

Difusão da inovação tecnológica: um estudo sobre a difusão da energia elétrica fotovoltaica no Brasil

Diffusion of technological innovation: a study on the diffusion of photovoltaic electricity in Brazil

Difusión de la innovación tecnológica: un estudio sobre la difusión de la energía eléctrica fotovoltaica en Brasil

Diffusion de l'innovation technologique : étude sur la diffusion de l'électricité photovoltaïque au Brésil

Fernando Rodrigues da

Silva 

fesuvi@gmail.com

Centro Universitário das
Faculdades Metropolitanas
Unidas - FMU

Orlando Roque da Silva 

orlandoroque@uol.com.br

Universidade Metodista de
Piracicaba - UNIMEP

Fonttamara Leite Lima 

mara.limaferreira@gmail.com

Centro Universitário das
Faculdades Metropolitanas
Unidas - FMU

Wellington Fernando

Bastos 

wfernando.rp@gmail.com

Centro Universitário das
Faculdades Metropolitana -
FMU

Resumo

O Brasil possui, devido às características de seu território e clima, um grande potencial para a geração de energia elétrica fotovoltaica. Quando comparado a países líderes na utilização desse tipo de tecnologia, como a Alemanha, o Japão e a Itália, o Brasil apresenta um potencial superior, com suas regiões menos favorecidas em termos de incidência de radiação solar apresentando os mesmos níveis das regiões de maior incidência daqueles países. Apesar dessas características, a difusão da tecnologia de geração de energia elétrica fotovoltaica distribuída ainda não ocorre de forma significativa no País. O presente artigo tem por objetivo analisar o atual estágio de difusão da geração de energia elétrica fotovoltaica distribuída no Brasil, identificando suas características e os fatores que a têm determinado. O método empregado para se chegar a esse objetivo foi o estudo da legislação brasileira que regula o setor, a análise dos dados relativos às unidades geradoras registradas na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e estudos de correlação desses dados com informações sociodemográficas e solarimétricas.

Palavras-chave: Inovação. Difusão. Energia fotovoltaica.

Abstract

Brazil has immense potential for photovoltaic energy, due to the characteristics of its territory and climate. When compared to leading countries in the use of this type of technology, such as Germany, Japan, and Italy, Brazil has a superior potential, with its less favored regions in terms of the incidence of solar radiation presenting the same radiation levels of the best regions of those countries. Despite these characteristics, diffusion of photovoltaic energy technology still doesn't happen significantly in Brazil. The objective of the present study is to analyze the current stage of the distributed photovoltaic energy generation diffusion in Brazil, identifying its characteristics and the main factors that have determined it. The method used to achieve this objective is the study of the Brazilian legislation regarding this sector, the analysis of the data related to the generating units registered in the National Electric Energy Agency (ANEEL), and correlations studies between this data and sociodemographic and solarimetric information.

Keywords: Innovation. Diffusion. Photovoltaic energy.

Resumen

El Brasil posee, gracias a las características de su territorio y clima, un gran potencial para la generación de energía eléctrica fotovoltaica. Cuando comparado con países líderes en

a utilização de este tipo de tecnologia, como Alemanha, Japón e Itália, el Brasil presenta un potencial superior, con sus regiones menos favorecidas en términos de incidencia de radiación solar presentando los mismos niveles de regiones de mayor incidencia de aquellos países. A pesar de estas características, la difusión de la tecnología de generación de energía eléctrica fotovoltaica repartida todavía no ocurre de forma significativa en Brasil. Este trabajo tiene el objetivo de analizar la fase actual de difusión de la generación de energía eléctrica fotovoltaica repartida en Brasil, identificando sus características y los factores que la tiene determinado. El método empleado para llegar a este objetivo fue el estudio de la legislación brasileña que regula el sector, el análisis de los datos relativos a las unidades generadoras registradas en la Agencia Nacional de Energía (ANEEL), y estudios de correlación de estos datos con informaciones socio-demográficas y solarimétricas.

Palabras-clave: Innovación. Difusión. Energía fotovoltaica.

