The merit order effect of Czech photovoltaic plants. *Energy Policy*, 106, 138–147, 2017.

MADSUHA, A. F.; SETIAWAN, E. A.; WIBOWO, N.; HABIBURRAHMAN, M.; NURCAHYO, R.; SUMAEDI, S. Mapping 30 Years of Sustainability of Solar Energy Research in Developing Countries: Indonesia Case. *Sustainability*, 13(20), 11415, 2021.

MARZIA, K.; HASAN, M. F.; MIYAZAKI, T.; SAHA, B. B.; KOYAMA, S. Key factors of solar energy progress in Bangladesh until 2017, *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*, 2018.

MATHIAS, J; et al. Green new deal como estratégia de desenvolvimento pós-pandemia: lições da experiência internacional. *Revista Tempo do Mundo*, n. 26, 2021.

MAZZUCATO, M. *O estado empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado*. Portfolio-Penguin, 2014.

МЕЛЬНИК, Л.; ДЕРИКОЛЕНКО, О.; МАЗІН, Ю.; МАЦЕНКО, О.; ПІВЕНЬ, В. Modern Trends in the Development of Renewable Energy: the Experience of the EU and Leading Countries of the World. *Механізм Регулювання Економіки*, 3 (89), 117–133, 2020.

MELNYK, L. H.; SOMMER, H.; KUBATKO, O. V.; RABE, M.; FEDYNA, S. M. The economic and social drivers of renewable energy development in OECD countries, *Problems and Perspectives in Management*, Volume 18, Issue 4, 2020.

MONTENEGRO, J. Transição energética nos EUA: por ora, o gás natural é o limite. *Revista Conjuntura Global*, v. 11, n. especial, 2022.

MORAGA-CONTRERAS, C.; CORNEJO-PONCE, L.; VILCA-SALINAS, P.; ESTUPIÑAN, E.; ZUÑIGA, A.; PALMA-BEHNKE, R.; TAPIA-CAROCA, H. Evolution of Solar Energy in Chile: Residential Opportunities in Arica and Parinacota. *Energies*, 15(2), 551, 2022.

MUHAMMAD-SUKKI, F.; ABU-BAKAR, S. H.; MUNIR, A. B.; YASIN, S. H. M.; RAMIREZ-INIGUEZ, R.; MCMEEKIN, S. G.; STEWART, B. G.; SARMAH, N.; MALLICK, T. K.; RAHIM, R. A. Feed-in tariff for solar photovoltaic: The rise of Japan. *Renewable Energy*, 68, 636–643, 2014.

PALAGE, K.; LUNDMARK, R.; SÖDERHOLM, P. The innovation effects of renewable energy policies and their interaction: the case of solar photovoltaics. *Environmental Economics and Policy Studies*, 21, 217–254, 2019.

PEGELS, A.; LÜTKENHORST, W. Is Germany' s energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV. *Energy Policy*, 74, 522–534, 2014.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3786–3802, 2012.

PEREZ, A. J. G.; HANSEN, T. Technology characteristics and catching-up policies: Solar energy technologies in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 56, 51–66, 2020.

PETERS, M.; SCHNEIDER, M.; GRIESSHABER, T.; HOFFMANN, V. H. The impact of technology-push and demand-pull policies on technical change—does the locus of policies matter? *Research Policy*, 41(8), 1296–1308, 2012.

PLATER, S. An initial analysis of options for a UK feed-in tariff for photovoltaic energy, from an array owner's viewpoint. *Environmental Research Letters*, 4(4), 44004, 2009.

PORTAL SOLAR. Disponível em <<https://www.portalsolar.com.br>>. Acesso em 18/03/2023.

RAINA, G; SINHA, S. Outlook on the Indian scenario of solar energy strategies: Policies and challenges. *Energy Strategy Reviews*, 24, 331–341, 2019.

RAMIREZ, F. J.; HONRUBIA-ESCRIBANO, A.; GÓMEZ-LÁZARO, E.; PHAM, D. *Combining feed-in tariffs and net-metering schemes to balance development in adoption of photovoltaic energy*.

RATAJ, M.; BERNIAK-WOŹNY, J.; PLEBAŃSKA, M. Poland as the EU leader in terms of photovoltaic market growth dynamics—behind the scenes. *Energies*, 14(21), 6987, 2021.

