

Levantamento de indicadores para avaliação de desempenho da geração individual de energia elétrica fotovoltaica

RESUMO

Entre as inovações tecnológicas do mercado de energia, destaca-se, atualmente, a geração individual de energia elétrica a partir de dispositivos fotovoltaicos. Esta pesquisa tem como objetivo identificar indicadores para avaliação do sistema de inovação tecnológica dessa geração, no contexto de geração distribuída. Para essa identificação foi realizado um estudo de mapeamento sistemático de literatura, apoiado nas metodologias *snowball sampling* (bola de neve) e análise de conteúdo, no qual, mediante um portfólio de 61 artigos, foram identificados indicadores que, então, foram relacionados às sete funções do modelo de avaliação de desempenho. Além da constatação de que os indicadores originais sugeridos por Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007) ainda se aplicam no cenário de energias renováveis, verificou-se a emergência de outros, mais relacionados à aceitação social e ao desenvolvimento ou expansão do mercado tecnológico associado à geração elétrica distribuída fotovoltaica.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de inovação tecnológica (SIT). Geração distribuída (GD). Energia solar fotovoltaica (ESFV).

Alcides Pereira da Silva Jr
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná
alcidesj17@gmail.com

Décio Estevão do Nascimento
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná
decio@utfpr.edu.br

Márcio Eduardo Zuba
Universidade Tecnológica Federal
do Paraná
marciozuba@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Em meio à evolução da tecnologia digital, a redução dos custos das energias renováveis descentralizadas e a disseminação dos recursos energéticos distribuídos (DERs), mudou o papel dos consumidores no mercado de energia elétrica (Martins; Branco; Hallack, 2022). A economia digital rompeu com o antigo paradigma do consumidor participante passivo da rede e desenvolveu o conceito de prosumidor, que é o consumidor que participa na geração de energia elétrica, descentralizadamente, realizando o autoconsumo e exportando o seu excedente de energia para as distribuidoras (Martins; Branco; Hallack, 2022). Novas oportunidades para combinar oferta e demanda de forma distribuída surgem como resultado das tendências no mercado de energia que se descentralizam. A expansão da capacidade de armazenamento local, a mudança na oferta e na demanda ao longo do tempo são algumas das muitas maneiras pelas quais a disponibilidade de flexibilidade distribuída pode ser alcançada (Kubli; Looock; Wüstenhagen, 2018).

O setor de distribuição de energia elétrica em todo o mundo está experimentando mudanças significativas, e a geração distribuída (GD) desempenha um papel importante nesse processo (Fiuza *et al.*, 2022). O termo "geração distribuída" refere-se a unidades de porte pequeno que são distribuídas no sistema elétrico de distribuição, próximo ou do lado da carga (Ackermann *et al.*, 2001; Bollen; Hassan, 2011). Os modelos de negócios das empresas distribuidoras de energia elétrica enfrentam grandes desafios, mas a possibilidade de implementar GD oferece oportunidades para empreendedores (Castro; Dantas, 2017). Quantificar corretamente os custos e os benefícios para uma distribuidora de energia elétrica devido à maior penetração de GD é um dos desafios (Fiuza *et al.*, 2022).

Existem diversas razões para o crescente aumento da GD, como a possibilidade de postergação de investimentos na expansão dos sistemas, a diversidade da matriz energética, os avanços tecnológicos e a diminuição do impacto ambiental (Tan, 2014). A GD reduz as perdas elétricas, alivia o congestionamento nas linhas de transmissão, melhora o perfil de tensão e a estabilidade do sistema, e reduz os custos de eletricidade para o consumidor final (Nolan *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2021).

O conceito de descentralização está fortemente ligado à integração de energia renovável da GD (Dranka; Ferreira, 2020). No entanto, também está relacionado à digitalização (como a instalação de medidores inteligentes) e a sistemas de baixo carbono (descarbonização) (Dranka; Ferreira, 2020). A natureza dos sistemas de eletricidade descentralizados enfatiza a necessidade de redimensionar várias funções de governança com foco em transparência, coerência, adaptabilidade, inclusão e capacitação (Brisbois, 2020).

Em relação à fonte de energia primária utilizada na geração distribuída (GD), ela pode ser renovável ou não renovável (Mendes; Sthel; Lima, 2020). Dentre as fontes não renováveis destacam-se o gás natural (GN) em microturbinas e motores alternativos com combustão interna (Mendes; Sthel; Lima, 2020). As fontes renováveis utilizadas são as pequenas centrais hidroelétricas, a energia eólica, a biomassa em termoelétricas, biogás em microturbinas e energia solar fotovoltaica (ESFV) (Allan *et al.*, 2015; Carley, 2009).

A utilização de ESFV, ou seja, a captação da radiação solar, por meio de painéis compostos por células fotovoltaicas, para geração de eletricidade (Gil *et al.*, 2020), é considerada um dos mercados mais promissores no portfólio de energias renováveis, devido ao seu potencial de mitigar o aquecimento global e atender às metas de redução de emissões de CO₂ impostas por governos nacionais e acordos internacionais (Franco; Groesser, 2021). Ainda, os sistemas fotovoltaicos podem gerar energia em locais rurais que não estão conectados à rede e fornecer energia à rede elétrica (Gil *et al.*, 2020).

Desse modo, a tecnologia associada à utilização de ESFV é capaz de acelerar a introdução de energia renovável e, portanto, de ajudar a atingir as metas de energia, pois é uma tecnologia de alto potencial técnico, ampla disponibilidade, rápida redução de custos e granularidade (Jaxa-Rozen, 2021). Essa tecnologia experimentou um grande crescimento nos últimos anos, tornando-se uma das formas mais promissoras de tecnologia renovável (Hirt; Sahakian; Trutnevte, 2022).

Como em muitas indústrias, o setor de energia e serviços públicos não é mais caracterizado por uma cadeia de valor linear (Porter, 1985) da geração, transmissão e distribuição até o consumidor final (Gordijn; Akkermans, 2007), mas alternativamente, as cadeias de valor estão se transformando em “constelações de valor mais complexas” (Gordijn; Akkermans, 2007, p. 1) em que as empresas colaboram e competem em rede (Gordijn; Akkermans, 2001; Tapscott *et al.*, 2000). No setor de energia, isso é resultado de uma combinação de fatores, como o desenvolvimento constante das tecnologias de geração distribuída, a crescente penetração de sistemas e as tecnologias avançadas de informação e comunicação (como a Internet e a *Web*, que também são distribuídas e tendem a levar à descentralização) para gerenciar uma rede cada vez mais complexa (Gordijn; Akkermans, 2007).