Résumé

En raison des caractéristiques de son territoire et de son climat, le Brésil dispose d'un potentiel important pour la production d'énergie photovoltaïque. Comparé aux pays leaders dans l'utilisation de cette technologie, tels que l'Allemagne, le Japon et l'Italie, le Brésil a un potentiel plus élevé, parce que, même des régions moins favorisées en termes d'incidence du rayonnement solaire, ont les mêmes niveaux que les régions où l'incidence est plus élevée dans ces pays-là. Malgré ces caractéristiques, la diffusion de la technologie de production d'énergie photovoltaïque distribuée n'est pas encore produite de manière significative au Brésil. Cet article vise à analyser le stade de diffusion actuel de la production photovoltaïque distribuée au Brésil, en identifiant ses caractéristiques et les facteurs qui l'ont déterminée. La méthode utilisée pour atteindre cet objectif a été l'étude de la législation brésilienne qui régit le secteur, l'analyse des données relatives aux groupes électrogènes enregistrés auprès de l'Agence nationale de l'énergie électrique (ANEEL) et les études de corrélation de ces données avec les données sociale-démographiques et solarimétric.

Mots-clés: innovation. Diffusion. Électricité photovoltaïque.

1 Introdução

A busca por fontes renováveis de energia tem sido uma preocupação constante dos governos de diversos países. Com o crescimento da população mundial, que, segundo estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU), passará dos atuais 7,3 bilhões de pessoas para 8,5 bilhões de pessoas em 2030 (ONU, 2018), a busca por novas formas de se suprir a demanda energética em nível global se torna premente. Uma parcela importante da população mundial ainda não conta com a disponibilidade de energia elétrica em seu dia a dia. Segundo o *The World Bank Group* (2018), em 2014, mais de 14% da população mundial não tinha acesso à eletricidade.

Por outro lado, existe a preocupação com a atual utilização de fontes de energia baseadas na queima de combustíveis fósseis, com consequente liberação de gases de efeito estufa na atmosfera. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), “gases de efeito estufa (GEE) resultantes da provisão de serviços de energia têm contribuído significativamente para o incremento histórico das concentrações de GEE na atmosfera” (IPCC, 2012, p.7). Ainda segundo o IPCC (2012), a maior parte do aumento observado na temperatura média global é provavelmente causado pelo crescimento das concentrações de gases de efeito estufa.

O Brasil possui uma parcela significativa de sua produção de energia elétrica baseada em fontes renováveis, sendo a geração por meio de usinas hidrelétricas responsável por 65,8% de toda a produção do país no ano de 2016 (BRASIL, 2017). Essa concentração em um único tipo de fonte de energia, mais especificamente em fontes hidrelétricas, traz, por outro lado, uma dependência do regime de chuvas para garantir o abastecimento de energia. Por essa razão, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o planejamento do

sistema elétrico brasileiro prevê a diversificação da matriz elétrica, a fim de se aumentar a segurança no abastecimento (ANEEL, 2008).

Países como a Alemanha e a Itália têm se destacado na difusão dessa tecnologia, utilizando incentivos governamentais para proporcionar uma expansão mais acelerada da adoção desse tipo de tecnologia pelos proprietários de imóveis residenciais, comerciais e industriais. A legislação alemã que versa sobre esse tema, e os incentivos estabelecidos nela para os cidadãos que adotam as fontes alternativas de energia, têm se mostrado eficientes em proporcionar crescimento para esse tipo de produção energética naquele país. Em 1990, as fontes renováveis de energia respondiam por 3,4% de toda energia consumida na Alemanha, sendo que, no ano de 2013, esse valor havia subido para 25,4%, com a energia solar suprimindo 5% de todo o consumo do país (BARAN, 2015).

A geração de energia elétrica a partir da utilização da luz solar apresenta grandes benefícios ambientais e em termos de segurança energética, uma vez que os dispositivos utilizados para esse fim são de simples aplicação, não geram ruídos nem tampouco emitem elementos poluentes durante sua operação. Esses dispositivos são escaláveis, podendo ser empregados em aplicações pequenas ou grandes, e podem ser mantidos em funcionamento com baixa necessidade de manutenção e com durabilidade de até 25 anos, considerando a tecnologia atualmente disponível (CENGIZ; MAMIS, 2015).

Segundo o Ministério das Minas e Energia, o potencial brasileiro de energia fotovoltaica é 2,3 vezes maior do que o consumo das residências de todo o país (BRASIL, 2014). No entanto, apesar desse potencial, a difusão desse tipo de tecnologia ainda não ocorre de forma significativa no Brasil. De toda a capacidade instalada de geração de energia elétrica, que foi de 150.338 MW em 2016, apenas 24 MW, ou 0,016%, correspondiam a fontes fotovoltaicas (BRASIL, 2017).

Os estudos feitos pelos pesquisadores brasileiros têm, no entanto, focado principalmente em análises de viabilidade locais, enfatizando características climáticas de cada estado ou região, com pouca discussão acerca das boas práticas vivenciadas por outras nações e suas possíveis aplicações em território nacional. Carvalho, Abreu e Neto (2017) desenvolveram estudo no qual abordam a viabilidade financeira de implantação de geradores fotovoltaicos residenciais para consumidores já abastecidos pela energia distribuída pela companhia estatal que tem essa incumbência na atualidade.