RAUSSER, G.; CHEBOTAREVA, G.; SMUTKA, L.; STRIELKOWSKI, W.; SHIRYAEVA, J. *Future development of renewable energy in russia: A case of solar power*, 2022.

RENNINGS, K. Redefining innovation - eco-innovation research and the contribution from ecological economics. *Ecological Economics*, v. 32, n.2, p. 319-332, 2000,

ROSLAN, F.; GHERGHINA, Ş. C.; SAPUTRA, J.; MATA, M. N.; ZALI, F. D. M.; MARTINS, J. M. A Panel Data Approach towards the Effectiveness of Energy Policies in Fostering the Implementation of Solar Photovoltaic Technology: Empirical Evidence for Asia-Pacific. *Energies*, 15(10), 3775, 2022.

SETYAWATI, D. Injustice and environmental harm in extractive industries and solar energy policies in Indonesia. *International Journal for Crime, Justice and Social Democracy*, 11(1), 14–27, 2022.

SHAREEF, S.; ALTAN, H. Assessing the implementation of renewable energy policy within the UAE by adopting the Australian ‘solar town’ program. *Future Cities and Environment*, 5(1), 2019.

SOLANGI, K. H.; ISLAM, M. R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; FAYAZ, H. A review on global solar energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2149–2163, 2011.

SONG, A.; LU, L.; LIU, Z.; WONG, M. S. A study of incentive policies for building-integrated photovoltaic technology in Hong Kong. *Sustainability*, 8(8), 769, 2016.

STOKES, L. C.; BREETZ, H. L. Politics in the US energy transition: Case studies of solar, wind, biofuels and electric vehicles policy. *Energy Policy*, 113, 76–86, 2018.

TORANI, K.; RAUSSER, G.; ZILBERMAN, D. Innovation subsidies versus consumer subsidies: A real options analysis of solar energy. *Energy Policy*, 92, 255–269, 2016.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, v. 14, 207–222, 2003.

VAZQUEZ, M.; HALLACK, M. The role of regulatory learning in energy transition: The case of solar PV in Brazil. *Energy Policy*, 114, 465–481, 2018.

VEUGELERS, R. (2012). Which policy instruments to induce clean innovating? *Research Policy*, 41(10), 1770–1778.

YANG, Y.-C. Analysis of cost-benefit and CO₂ emissions of solar energy-intelligent poultry feeding system: application of NPV and dynamic environmental IO model. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2020.

YI, T.; TONG, L.; QIU, M.; LIU, J. Analysis of driving factors of photovoltaic power generation efficiency: A case study in China. *Energies*, 12(3), 355., 2019.

ZHAI, P. Analyzing solar energy policies using a three-tier model: A case study of photovoltaics adoption in Arizona, United States. *Renewable Energy*, 57, 317–322, 2013.

ZHANG, Y.; ZHAO, X.; ZUO, Y.; REN, L.; WANG, L. The development of the renewable energy power industry under feed-in tariff and renewable portfolio standard: A case study of China’s photovoltaic power industry. *Sustainability*, 9(4), 532, 2017.

ZHANG, H.; ZHENG, Y.; ZHOU, D.; ZHU, P. Which subsidy mode improves the financial performance of renewable energy firms? A panel data analysis of wind and solar energy companies between 2009 and 2014. *Sustainability*, 7(12), 16548–16560, 2015.

ZHAO, R.; ZHAO, L.; DENG, S.; ZHENG, N. Trends in patents for solar thermal utilization in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 852–862, 2015.

APÊNDICE

Quadro A.1 – Políticas de fomento à energia solar fotovoltaica adotadas pelos países

Políticas	<i>FiT</i>	<i>NM</i>	<i>REC</i>	<i>RPS</i>	<i>SIP</i>	<i>RESOP</i>	<i>RTS</i>	Leilão Reverso
Países								
Reino Unido	X	X	X					
Espanha	X	X	X					
Paquistão	X							
Hong Kong	X							
China	X			X				
Áustria	X		X					
Bélgica	X	X	X					
Dinamarca	X	X	X					
França	X	X	X					
Alemanha	X	X	X					
Itália	X	X	X					
Japão	X		X	X				
Holanda	X	X	X					
Coreia do Sul	X		X					
Suécia	X		X					
Suíça	X		X					
Polônia	X							
Grécia	X	X						
Estados Unidos				X				
Austrália	X							
Catar	X				X			
Canadá						X		
Índia							X	X
Indonésia								X

Fonte: Elaboração dos autores.