O fluxo de *commodities* na cadeia de valor tradicional tornou-se bidirecional, pois os consumidores não estão mais restritos a um papel de cliente passivo, mas podem gerar sua própria energia e comercializá-la no mercado, e deste modo, não apenas o fluxo de mercadorias, mas também o monetário, foram interrompidos (Hoppe; Butenko; Heldeweg, 2018). Além disso, os consumidores de energia estão se tornando cada vez mais inovadores e não dependem mais dos fornecedores para fazê-lo (Hoppe; Butenko; Heldeweg, 2018). Essas mudanças resultaram na “inovação arquitetônica disruptiva” no mercado de energia, focada tanto no fornecedor e quanto no usuário (Hoppe; Butenko; Heldeweg, 2018).

Embora a energia solar fotovoltaica ofereça grandes oportunidades para transformação dos setores de eletricidade de muitos países em desenvolvimento, a expansão da implantação de energia fotovoltaica a preços baixos e competitivos requer a redução de riscos, o que exige atração de grande volume de investimentos (Ondraczek *et al.*, 2015; Schmidt, 2014). Em vários países em desenvolvimento, os investidores e desenvolvedores de projetos fotovoltaicos enfrentam riscos tecnológicos, políticos e macroeconômicos, manifestados em altos custos de financiamento que refletem barreiras informacionais, técnicas, regulatórias, financeiras e administrativas e seus riscos de investimento associados (Waissbein *et al.*, 2013). Podem existir ainda outras ameaças ou riscos políticos, relacionados com instabilidade do governo e riscos macroeconômicos de flutuações cambiais (Dobrotkova; Surana; Audinet, 2018).

A FV distribuída oferece a oportunidade de melhorar a confiabilidade da eletricidade em locais onde os serviços de eletricidade são prejudicados, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (Kammen; Sunter, 2016). A energia fotovoltaica distribuída pode ser apoiada como um meio de promover o desenvolvimento econômico de comunidades, seja por meio de empregos (por exemplo, na instalação) ou gerando renda familiar adicional no caso de as famílias poderem vender eletricidade à rede (Geall, Shean, Gongbuzeren, 2018; Matsuo, 2019). No processo de transição energética, a geração de energia renovável distribuída, especialmente aquela relacionada a tecnologias solares fotovoltaicas, pode desempenhar um papel significativo em aplicações residenciais, comerciais e industriais (IEA; Irena, 2017) (Kriechbaum; Brent; Posch, 2018).

A implementação bem-sucedida de novas tecnologias na sociedade geralmente depende de uma série de fatores tecnológicos e socioeconômicos (Rogers, 2003). Como resultado, muitas áreas da engenharia de sistemas complexos concordam que se deva levar em consideração na sua implementação requisitos técnicos e de negócios (Gordijn; Akkermans, 2003). Essa regra também se aplica às novas tecnologias de geração de energia distribuída, conhecidas como geração distribuída (DG) ou recursos de energia distribuída (DER) (Gordijn; Akkermans, 2007). A análise de seu potencial exige uma abordagem teórica de sistemas que envolve a análise de suas características técnicas gerais (Strbac, Mutale, Bopp, 2002), e a necessidade de se considerar contextos e cenários estratégicos amplos, nos quais as tecnologias funcionarão (Van Der Heijden, 2007), e dos modelos de negócio (Gordijn; Akkermans, 2001) que visam tornar as tecnologias inovadoras economicamente sustentáveis, além do estágio de pesquisa e desenvolvimento (Gordijn; Akkermans, 2007).

O conjunto formado pelos elementos, tecnologias, atores, redes e instituições, que colaboram para o desenvolvimento de determinado campo tecnológico (Bergek *et al.*, 2008; Bergek *et al.*, 2015; Markard; Truffer, 2008) é o objeto do modelo de análise de sistema de inovação tecnológica (SIT ou, em inglês, TIS, de *technological innovation system*), que propõe uma análise funcional para determinar o desempenho, pontos fortes e fraquezas de determinado sistema tecnológico. O conceito de SIT surgiu como parte da literatura mais ampla sobre sistemas de inovação (SI) (Markard; Truffer, 2008; Kriechbaum; Brent; Posch, 2018). A literatura do SIT adota a abordagem sistêmica para entender o desenvolvimento de um setor tecnológico, com foco na criação de conhecimento e na difusão do conhecimento em redes (Carlsson; Stankiewicz, 1991; Lilliestam *et al.*, 2021).

A estrutura de sistemas tecnológicos (inovação) foi desenvolvida por um conjunto de estudiosos suecos, no final dos anos 1980 e início dos anos 1990 (Bergek, 2019), com o objetivo de construir uma base de análises de políticas de tecnologia (Carlsson; Elg; Jacobsson, 2010). O desenvolvimento posterior da chamada abordagem de funções surge com Bergek *et al.* (2008), Hekkert *et al.* (2007), Jacobsson (2001) e Johnson (2001). Embora os sistemas de inovação tecnológica sejam definidos dentro de um sistema de inovação global, os estudos geralmente se concentram nos determinantes nacionais do desenvolvimento do sistema (Van Der Loos *et al.*, 2021), o que destaca o importante papel que o contexto geográfico desempenha ao influenciar o surgimento e o desenvolvimento do SIT (Van Der Loos *et al.*, 2021). O foco pode estar em campos tecnológicos maduros ou no surgimento e difusão de inovações novas e radicais (Bergek *et al.*,

2008; Bergek *et al.*, 2015; Carlsson; Stankiewicz, 1991; Hekkert *et al.*, 2007; Markard; Truffer, 2008).

Um SIT é também definido como uma rede de atores e instituições engajados na geração e difusão de um artefato tecnológico (Markard; Raven; Truffer *et al.*, 2012). Os atores são os peça-chave no sistema de inovação, e podem incluir empresas privadas, órgãos governamentais, mercado de ações e grupos de pesquisa (Van der Loos *et al.*, 2021). As instituições são as regras que regem a tecnologia, enquanto as redes são a dinâmica que permite a troca de conhecimento tácito e explícito e interações entre os atores (Van der Loos *et al.*, 2021). A infraestrutura inclui um aparato físico – como estradas, portos e telecomunicações – e um relacionado ao conhecimento, como a presença de universidades técnicas (Van der Loos *et al.*, 2021).

Esta estrutura descreve as redes de atores e instituições (ou seja, o sistema socioinstitucional) que emergem por trás das tecnologias e sugere que as barreiras ao desenvolvimento e difusão de novas tecnologias são tipicamente enraizadas nas fraquezas dessas redes (Kriechbaum; Brent; Posch, 2018; Markard; Raven; Truffer *et al.*, 2012). A rede de atores e a infraestrutura institucional são dinâmicas (Bergek, 2019).

Neste contexto, busca-se uma ferramenta que possibilite aos pesquisadores do tema compreender o *status* da geração distribuída fotovoltaica em determinado local e comparar seu desempenho (potenciais e bloqueios), ao de outros mercados ou locais, ainda a outras energias e tecnologias. Desta forma, este artigo tem como objetivo identificar indicadores para avaliação do sistema de inovação tecnológica da geração distribuída fotovoltaica, a partir do modelo de análise funcional dos sistemas de inovação tecnológica, proposta por Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007), que visa avaliar um sistema de inovação considerando os diversos atores, destacando os formuladores de políticas públicas e empreendedores e identificando os pontos fortes e fracos destes sistemas.