Frente à relevância do tema apresentado e ao atual estágio de crescimento exponencial da implantação da tecnologia de geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil, apresenta-se o seguinte problema de pesquisa: como a difusão da tecnologia de micro e mini geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil tem sido influenciada por fatores relacionados a questões geográficas e sociodemográficas?

2 Método de pesquisa

O presente estudo tem natureza quantitativa e caráter exploratório, visando ao entendimento do processo de difusão da tecnologia de geração de energia elétrica fotovoltaica no Brasil. O desenvolvimento desse estudo foi feito a partir da análise dos dados referentes às unidades geradoras fotovoltaicas registradas na base de dados da ANEEL, e com o cruzamento desses com dados geográficos e sociodemográficos dos estados brasileiros e do Distrito Federal. O objetivo desta pesquisa é analisar a difusão da geração distribuída de energia fotovoltaica no território brasileiro a partir dos dados fornecidos pela ANEEL em suas dimensões residencial, comercial, industrial, rural, iluminação pública, serviço público e poder público.

3 Referencial teórico

3.1 Painéis fotovoltaicos

Os painéis fotovoltaicos utilizados para a produção de energia elétrica são formados por grupos de células fotovoltaicas eletricamente interligadas, de modo a somar as tensões geradas por cada uma delas. O

silício é um dos materiais mais utilizados na construção de células solares e deve, necessariamente, conter um alto grau de pureza, o que torna necessários processos sofisticados de refino.

Os principais elementos que são encontrados como impurezas no silício são o ferro, o alumínio, o magnésio e o cálcio. Os níveis mais altos de purificação do silício utilizados em dispositivos semicondutores resultam em materiais com, aproximadamente, uma parte por bilhão de contaminação (GEVORKIAN, 2008). Atualmente, três diferentes tipos de tecnologia são empregados na construção de painéis fotovoltaicos: o silício monocristalino, o silício policristalino e o silício amorfo de filme fino. Essas tecnologias apresentam diferenças entre si no que diz respeito à sua eficiência, resultando em células que produzem quantidades diferentes de energia a partir de uma mesma quantidade de luz solar recebida. Segundo Cengiz e Mamis (2015), os painéis construídos a partir de silício cristalino apresentam eficiência da ordem de 20%, enquanto os painéis nos quais é empregada a tecnologia do silício amorfo apresentam eficiência de, aproximadamente, 10%.

Os processos de fabricação também são distintos nas três tecnologias, o que afeta diretamente o custo final de cada uma delas e, conseqüentemente, o custo da energia produzida pelos painéis. Segundo a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), as duas primeiras tecnologias são as que mais comumente são encontradas nos painéis comercialmente disponíveis na atualidade, sendo que, em geral, o silício policristalino é ligeiramente menos eficiente que a versão monocristalina, sendo também de obtenção mais barata que esta última (IRENA, 2017). Segundo Cengiz e Mamis (2015), as células fotovoltaicas feitas à base de silício mono ou policristalino representam entre 85% e 90% do mercado de painéis solares.

Os painéis solares fabricados a partir de silício cristalino são constituídos de diversas células fotovoltaicas interligadas eletricamente e encapsuladas em camadas de material transparente, como o vidro, na parte frontal, e materiais reflexivos na parte traseira, a fim de aumentar sua eficiência (IRENA, 2017). Os painéis que utilizam a tecnologia de silício amorfo de filme fino, por sua vez, são obtidos por meio da aplicação do material sobre camadas finas de um substrato de baixo custo, que pode ser rígido ou flexível, dependendo do tipo de utilização final do produto.

3.2 Sistemas conectados à rede e sistemas autônomos

Os painéis fotovoltaicos podem atuar basicamente de duas maneiras, no que diz respeito à forma como são conectados: isolados ou autônomos, e conectados à rede (PINHO; GALDINO, 2014). No modelo autônomo, ou *off-grid*, o sistema não é conectado à rede de distribuição de energia elétrica das empresas concessionárias. Normalmente, esse tipo de configuração conta com uma forma de armazenamento de energia, a fim de suprir o fornecimento nos momentos em que o painel não estiver recebendo luz solar suficiente para a produção, como à noite (PINHO; GALDINO, 2014). Os dispositivos de armazenamento mais comumente utilizados na atualidade são as baterias, porém outras formas têm sido desenvolvidas, como os supercapacitores.