Um dos principais benefícios da abordagem de funções é o de permitir aos estudiosos medir o desempenho dos sistemas de inovação, ou compreender a dinâmica do sistema (Edsand, 2019; Kriechbaum; Brent; Posch, 2018). Pode-se destacar, dessa forma, o desempenho insatisfatório de uma ou mais funções do sistema com as quais os formuladores de políticas precisarão intervir (políticas para gerar, difundir e utilizar uma nova tecnologia) (Bergek *et al.*, 2008; Edsand, 2019). Outro benefício da abordagem de funções é que ela fornece, aos estudiosos, *insights* sobre processos de crescimento dos sistemas de inovação (Kriechbaum; Brent; Posch, 2018).

METODOLOGIA

A abordagem funcional proposta por Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007) visa identificar meios de acelerar a difusão de uma tecnologia que tenha sido definida como desejável por empreendedores, formuladores de políticas e/ou outras partes interessadas relevantes. As "funções em sistemas de inovação" que determinam o desempenho do sistema por meio de um mapeamento empírico e análise dessas funções podem identificar forças e fraquezas do sistema (Bergek, Hekkert e Jacobsson, 2007). O resumo das funções é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Funções aplicadas na análise do sistema de inovação tecnológica (SIT)

Função	Descrição	Foco
1 Desenvolvimento do conhecimento e difusão	Relacionado com a amplitude e profundidade da base de conhecimento SIT e com a eficiência da difusão e combinação de conhecimento no sistema.	Projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D); patentes; bibliometria; investimentos em P&D; curva de aprendizagem; número de <i>workshops</i> e conferências; tamanho e intensidade das redes de aprendizagem.
2 Influência na direção pretendida	Combina a percepção e a conclusão de oportunidades de negócios no sistema e incentivos e/ou pressão para que isso aconteça. Também engloba mecanismos que influenciam as "direções" de pesquisa dentro do SIT em termos de tecnologias concorrentes, aplicações, mercados, modelos de negócios, etc.	Preços de fatores/produtos (por exemplo, impostos e preços no setor de energia); pressões regulatórias (por exemplo, sistemas de cotas para energia renovável); metas governamentais/industriais quanto ao uso de uma tecnologia específica; estimativas de potenciais de crescimento futuros; articulação de interesse pelos principais clientes.
3 Experimentação empreendedora	Relacionada à forma como o Sistema de Inovação Tecnológica converte o "potencial de novos conhecimentos, redes e mercados em ações concretas para gerar, perceber e aproveitar novas oportunidades de negócios".	Número de novos participantes; número de atividades dos atores envolvidos; número de experimentos com a nova tecnologia; grau de variedade em experimentos (por exemplo, número de aplicações diferentes).
4 Formação de mercado	Envolve, entre outras coisas, a identificação de atores empresariais (ou formuladores de políticas) de segmentos de mercado ("nichos") em que as vantagens da nova tecnologia são mais valorizadas do que suas desvantagens (por exemplo, em termos de custo).	Número, tamanho e tipo de mercado formado; momento da formação de mercado; <i>drivers</i> do mercado em formação.
5 Mobilização de recursos	Relacionada à capacidade do SIT de mobilizar capital e ativos complementares. Em relação ao capital, incluiria tanto o humano, por meio da educação científica e tecnológica, empreendedorismo e gestão, quanto o financeiro.	Continua... Volume de capital e capital de risco; volume e qualidade de recursos humanos (dados educacionais); volume e qualidade de ativos complementares.

Função	Descrição	Foco
6 Legitimação	Relacionado ao princípio de que a legitimidade, tanto da tecnologia quanto de seus proponentes, é uma condição para a mobilização de recursos, criando a demanda tecnológica e permitindo que os atores do SIT capitalizem bastante força política.	Atitudes em relação à tecnologia entre diferentes <i>stakeholders</i> ; ascensão e crescimento de grupos de interesse; extensão das atividades de <i>lobby</i> ; debate político no parlamento e na mídia.
7 Desenvolvimento de externalidades positivas	Externalidades positivas ou "utilidades livres", essenciais para a formação de <i>clusters</i> .	Força do poder político dos atores do SIT; atividades visando à resolução da incerteza; existência/desenvolvimento de divisão clara do trabalho; intermediários especializados e/ou um mercado de trabalho agrupado; fluxos de informação e conhecimento.

Fonte: Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007).

Esta pesquisa tem como objetivo identificar indicadores para avaliação do sistema de inovação tecnológica da geração distribuída fotovoltaica. E, visando o atingimento desse objetivo, adotou, como metodologia, o Mapeamento Sistemático da Literatura, utilizando-se da abordagem do *snowballing*, que propõe o “uso da lista de referências ou das citações de um artigo para identificar artigos adicionais” (Wohlin, 2014).

A metodologia de seleção do referencial bibliográfico consiste em uma série de procedimentos sequenciais que se iniciam com a definição do mecanismo de busca dos artigos científicos nas bases escolhidas, seguida de procedimentos de filtragem até a seleção e análise dos resultados obtidos, os quais irão compor o portfólio bibliográfico relevante sobre o tema. Este processo de levantamento bibliométrico foi estabelecido em 16 etapas, descritas a seguir e cujos resultados são apresentados no Quadro 2.

Após os passos iniciais em que foram definidos o problema, a pergunta e o objetivo da pesquisa, os eixos temáticos e as palavras-chave, e realizados testes de aderência, foi possível confeccionar uma *string* de busca e iniciar o levantamento de artigos. A *string* foi aplicada às bases selecionadas – Web of Science e Scopus (etapa 1). Os resultados obtidos em cada base de dados (ou seja, o banco inicial de artigos) foi exportado para o *software* de gerenciamento bibliográfico Zotero (etapa 2) e a organização dos dados foi realizada em planilha Excel, para facilitar a análise das informações (etapa 3). Já a etapa 4 consistiu na filtragem dos artigos, iniciando-se com a exclusão de documentos repetidos, os quais podem ocorrer pelo fato de a busca ter sido feita em duas bases de dados. Na etapa 5 foram excluídos documentos não disponíveis para *download*. Na sequência (etapa 6) foi realizada a leitura flutuante, que consistiu na leitura dos títulos, resumos, palavras-chave e conclusões ou resultados dos documentos, para a verificação da sua aderência. Após, na etapa 7, foi realizada a leitura integral e foram excluídos documentos com conteúdo não aderente à pesquisa. O resultado

deste processo de filtragem foi considerado como portfólio bibliográfico inicial desta pesquisa. Visando ampliar o portfólio de artigos foi utilizada a técnica de *snowballing* (bola de neve), que consistiu em iterações para trás e para frente. Para trás (etapa 8), com o levantamento de todo o referencial destes documentos até aqui selecionados. Para a frente, com o levantamento, via ferramenta de busca Google Acadêmico, de pesquisas que se utilizaram dos artigos selecionados em estudos mais recentes, ou seja, as citações desta base de artigos (etapa 9). A seguir, na etapa 10, aplicou-se um filtro de modo a selecionar artigos recentes, publicados nos últimos seis anos, mantendo-se os demais filtros previamente definidos (disponibilidade integral do documento, exclusão de duplicados, leitura flutuante (etapa 11) e leitura integral (etapa 12)), para a identificação da aderência ao tema. Obteve-se assim um novo portfólio bola de neve que, somado ao portfólio inicial, constituiu-se no *corpus* dinâmico da pesquisa.

Já a etapa 13 consistiu no levantamento, a partir dos artigos selecionados, de todo o referencial bibliográfico utilizado (com exceção de dissertações e teses), com o qual, mediante tabulação de dados, foi possível identificar os autores mais frequentemente considerados – portanto, autores basilares. Os artigos produzidos pelos autores de base mais citados na base do *corpus* dinâmico foram separados e organizados (etapa 14 do processo), totalizando 85 artigos. Então, desse conjunto de artigos, consolidou-se a base de informações acerca da teoria e conceitos do SIT, cuja abordagem funcional foi utilizada na fundamentação teórica desta pesquisa. Visando o atingimento do objetivo da pesquisa, de identificar indicadores para avaliação do sistema de inovação tecnológica da geração distribuída fotovoltaica, e para buscar indicadores que representem o atual cenário energético, aplicou-se novo filtro, que descartou, na etapa 15, artigos publicados antes do ano de 2018. Assim, um conjunto final de 61 documentos foi o resultado do levantamento bibliométrico (etapa 16), a partir do qual foi composto o portfólio bibliográfico do tema de pesquisa.

Quadro 2 – Processo da revisão sistemática

Fase	Etapa da revisão sistemática	Nº de inclusões/exclusões	Nº artigos selecionados
Portfólio Inicial (1)	1 Buscas nas bases (WoS e Scopus)	137	137
	2 Exportação para o Zotero	-	-
	3 Relatório Excel	-	-
	4 Artigos duplicados	-20	117
	5 Artigos não disponíveis	-21	96
	6 Leitura flutuante	-72	24
	7 Leitura integral	-9	15
Portfólio Bola de Neve (2)	8 Bola de neve para trás	48	48
	9 Bola de neve para frente	564	612
	10 Artigos publicados a partir de 2018	-432	180
	11 Leitura flutuante	-70	Continua...
	12 Leitura integral	-59	
Portfólio Literatura base (3)	13 Referencial total dos 51 artigos	4.715	4.715
	14 Artigos mais citados	-4.696	19

Fase	Etapa da revisão sistemática	Nº de inclusões/exclusões	Nº artigos selecionados
	(autores de base)		
Portfólio Final (4)	15 Soma dos portfólios 1, 2 e 3	-	85
	16 Artigos publicados entre 2018-2022	-24	61

Fonte: autoria própria (2023).

DESENVOLVIMENTO (RESULTADOS E DISCUSSÕES)

Para atender ao objetivo principal desta pesquisa (identificar indicadores para avaliação do sistema de inovação tecnológica da geração distribuída fotovoltaica), os 61 artigos selecionados foram avaliados, com o apoio do *software* para análise de dados MAXQDA, buscando-se em seu conteúdo o resumo de suas análises e resultados de pesquisa, apresentados em quadros, tabelas ou figuras, em listas de critérios, índices, indicadores ou modelos de análise utilizados em sua metodologia. Desse levantamento foram selecionados 268 itens, identificados nesta pesquisa como unidades de contexto (UC).

A partir da análise e confronto das 268 UC aos aspectos da teoria da abordagem funcional do modelo de análise SIT (7 Funções do STI) e aos aspectos da GD FV foram selecionadas 53 UC, consideradas pertinentes, em 25 artigos distintos.

Na sequência, em nova análise realizada sob o resultado anterior (53 UC), buscou-se identificar o alinhamento em relação às funções do Sistema de Inovação Sistemática: (F1) desenvolvimento e difusão; (F2) mercados e políticas; (F3) pesquisas: tecnologias e experimentação; (F4) formação de mercados; (F5) recursos; (F6) legitimação: impactos e opinião pública e (F7) externalidades positivas. Esta etapa da análise das UC forneceu 48 indicadores, cujo detalhamento, função a função, é feito a seguir, apresentando-se o resumo das etapas do processo da análise de conteúdo (Tabela 1) e os indicadores identificados para cada função do SIT (Quadro 3).

Tabela 1 – Etapas da análise de conteúdo

Etapa	Ferramenta	Resultado (Qtd.)	Unidade
1 - Leitura e busca, nos 61 artigos, por quadros, figuras e tabelas com os resultados das pesquisas;	MAXQDA	128	UCs
2 - UCs selecionadas por alinhamento à descrição das funções SIT; e a GD e/ou FV.	MAXQDA e Excel	53	UCS
3 - Identificação dos indicadores a partir das 53 UCs selecionadas.	Excel	47	Indicadores

Fonte: autoria própria (2023).

A função 1 se ocupa do desenvolvimento e da difusão do conhecimento, e é definida por Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007) como a função que irá avaliar a

amplitude e a profundidade da base de conhecimento SIT e a sua combinação entre os atores do sistema. Portanto, essa função permite conhecer o tamanho e a intensidade das redes de aprendizagem, e é medida, de acordo com os autores, mediante o número de projetos de P&D, patentes, bibliometria, investimentos em P&D, curva de aprendizagem e número de *workshops* e de conferências (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007). Esses indicadores foram encontrados na base pesquisada e, portanto, ratificados pela literatura, que apresentou, ainda, o número de cursos técnicos e superiores, o número de funcionários treinados e os resultados da engenharia reversa como possíveis métricas para a função 1, a qual, para Bergek (2019), trata-se de uma importante forma de conexão entre os atores em rede, o que a torna sistêmica (Bergek, 2019).

A função 2 (influência na direção pretendida) deve avaliar as oportunidades de negócios no sistema, compreendendo incentivos e/ou pressão, bem como mecanismos que influenciam as pesquisas dentro do SIT, e utiliza, como indicadores, os preços, as pressões regulatórias, as metas governamentais/industriais quanto ao uso da tecnologia, estimativas do seu potencial crescimento e a perspectiva de interesse de principais clientes (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007; Bergek *et al.*, 2008). Esses indicadores foram identificados na análise da literatura-base desta pesquisa, que ainda aponta para a possibilidade de se medir recursos/subsídios internacionais e a avaliação da opinião pública sobre o uso da tecnologia na avaliação dessa função 2.