Na configuração autônoma, os sistemas normalmente contam com dispositivos para controle de carga e descarga das baterias, a fim de evitar danos a elas (LOPES, 2012), além de equipamentos inversores, que têm a finalidade de transformar a corrente contínua produzida pelos painéis fotovoltaicos em corrente alternada, que é normalmente necessária para o funcionamento da maior parte dos equipamentos elétricos existentes.

A segunda forma de atuação dos painéis fotovoltaicos é aquela em que esses equipamentos são conectados à rede de transmissão de energia elétrica de uma empresa concessionária. Essa configuração é normalmente conhecida pelos termos em inglês *on-grid* ou *grid-connected*. Nesse tipo de configuração, os painéis injetam na rede de distribuição da concessionária local a energia que excede a capacidade de consumo dos equipamentos ligados diretamente a ele (ANRADE JÚNIOR; MENDES, 2016).

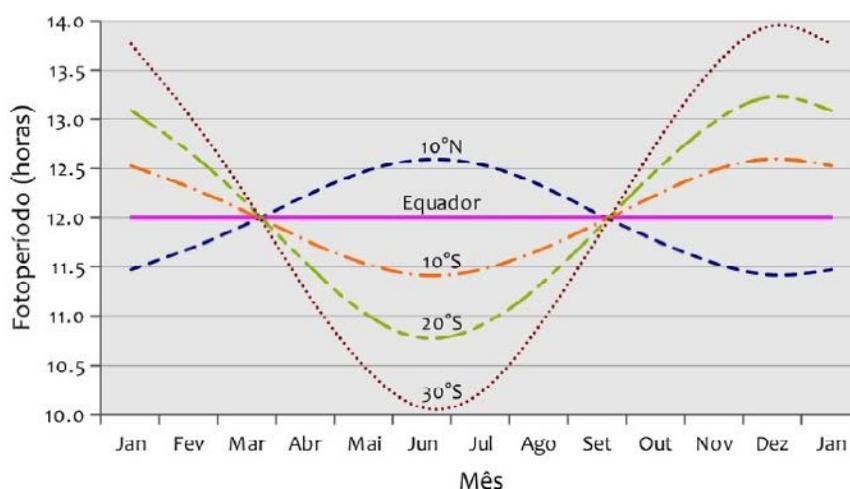
O fluxo da energia nesse tipo de configuração é, portanto, bidirecional, e o excesso de produção local pode ser aproveitado por consumidores distantes, que estejam ligados à rede de distribuição. Nesse tipo de configuração não são necessários dispositivos de armazenamento de energia, uma vez que o abastecimento é garantido pela concessionária da localidade (REIS, 2011).

3.3 Importância da localização do painel para a geração de energia

A produção de energia elétrica pelos painéis fotovoltaicos está diretamente ligada à quantidade de irradiação solar que incide sobre sua superfície, e essa radiação apresenta variações que estão relacionadas a conceitos astronômicos, como o ângulo de inclinação do eixo terrestre em relação ao plano solar e os movimentos de rotação e translação da Terra (PEREIRA, *et al.*, 2017).

A quantidade de horas diárias em que uma determinada localidade recebe luz solar recebe o nome de foto período, e varia ao longo do ano de acordo com sua latitude, sendo que, nas localidades mais próximas aos polos terrestres, essa variabilidade é mais acentuada do que nas localidades que se situam mais próximas à linha do Equador. A figura 1 mostra essa variabilidade para diferentes latitudes ao longo do ano.

Figura 1 – Variabilidade do foto período ao longo do ano para diferentes latitudes



Fonte: Pereira, *et al.* (2017)

A quantidade de energia solar que chega à superfície terrestre em uma determinada localidade está, também, relacionada às condições climáticas locais e ao ângulo de inclinação dos raios solares ao atingirem essa localidade (GEVORKIAN, 2008). Diversos processos físicos que ocorrem na atmosfera também influenciam a quantidade de energia que chega até a superfície, atenuando sua intensidade ao longo do trajeto. Entre esses processos estão os fenômenos de espalhamento da radiação, produzidos por gases e materiais em suspensão na atmosfera, e os processos de absorção da radiação pelas moléculas de ozônio, vapor de água, oxigênio e gás carbônico (PEREIRA *et al.*, 2017).

Outro fator que influencia a quantidade de radiação solar disponível em uma determinada localidade são os fenômenos meteorológicos. Segundo Pereira *et al.* (2017), os sistemas meteorológicos afetam a atenuação da radiação solar ao longo de seu trajeto pela atmosfera até a superfície terrestre ao provocarem alterações na nebulosidade e nas concentrações de gases atmosféricos e aerossóis.