A experimentação empreendedora, descrita na função 3, conforme definido por Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007), relaciona-se à forma como o SIT converte conhecimento em oportunidades de negócios. Essa função pode ser medida mediante o número de novos participantes, número de atividades dos atores envolvidos, número de experimentos com a nova tecnologia e grau de variedade em experimentos (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007). Nesse aspecto, a literatura investigada apresenta como condição a adoção de novas tecnologias, como microrredes e armazenagem de energia, e ratificam indicadores como custos de investimento e preço da energia (incluindo a medida da potência instalada em GD).

A função 4, que trata da formação de mercado, envolve a identificação de atores empresariais, formuladores de políticas e segmentos ou nichos de mercado (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007), e inclui as regras para as trocas entre a oferta e a demanda, considerando a sua complexidade (Bergek, 2019; Dewald; Truffer, 2012). Essa função é mensurada pelo tamanho e tipo de mercado formado, momento da formação de mercado e *drivers* do mercado em formação (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007). Os indicadores foram ratificados na comparação com a literatura revisada, que destaca ainda indicadores de número de empresas ativas por segmento e o número de consumidores/produtores (ou prosumidores) de energia.

A mobilização de recursos, medida na função 5, é definida como aquela relacionada à capacidade do SIT de mobilizar capital financeiro, capital humano e outros ativos (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007; Carlsson; Stankiewicz, 1991): *a*) capital financeiro (avaliado a partir do volume de capital inicial, capital de risco, diversificação da empresa, etc.); *b*) capital humano (volume e qualidade de recursos humanos, considerando-se a educação em áreas científicas e tecnológicas específicas, empreendedorismo, gestão e finanças); *c*) outros ativos (volume e qualidade de ativos complementares, como produtos complementares, serviços

e infraestrutura de rede) (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007; Bergek *et al.*, 2008). Esses indicadores estão também presentes na literatura atual, incluindo, para o SIT específico, a mensuração do crescimento da capacidade instalada solar fotovoltaica e o número de projetos envolvendo energia solar fotovoltaica.

No que diz respeito à função 6, ela se relaciona ao princípio da legitimidade, ou aceitação social, da tecnologia e de seus proponentes (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007). Trata-se de um processo dinâmico (Zimmerman; Zeitz, 2002) em que a tecnologia e seus proponente buscam a aceitação pelos atores relevantes, mobilizando recursos e adquirindo força política (Bergek *et al.*, 2008). Para isso é necessário compreender: o alinhamento entre o SIT e a legislação, como a legitimidade influencia a demanda, a legislação e o comportamento das empresas, e o que (ou quem) influencia, e de que maneira, essa legitimidade (Bergek *et al.*, 2008). A função pode ser medida por meio das atitudes em relação à tecnologia entre diferentes *stakeholders*, pela ascensão e crescimento de grupos de interesse, pela extensão das atividades de *lobby*, pelo debate político e pela mídia (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007). Esses indicadores foram ratificados pela literatura, com destaque aos indicadores que consideram a questão do impacto ambiental como fator importante para as cadeias de suprimento das tecnologias de energia renovável.

Por fim, a função 7 (desenvolvimento de externalidades positivas) prevê o desenvolvimento de utilitários gratuitos no sistema – por exemplo, mercados de trabalho e fornecedores de componentes especializados (Bergek; Hekkert; Jacobsson, 2007; Porter, 1998). A literatura estudada destaca, complementarmente, a identificação do número de empresas de tecnologia da informação (TI), e propõe uma matriz de impacto cruzado e o levantamento das vantagens para empresas de distribuição de energia e uma modelagem econométrica para medir impactos positivos na economia local ou regional.

Quadro 3 – Indicadores identificados em relação ao SIT

Função do SIT	Indicadores identificados
F1 Desenvolvimento do conhecimento e difusão	1) Investimentos em P&D; 2) Volume de produção científica; 3) Nº de cursos técnicos e superiores; 4) Nº de funcionários treinados; 5) Resultados de engenharia reversa; 6) Nº de <i>workshops</i> , conferências ou outros fóruns; 7) Nº de patentes, protótipos e projetos.
F2 Influência na direção pretendida	1) Planejamento estratégico nacional para tecnologias de energia renovável; 2) Políticas para energias renováveis; 3) Isenções fiscais; subsídios para tecnologia; 4) Recursos internacionais; 5) Opinião pública.
F3 Experimentação empreendedora	1) Políticas para microrredes, adoção de regimes especiais de tributação (RETs) e armazenagem de energia; 2) Custos de investimento; 3) Preço da energia; 4) Potência instalada de GD.

Função do SIT	Indicadores identificados
F4 Formação de mercado	1) Custos de políticas de incentivo; 2) Acesso ao crédito (financiamento); 3) Custo médio dos módulos solares fotovoltaicos; 4) Custo médio das tarifas de energia elétrica, em R\$/MWh; 5) Investimentos em energia solar; 6) Investimento em tecnologia de energia solar distribuída; 7) Investimento em geração solar distribuída; 8) Nº de empresas ativas por segmento; 9) Desenvolvimento tecnológico em nichos; 10) Nº de prosumidores; 11) Modelos de negócios; 12) Número total de instalações e potência instalada por classe de consumidor; 13) Identificação dos principais atores do sistema.
F5 Mobilização de recursos	1) Investimento no desenvolvimento de recursos humanos; 2) Infraestruturas físicas (centros de investigação e desenvolvimento (I&D), laboratórios); 3) Investimento de capital em máquinas e equipamentos, <i>software</i> ou I&D; 4) Capacidade energética fotovoltaica; 5) Capacidade solar fotovoltaica; 6) Projetos solares.
F6 Legitimação	1) <i>Lobby</i> formal (criação da coalizão legitimidade/ <i>advocacy</i>); 2) <i>Lobby</i> informal (criação de legitimidade); 3) Impactos ambientais; 4) Impactos econômicos; 5) Envolvimento sustentável dos cidadãos; 7) Mudanças na consciência pública para RETs.
F7 Desenvolvimento de externalidades positivas	1) Nº de empresas de TI por tecnologia; 2) Nº de empresas de TI nacionais; 3) Matriz de impacto cruzado (análise estrutural para identificar variáveis-chave); 4) Impacto da GD em empresas de distribuição (benefícios); 5) Modelagem econométrica.

Fonte: autoria própria, 2023.

Desse modo, foram identificados indicadores ao modelo funcional dos autores Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007). Para cada função destaca-se a ratificação de indicadores já elencados pelos autores do SIT e novos indicadores encontrados na análise da literatura, decorrentes de novas percepções e preocupações da sociedade em relação ao uso da energia elétrica, e que podem ser utilizados na avaliação do desempenho da SIT da GD FV.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa foi identificar indicadores para a avaliação do sistema de inovação tecnológica da geração distribuída fotovoltaica, mediante uma revisão sistemática da literatura. A partir do modelo de análise funcional do sistema de inovação tecnologia, de Bergek, Hekkert e Jacobsson (2007), aplicado ao portfólio de artigos levantados para esta pesquisa, foi possível verificar que os indicadores sugeridos pelos autores continuam a ser aplicados em pesquisas que avaliam o desempenho de tecnologias de energias renováveis.

Além desses, outros indicadores foram identificados e relacionados às sete funções do SIT da GD FV: indicadores para aplicação específica às tecnologias de geração distribuída, indicadores que refletem preocupações da sociedade, como os relacionados à questão ambiental, à logística reversa e/ou à reciclagem dos materiais, indicadores relativos ao uso de tecnologias associadas à tecnologia solar fotovoltaica, como microrredes (ou redes inteligentes) e o armazenamento de energia elétrica (baterias), e, ainda indicadores para a governança, como os voltados à modernização da tarifação e ao planejamento estratégico nacional

(políticas e financiamento públicos). Esses indicadores são também relevantes e necessários, de acordo com a literatura pesquisada, para o acompanhamento da aceitação social e do desenvolvimento ou expansão do mercado tecnológico associado à GD FV.

Como possível limitação metodológica, este estudo identifica o processo de escolha e de combinação das palavras-chave utilizadas, pois é possível que, com ele, artigos relevantes tenham sido deixados de lado. Além disso, há a limitação inerente às bases consultadas (Web of Science e Scopus), pois muito provavelmente há, em outras bases, pesquisas igualmente relevantes que tratam do tema, e, finalmente, há a limitação imposta pelos filtros de exclusão utilizados, que podem, igualmente, ter excluído pesquisas importantes.

Sugere-se, assim, para trabalhos futuros, ampliar as investigações em outras bases, com estratégias de busca diferentes. Sugere-se, do mesmo modo, mas como continuidade a este estudo, a aplicação do modelo funcional e dos indicadores que aqui foram identificados.

Survey of indicators to evaluate the performance of individual generation of photovoltaic electrical energy

ABSTRACT

Among the technological innovations in the energy market, the individual generation of electrical energy from photovoltaic devices currently stands out. This research aims to identify indicators for evaluating the technological innovation system of this generation, in the context of distributed generation. For this identification, a systematic literature mapping study was carried out, supported by snowball sampling and content analysis methodologies, in which, through a portfolio of 61 articles, indicators were identified and then related to the seven functions of the performance evaluation model. In addition to the observation that the original indicators suggested by Bergek, Hekkert and Jacobsson (2007) still apply in the renewable energy scenario, there was the emergence of others, more related to social acceptance and the development or expansion of the technological market associated with photovoltaic distributed electrical generation.

KEYWORDS: Technological innovation system (TIS). Distributed generation (DG). Photovoltaic solar energy (PVSE).

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: A definition. **Electric Power Systems Research**, Zurich, v. 57, p. 195-204, dez. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779601001018>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- ALI, A. *et al.* Overview of Current Microgrid Policies, Incentives and Barriers in the European Union, United States and China. **Sustainability**, [s. l.], v. 9, n. 7, p. 1146, jun. 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/7/1146>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- ALI, S. A. *et al.* A clean technological innovation and eco-efficiency enhancement: A multi-index assessment of sustainable economic and environmental management. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 166, p. 120573, maio 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521000056>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- ALLAN, G. *et al.* The economics of distributed energy generation: a literature review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 42, p. 543-556, fev. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114005164>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- ANDREÃO, Gustavo Onofre; VÁZQUEZ, Miguel; HALLACK, Michelle. The relationship between finance and industrial policy in the promotion of renewable technology: an agent-based model for the challenges to promote photovoltaic in Brazil. [S. l.]: **International Association for Energy Economics**, 2017. Disponível em: <https://www.ippapublicpolicy.org/file/paper/5937cc30b06cd.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- BERGEK, A. *et al.* Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems: A scheme of analysis. **Research Policy**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 407-429, abr. 2008. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=905b32bd12f360b008eddb7b16169007d82211bc>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- BERGEK, A. *et al.* Technological innovation systems in contexts: Conceptualizing contextual structures and interaction dynamics. **Environmental Innovation and Societal Transitions**, [s. l.], v. 16, p. 51-64, set. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221042241530006X>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- BERGEK, A. Technological innovation systems: a review of recent findings and suggestions for future research. In: BOONS, F.; MCMEEKIN, A. (ed.). **Handbook of Sustainable Innovation**, [s. l.]: Edward Elgar Publishing, p. 200-218, 2019. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://research.chalmers.se/publication/532763/file/532763_Fulltext.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

BERGEK, A.; JACOBSSON, S.; SANDÉN, B. A. 'Legitimation' and 'development of positive externalities': two key processes in the formation phase of technological innovation systems. **Technology Analysis & Strategic Management**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 575-592, set. 2008. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09537320802292768>. Acesso em: 30 nov. 2023.

BERGEK, Anna.; HEKKERT, Marko; JACOBSSON, Staffan. **Functions in innovation systems: A framework for analyzing energy system dynamics and identifying goals for system-building activities by entrepreneurs and policy makers**. 2007. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=330702f4a473a5cdb2c47107286c39a66196533e>. Acesso em: 30 nov. 2023.

BOLLEN, M.; HASSAN, F. Integration of Distributed Generation in the Power System. **IEEE Press Editorial Board**. Knoxville, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285760683_Integration_of_Distributed_Generation_in_the_Power_System_M_Bollen_F_Hassan_Wiley-IEEE_Press_New_Jersey_2011. Acesso em: 30 nov. 2023.

BRISBOIS, M. C. Decentralised energy, decentralised accountability? Lessons on how to govern decentralised electricity transitions from multi-level natural resource governance. **Global Transitions**, [s. l.], v. 2, p. 16-25, jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589791820300013>. Acesso em: 30 nov. 2023.

BURGHARD, U. *et al.* Cross-border concentrated solar power projects - opportunity or dead end? A study into actor views in Europe. **Energy Policy**, [s. l.], v. 163, p. 112833, abr. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421522000581>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CARLEY, S. Distributed generation: an empirical analysis of primary motivators. **Energy Policy**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 1648-1659, maio 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030142150900010X>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CARLSSON, B.; ELG, L.; JACOBSSON, S. Reflections on the co-evolution of innovation theory, policy and practice: the emergence of the Swedish agency for innovation systems. In: SMITS, Ruud E.; KUHLMANN, Stefan; SHAPIRA, Philip (ed.). **The theory and practice of innovation policy - An international research handbook**. Cheltenham: Edward Elgar, 2010. p. 145-166. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Philip-Shapira/publication/47903208_Introduction_A_Systemic_Perspective_The_Innovation_Policy_Dance/links/5515bd980cf2b5d6a0ebf73d/Introduction-A-Systemic-Perspective-The-Innovation-Policy-Dance.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

CARLSSON, B.; STANKIEWICZ, R. On the nature, function and composition of technological systems. **Journal of Evolutionary Economics**, [s. l.], v. 1, n. 2, p. 93-118, 1991. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01224915>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CASTRO, N.; DANTAS, G. **Distributed Generation: International Experiences and Comparative Analyses**. Rio de Janeiro: Publit, 2017. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/40_ACD_Digital_Distributed_generation_ANTIGO.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

DEL RÍO, P.; PEÑASCO, C.; MIR-ARTIGUES, P. An overview of drivers and barriers to concentrated solar power in the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 81, p. 1019-1029, jan. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117309784>. Acesso em: 30 nov. 2023.