3.4 A difusão dos geradores fotovoltaicos

Utilizando como base teórica os estudos sobre a difusão de inovações, Sigrin, Pless e Drury (2015) conduziram pesquisas dentre os moradores da cidade de San Diego, nos Estados Unidos, e verificaram diferenças entre aqueles que adotaram a tecnologia da energia solar em suas residências e os que não adotaram essa tecnologia. O estudo revelou que os moradores que implantaram os geradores fotovoltaicos, entre outras características, possuíam, em média, maior renda, viviam em imóveis de maior tamanho e tinham uma expectativa de permanecer nesses mesmos imóveis por mais tempo. A tabela 1 resume essas diferenças.

Sigrin, Pless e Drury (2015) verificaram também em seu estudo que os principais fatores motivadores da instalação de sistemas fotovoltaicos citados pelos entrevistados foram, em ordem decrescente de importância, a redução dos gastos com eletricidade, a proteção contra futuros aumentos nos custos de eletricidade, a preocupação com o meio ambiente, a valorização do preço do imóvel e a possibilidade de aumentar a facilidade de venda futura do imóvel.

Tabela 1: Comparação de fatores demográficos de adotantes e não adotantes da tecnologia de energia solar fotovoltaica na cidade de San Diego, Estados Unidos

Variável	Adotantes	Não adotantes
	Média	Média
Renda anual (US\$ x 1000)	164,9	114,8
Expectativa de permanência no imóvel (anos)	21,3	14,9
Tamanho do imóvel (pés quadrados)	2653	2062

Fonte: Adaptado de Sigrin, Pless e Drury (2015).

O estudo conduzido por aqueles autores identificou também que, entre os grupos de pessoas que implantaram a geração de energia fotovoltaica em suas residências nos primeiros anos da difusão dessa inovação e aqueles que adotaram essa tecnologia mais recentemente, existem diferenças no que diz respeito às motivações para essa atitude.

A tabela 2 compara as notas médias que os respondentes atribuíram para a importância relativa de alguns fatores em relação à sua decisão de adoção da tecnologia fotovoltaica. Foram classificados como adotantes iniciais aqueles que implantaram a tecnologia em suas residências entre os anos de 2007 a 2010, e como adotantes recentes aqueles que o fizeram entre os anos de 2011 a 2013. A escala utilizada continha notas entre 1 e 5, sendo 1 para a resposta “ não importante” e 5 para a resposta “muito importante”.

Tabela 2: Comparação da importância de fatores na decisão de adoção da tecnologia fotovoltaica em San Diego, Estados Unidos

Motivos	Adotante recente	Adotante inicial
	Média	Média
Redução de custos de eletricidade	4,61	4,52
Proteção contra aumentos nos preços da eletricidade	4,6	4,35
Proteção do meio ambiente	3,77	3,94
Valorização do imóvel	3,19	3,11
Facilitar a venda do imóvel	2,49	2,53

Fonte: Adaptado de Sigrin, Pless e Drury (2015).

Reeves, Rai e Margolis (2017) conduziram um estudo sobre a adoção da energia solar fotovoltaica em dois mercados diferentes, ambos localizados em um mesmo estado dos Estados Unidos. Esses dois mercados se diferenciam pelo momento em que a difusão dessa tecnologia se iniciou, sendo chamado de “mercado maduro” aquele no qual as instalações de painéis fotovoltaicos se iniciaram antes do ano de 1999, e “mercado jovem” aquele no qual essas instalações tiveram início no ano de 2004. Alguns dos aspectos estudados na pesquisa foram os eventos que deram início ao interesse por esse tipo de inovação, e os canais de comunicação que tiveram maior importância no processo de decisão para sua adoção.

Dentre os eventos mais citados como sendo aqueles que despertaram o interesse dos respondentes pela instalação da tecnologia solar fotovoltaica, estão: o aumento dos preços da energia, a aposentadoria do proprietário do imóvel e ações de marketing dos fornecedores. Quanto aos canais de comunicação percebidos como mais importantes para as pessoas que adotaram a tecnologia fotovoltaica em seus imóveis, foram citados

os profissionais instaladores de painéis fotovoltaicos, seguidos pelas fontes de informação on-line e pelas empresas locais de distribuição de energia elétrica (REEVES; RAI; MARGOLIS, 2017).