DEWALD, U.; TRUFFER, B. The Local Sources of Market Formation: Explaining Regional Growth Differentials in German Photovoltaic Markets. **European Planning Studies**, [s. l.], v. 20, n. 3, p. 397-420, maio 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09654313.2012.651803>. Acesso em: 30 nov. 2023.

DOBROTKOVA, Z.; SURANA, K.; AUDINET, P. The price of solar energy: Comparing competitive auctions for utility-scale solar PV in developing countries. **Energy Policy**, [s. l.], v. 118, p. 133-148, jul. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421518301708>. Acesso em: 30 nov. 2023.

DRANKA, G. G.; FERREIRA, P. Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities. **Energy Policy**, [s. l.], v. 136, p. 111033, jan. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421519306202>. Acesso em: 30 nov. 2023.

EDSAND, H.-E. Technological innovation system and the wider context: A framework for developing countries. **Technology in Society**, [s. l.], v. 58, p. 101150, ago. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160791X18301222>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ELIA, A. *et al.* Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 138, p. 110488, mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307747>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ERAS-ALMEIDA, A. A.; EGIDO-AGUILERA, M. A. What Is Still Necessary for Supporting the SDG7 in the Most Vulnerable Contexts? **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 17, p. 7184, set. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/7184>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ESMAILZADEH, M. *et al.* A Functional Analysis of Technological Innovation Systems in Developing Countries: An Evaluation of Iran's Photovoltaic Innovation System. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 5, p. 2049, mar. 2020a. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2049>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ESMAILZADEH, M. *et al.* Investigating macro factors affecting the technological innovation system (TIS): A case study of Iran's photovoltaic TIS. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 32, p. 100577, nov. 2020b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211467X20301309>. Acesso em: 30 nov. 2023.

FIUZA, E. L. *et al.* Identification of factors associated with distributed generation that affect the costs and benefits of an electric power distribution company. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 47761-47779, jun. 2022.

FRANCO, M. A.; GROESSER, S. N. A Systematic Literature Review of the Solar Photovoltaic Value Chain for a Circular Economy. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 17, p. 9615, ago. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/17/9615>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GAULT, F. Defining and measuring innovation in all sectors of the economy. **Research Policy**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 617-622, abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048733318300076>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GEALL, S.; SHEN, W.; GONGBUZEREN. Solar energy for poverty alleviation in China: State ambitions, bureaucratic interests, and local realities. **Energy Res. Soc. Sci.**, [s. l.], p. 238-248, mai. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629618304067>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GIL, G. M. Vargas *et al.* Photovoltaic energy in South America: Current state and grid regulation for large-scale and distributed photovoltaic systems. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 162, p. 1307-1320, dez. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120312593>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GORDIJN, J.; AKKERMANS, J. M. Value-based requirements engineering: exploring innovative e-commerce ideas. **Requirements Eng.**, [s. l.], 8, p. 114-134, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/225134303_Akkermans_H_Value-based_Requirements_Engineering_Exploring_Innovative_e-commerce_Idea_Requirements_Eng_Journal_82_114-134. Acesso em: 30 nov. 2023.

GORDIJN, J.; AKKERMANS, H. Business models for distributed generation in a liberalized market environment. **Electric Power Systems Research**, [s. l.], v. 77, n. 9, p. 1178-1188, jul. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779606001878>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GORDIJN, J.; AKKERMANS, H. Design and evaluation of e-business. **IEEE Intell. Syst.**, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 11-17, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/3453947_Designing_and_Evaluating_E-Business_Models. Acesso em: 30 nov. 2023.

HEKKERT, M. P. *et al.* Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 74, n. 4, p. 413-432, maio 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162506000564>. Acesso em: 30 nov. 2023.

HIRT, L. F.; SAHAKIAN, M.; TRUTNEVYTE, E. What subnational imaginaries for solar PV? The case of the Swiss energy transition. **Technology in Society**, [s. l.], v. 71, p. 102068, nov. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X22002093>. Acesso em: 30 nov. 2023.

HOPPE, T.; BUTENKO, A.; HELDEWEG, M. Innovation in the European Energy Sector and Regulatory Responses to It: Guest Editorial Note. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 416, fev. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/2/416>. Acesso em: 30 nov. 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) AND INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). "Chapter 1 of Perspectives for the Energy Transition – Investment Needs for a Low-Carbon Energy System." **OECD/IEA and IRENA**, [s. l.], v. 1, p. 23-50, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09537325.2018.1473851>. Acesso em: 30 nov. 2023.

JAXA-ROZEN, M.; TRUTNEVYTE, E. Sources of uncertainty in long-term global scenarios of solar PV technology. **Nature climate change**, [s. l.], v. 11, p. 266-273, mar. 2021. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41558-021-00998-8>. Acesso em: 30 nov. 2023.

JOHNSON, A. **Functions in Innovation System Approaches**. Aalborg, Denmark: Nelson and Winter Conference, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Anna-Bergek/publication/253725869_Functions_in_Innovation_System_Approaches/links/02e7e529df43f8c3f2000000/Functions-in-Innovation-System-Approaches.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

JOHNSON, A.; JACOBSSON, S. Inducement and blocking mechanisms in the development of a new industry: the case of renewable energy technology in Sweden. In: COOMBS, R. *et al.* (ed.). **Technology and the Market**. [S. l.]: Edward Elgar Publishing, 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309281922_Inducement_and_blocking_mechanisms_in_the_development_of_a_new_industry_the_case_of_renewable_energy_technology_in_Sweden. Acesso em: 30 nov. 2023.

KAMMEN, D. M.; SUNTER, D. A. Urban Planet: city-integrated renewable energy for urban sustainability. **Science**, [s. l.], v. 352, p. 922-928, may.2016. Disponível em: <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aad9302>. Acesso em: 30 nov. 2023.

KIHLSTRÖM, V.; ELBE, J. Constructing Markets for Solar Energy - A Review of Literature about Market Barriers and Government Responses. **Sustainability**, [s.

[.], v. 13, n. 6, p. 3273, mar. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/6/3273>. Acesso em: 30 nov. 2023.

KRIECHBAUM, M.; BRENT, A. C.; POSCH, A. Interaction patterns of systemic problems in distributed energy technology diffusion: a case study of photovoltaics in the Western Cape province of South Africa. **Technology Analysis & Strategic Management**, [s. l.], v. 30, n. 12, p. 1422-1436, dez. 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09537325.2018.1473851>. Acesso em: 30 nov. 2023.

KUBLI, M.; LOOCK, M.; WÜSTENHAGEN, R. The flexible prosumer: Measuring the willingness to co-create distributed flexibility. **Energy Policy**, [s. l.], v. 114, p. 540-548, mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421517308704>. Acesso em: 30 nov. 2023.

LILLIESTAM, J. *et al.* The near- to mid-term outlook for concentrating solar power: mostly cloudy, chance of sun. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 23-41, jan. 2021. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567249.2020.1773580>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MARKARD, J.; RAVEN, R.; TRUFFER, B. Sustainability transitions: an emerging field of research and its prospects. **Research Policy**, [s. l.], v. 41, p. 955-967, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241756772_Sustainability_transitions_An_emerging_field_of_research_and_its_prospects. Acesso em: 30 nov. 2023.

MARKARD, J.; TRUFFER, B. Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework. **Research Policy**, [s. l.], v. 37, n. 4, p. 596-615, maio 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048733308000164>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MARTINS, V. A.; BRANCO, D. A. C.; HALLACK, M. C. M. Economic Effects of Micro- and Mini-Distributed Photovoltaic Generation for the Brazilian Distribution System. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 737, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/737>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MATSUO, T. Fostering grid-connected solar energy in emerging markets: The role of learning spillovers. **Energy Research & Social Science**, [s. l.], v. 57, p. 101-227, nov. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629618305954>. Acesso em: 30 nov. 2023.

MENDES, L. F. R.; STHIEL, M. S.; LIMA, M. A. O crescimento da geração distribuída no contexto da crise hidroenergética na região Sudeste do Brasil: aspectos ambientais e socioeconômicos. **Revista Vértices**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 626-647, nov. 2020. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/15482>. Acesso em: 30 nov. 2023.

NOLAN, C. *et al.* Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change. **Science**, [s. l.], v. 361, p. 920-923, ago. 2018. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aan5360>. Acesso em: 30 nov. 2023.

NOURI, A. *et al.* Identification of Gaps and Barriers in Regulations, Standards, and Network Codes to Energy Citizen Participation in the Energy Transition. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 856, jan. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/856>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ONDRACZEK, J.; KOMENDANTOVA, N.; PATT, A. WACC the dog: the effect of financing costs on the levelized cost of solar PV power. **Renewable Energy**, Zürich, v. 75, p. 888-898, nov. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148114006806>. Acesso em: 30 nov. 2023.

PERGER, T. *et al.* PV sharing in local communities: Peer-to-peer trading under consideration of the prosumers' willingness-to-pay. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 66, p. 102634, mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670720308519>. Acesso em: 30 nov. 2023.

PORTER, M. E. Clusters and Competition. New agendas for companies, governments, and institutions. In: PORTER, M. E. (ed.). **On Competition**. Boston: Harvard Business School Press, 1998. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=2cbe5b01c61edee8dc7cd97fdeb8b7bf9ed3a117>. Acesso em: 30 nov. 2023.

PORTER, M. E. **Competitive Advantage**. New York: The Free Press, 1985.

ROGERS, E. M. **Diffusion of Innovations**. 5. ed. New York: The Free Press, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257624104_Diffusion_of_Innovations_5th_edition_Everett_M_Rogers_Free_Press_New_York_NY_2003_551_pages. Acesso em: 30 nov. 2023.

SANTOS, A. Q. O. *et al.* Electricity Market in Brazil: A Critical Review on the Ongoing Reform. **Energies**, [s. l.], v. 14, n. 10, p. 2873, maio 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/10/2873>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SCHMIDT, T. S. Low-carbon investment risks and de-risking. **Nat. Clim. Change**, London, v. 4, p. 237-239, abr. 2014. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nclimate2112>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SHEN, H. *et al.* Carbon-Free Energy and Sustainable Environment: The Role of Human Capital and Technological Revolutions in Attaining SDGs. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 2636, mar. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2636>. Acesso em: 30 nov. 2023.

STEFFEN, B. *et al.* Opening new markets for clean energy: The role of project developers in the global diffusion of renewable energy technologies. **Business and Politics**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 553-587, dez. 2018. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/business-and-politics/article/opening->

new-markets-for-clean-energy-the-role-of-project-developers-in-the-global-diffusion-of-renewable-energy-technologies/D471A68ECF2F5A6B8812457D68848AE. Acesso em: 30 nov. 2023.

STRBAC, G.; MUTALE, J.; BOPP, T. **BusMod EU Project Deliverable D1.2: Analysis of Distributed Generation Business Characteristics**. [S. l.: s. n.], 2002. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228343019_Business_models_for_distributed_generation_in_a_liberalized_market_environment. Acesso em: 30 nov. 2023.

TAN, Z. **Air Pollution and Greenhouse Gases**. Waterloo, ON, Canada: Springer, 2014. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang_en%7Clang_pt&id=XfEsBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=TAN,+Z.+Air+Pollution+and+Greenhouse+Gases.+Waterloo,+ON,+Canada:+Springer,+2014.&ots=sjpsrc3Mml&sig=EbGzVRbmyVmjeJlbC5EDKZM5jA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 30 nov. 2023.

TAPSCOTT, D.; TICOLL, D.; LOWY, A. **Digital Capital** - Harnessing the Power of Business Webs. London: Nicholas Brealy Publishing, 2000. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/fullHtml/10.1145/336228.336231>. Acesso em: 30 nov. 2023.

VAN DER HEIJDEN, K. **Scenarios: The Art of Strategic Conversation**. New York: John Wiley & Sons, 1996. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/47562150_Scenarios_The_Art_of_Strategic_Conversation_K_van_der_Heijden. Acesso em: 30 nov. 2023.

VAN DER LOOS, A. *et al.* The co-evolution of innovation systems and context: Offshore wind in Norway and the Netherlands. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 138, p. 110513, mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032120307991>. Acesso em: 30 nov. 2023.

WAISSBEIN, O. *et al.* **Derisking Renewable Energy Investment** - A Framework to Support Policymakers in Selecting Public Instruments to Promote Renewable Energy Investment in Developing Countries. New York: United Nations Development Programme, 2013. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/22090458>. Acesso em: 30 nov. 2023.

ZIMMERMAN, M. A.; ZEITZ, G. J. F. Beyond survival: Achieving new venture growth by building legitimacy. **Academy of Management Review**, [s. l.], v. 27, p. 414-431, jul. 2002. Disponível em: <https://journals.aom.org/doi/abs/10.5465/AMR.2002.7389921>. Acesso em: 30 nov. 2023.

Recebido: 19/03/2024

Aprovado: 19/11/2024

DOI: 10.3895/rts.v20n62.17869

Como citar:

SILVA JUNIOR, Alcides Pereira da; NASCIMENTO, Décio Estevão do; ZUBA, Márcio Eduardo. Levantamento de indicadores para avaliação de desempenho da geração individual de energia elétrica fotovoltaica. **Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 20, n. 62, p. 275-297, out./dez., 2024. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/17869>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