Rai e Beck (2015) analisaram as percepções do público em relação à energia solar no estado do Texas e verificaram que as preocupações com o meio ambiente não são um fator de importância significativa para a decisão pela adoção dessa tecnologia. O estudo evidenciou, também, que o custo percebido de implantação é a maior barreira para a adoção desse tipo de tecnologia, e que os respondentes, em sua maioria (84%) informaram que não conheciam os incentivos governamentais para a implantação de sistemas fotovoltaicos residenciais (RAI; BECK, 2015), apesar de esse tipo de incentivo existir e contribuir, na opinião daqueles autores, para diminuir as barreiras financeiras da adoção da energia solar.

3.5 A legislação brasileira e a energia fotovoltaica

A principal regulamentação brasileira para a geração de energia solar fotovoltaica está contida na Resolução Normativa n.º 482 da ANEEL, de 17 de abril de 2012, que visa “estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica”. A partir dessa resolução ficou regulamentada a conexão das unidades geradoras às redes de distribuição das concessionárias e a forma como a energia produzida por essas unidades pode ser injetada nessas redes de maneira a ser utilizada pelo sistema e compensada posteriormente para o produtor. Essa regulamentação viabiliza a utilização de sistemas conectados que, conforme exposto anteriormente, dispensam o uso de sistemas de armazenamento local, como os bancos de baterias, uma vez que a energia não utilizada no imóvel em um determinado momento é disponibilizada ao sistema e, inversamente, nos momentos nos quais o consumo supera a capacidade produtiva da unidade geradora, o imóvel recebe energia complementar disponibilizada pelo sistema ao consumidor.

Além da Resolução n.º 482/2012 da ANEEL, o governo brasileiro emprega outras medidas que visam a incentivar a adoção da micro e minigeração de energia e reduzir o custo para sua implantação. Uma das questões envolvidas nesse contexto é a cobrança do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), de responsabilidade dos estados, sobre a energia produzida pelos micro e minigeradores. O Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) definiu, inicialmente, por meio do Convênio ICMS 06, de 5 de abril de 2013, que o ICMS deveria incidir sobre a totalidade da energia fornecida para a unidade consumidora, e não somente sobre a diferença entre a energia recebida e energia excedente injetada na rede. Uma vez que essa forma de tarifação reduz a atratividade da geração distribuída, o mesmo Confaz aprovou, em 2016, o Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015, que estabelece:

Isenção do ICMS incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora com os créditos de energia ativa originados na própria unidade consumidora no mesmo mês, em meses anteriores ou em outra unidade consumidora do mesmo titular, nos termos do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, estabelecido pela Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (CONFAZ, 2015, p.1).

Outra medida do governo no sentido de incentivar a adoção da micro e minigeração distribuídas foi a aprovação da Lei n.º 13.169, de 6 de outubro de 2015, que estabelece que, para esse tipo de tecnologia, a incidência das taxas referentes ao Programa de Integração Social (PIS) e à Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (Cofins) ocorrerá apenas sobre a diferença entre a energia consumida pela unidade e a energia injetada na rede por ela, da mesma maneira que ocorre com o ICMS, a partir do Convênio ICMS 16/2015.

4 Resultados obtidos

A base de dados utilizada continha um total de 42.018 registros de unidades geradoras conectadas às redes de distribuição de energia elétrica das empresas concessionárias de todo o Brasil. Essas unidades

geradoras somavam 517.687,22 kW de potência instalada, englobando todos os tipos de fontes utilizadas atualmente para essa finalidade, a saber: hidráulica, eólica, fotovoltaica e termelétrica. A tabela 3 mostra as quantidades existentes de cada um desses tipos de fonte no parque total de geração distribuída do Brasil, bem como a potência total instalada de cada uma delas.

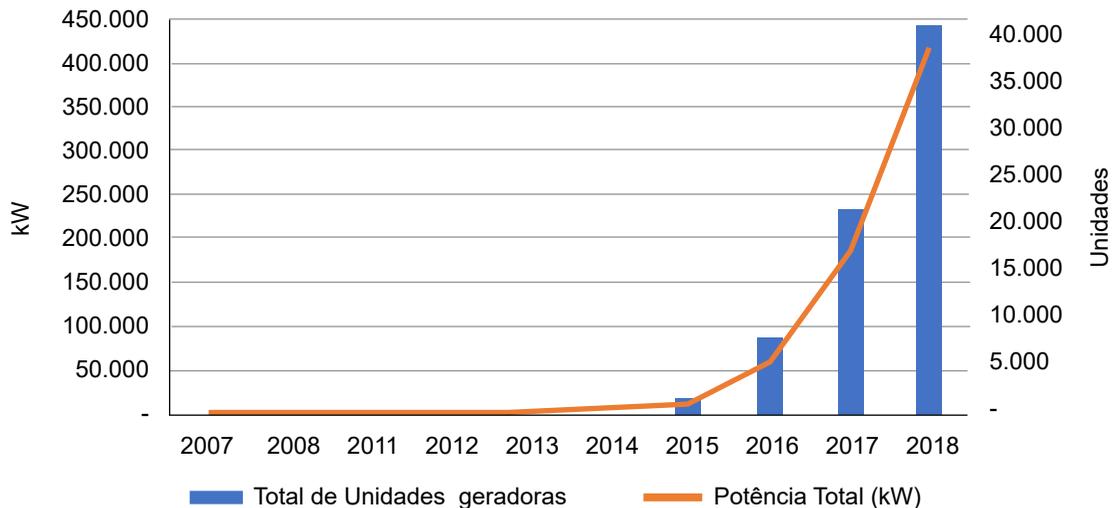
Tabela 3 – Geração distribuída no Brasil: unidades geradoras por tipo de fonte

Tipo de fonte	Unidades geradoras	Potência instalada (kW)
Hidráulica	58	52.079,08
Eólica	57	10.314,40
Fotovoltaica	41.782	420.036,62
Termelétrica	121	35.257,12
Total Geral	42.018	517.687,22

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da Aneel (2018).

A fonte fotovoltaica, objeto do presente estudo, representa a fonte com maior participação dentre todas as utilizadas para a geração distribuída no Brasil, correspondendo, na base consultada, a 99,4% das unidades geradoras ativas e a 81,14% da potência total instalada. A figura 2 mostra a evolução no número de unidades geradoras ativas ao longo dos anos.

Figura 2 – Evolução do número de unidades geradoras e potência total instalada



Fonte: Elaborado pelos autores a partir de dados da Aneel (2018).

Entre as quatro modalidades de consumo previstas na regulamentação da Aneel para geração distribuída (a saber: autoconsumo remoto, geração compartilhada, geração da própria unidade consumidora, e múltiplas unidades consumidoras), a maior parte das unidades geradoras fotovoltaicas se enquadra na categoria geração na própria unidade consumidora, representando essa modalidade 78,90% do total da potência instalada. A tabela 4 mostra a distribuição percentual das quatro modalidades existentes em relação aos valores de potência total instalada.

Tabela 4 – Unidades geradoras por modalidade

Modalidade	Quantidade de geradores	Potência instalada (kW)	Participação percentual
Autoconsumo remoto	4.628	83.642,57	19,91%
Geração compartilhada	164	4.431,51	1,06%
Geração na própria UC	36.964	331.404,57	78,90%
Múltiplas UC	26	557,97	0,13%
Total geral	41.782	420.036,62	100,00%

Fonte: Elaborados pelos autores a partir de dados da Aneel (2018).

No que diz respeito à potência dos geradores fotovoltaicos de geração distribuída ativos no Brasil, verifica-se que os sistemas de menor capacidade representam a maior parte do parque instalado, sendo que 64,98% do total têm potência de até 5kW. Esse resultado está em linha com a verificação de que a maior parte dos sistemas (76,24%) se enquadra na classe residencial, classe que, por sua natureza, demanda potências menores do que as necessárias para os sistemas industriais ou comerciais.

A fim de se verificar a existência de fatores que estejam influenciando a adoção de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída no Brasil, elaboraram-se estudos de correlação entre esses possíveis fatores e a potência total desse tipo de geração existente atualmente em cada unidade federativa do Brasil, ponderada pela respectiva população.

A análise de regressão linear considerou como variável independente o nível de radiação solar global diária média mensal, e como variável dependente a potência total ponderada em cada unidade federativa. Foram considerados, nessa análise, os valores de radiação predominantes em cada unidade da federação. A fim de se unificar as unidades de medida utilizadas nesse cálculo com as demais unidades utilizadas nesse trabalho, foram convertidos os valores apresentados originalmente em MJ/m²/dia para kW/m²/dia.

A partir dos dados da radiação solar global diária média anual e potência ponderada efetuou-se a análise de correlação por meio da análise de regressão linear simples. O resultado sugere não existir uma correlação entre as duas variáveis, uma vez que um aumento no valor da radiação solar nas unidades federativas não corresponde a um aumento proporcional no valor das respectivas potências ponderadas instaladas. O valor do coeficiente de correlação (*r*), calculado por meio da planilha eletrônica Excel para esse par de variáveis, é igual a 0,2218, o que reforça essa verificação.

A renda média da população de uma determinada região exerce influência sobre a adoção da tecnologia de geração fotovoltaica distribuída no Brasil, de forma análoga à que o estudo de Sigrin, Pless e Drury (2015) verificou que ocorre nas localidades pesquisadas nos Estados Unidos, elaborou-se o estudo de correlação entre essas duas variáveis.

5 Considerações finais

O presente artigo buscou responder à seguinte pergunta: como a difusão da tecnologia de micro e minigeração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil tem sido influenciada por fatores relacionados a questões geográficas e sociodemográficas?

Foram analisados diversos aspectos do panorama atual da difusão dessa tecnologia no Brasil, utilizando-se, para tanto, do estudo dos dados disponibilizados pela Aneel, que englobam a totalidade das unidades geradoras conectadas às redes de distribuição de energia elétrica em todo o território nacional. Essa análise descritiva permitiu verificar que a difusão dessa tecnologia ganhou grande força após a promulgação da Resolução Normativa n.º 482, de 2012, e de sua posterior modificação por meio da Resoluções Normativa n.º 687, de 2015, que regulamentaram a conexão dos micro e minigeradores às redes de distribuição de energia elétrica,

e devido ao sistema de compensação de energia elétrica, que possibilita o acúmulo de créditos referentes à energia produzida por esses equipamentos e injetada nessas mesmas redes. Verificou-se também, por meio dessa análise, que o número de unidades geradoras apresenta um crescimento exponencial nos últimos anos, em todas as unidades federativas do Brasil, e que as classes de consumo residencial e comercial lideram essa expansão, com maior parte dos geradores enquadrados na classe residencial, enquanto a maior potência total instalada está compreendida na classe comercial.

No que diz respeito ao aproveitamento das maiores potencialidades naturais do território nacional para esse tipo de tecnologia, condição estabelecida na premissa número um do presente trabalho, verificou-se que elas não estão sendo necessariamente utilizadas como critério de escolha para a implantação dos sistemas geradores fotovoltaicos, uma vez que a maior concentração desses sistemas ocorre em regiões que não correspondem àquelas com maior incidência de irradiação solar.

Pôde-se verificar também, pelos resultados obtidos, que existe uma correlação positiva entre a renda média *per capita* das diferentes regiões do país e o nível de adoção da tecnologia de geração fotovoltaica em cada uma dessas mesmas regiões, condição adotada na premissa de trabalho número dois. Ainda que não seja perfeita, essa correlação demonstra que esse fator explica, em parte, a concentração do número de geradores em determinadas unidades federativas brasileiras.

A análise de regressão linear simples elaborada no presente estudo não sugere existir evidências de influência do custo médio da energia fornecida pelas diversas distribuidoras existentes no Brasil sobre o número de sistemas fotovoltaicos implantados nas respectivas áreas de concessão dessas empresas, condição adotada na premissa de trabalho número três.

Por outro lado, os resultados do presente estudo sugerem que o IDH de cada uma das regiões do Brasil pode ser visto como fator de influência para a difusão da energia fotovoltaica no território nacional, conforme estabelecido na premissa de trabalho número quatro, tendo sido verificada uma correlação positiva entre essas duas variáveis.

Tanto no caso do IDH quanto da renda média *per capita*, os coeficientes de correlação encontrados não demonstram um forte relacionamento dessas variáveis independentes com a variável dependente, que é a potência ponderada instalada em cada unidade federativa, motivo pelo qual se pode considerar que esses fatores são suficientes para explicar parcialmente as variações dessa última.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa 482**, 17 abril 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 26 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa 687**, 24 novembro 2015. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 19 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa 786**, 17 out. 2017. Disponível em http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/19379802/do1-2017-10-27-resolucao-normativa-n-786-de-17-de-outubro-de-2017--19379762. Acesso em: 19 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatórios de consumo e receita de distribuição**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/relatorios-de-consumo-e-receita>. Acesso em: 26 maio 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Unidades consumidoras com geração distribuída**. 2018. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Foutorgas%2Fgeracao%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_mJhnKli7qc. Acesso em: 19 maio 2018.

- BARAN, B. Support for renewable energy in Germany as an example of effective public policy. **Oeconomia Copernicana**, Torun, v. 6, n. 2, p. 143-158, maio 2015.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Nota Técnica DEA 19/14**. Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 2014.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017** – ano base 2016. Brasília: Ministério das Minas e Energia, 2017.
- CARVALHO, F. I. A. D.; ABREU, M. C. S. D.; CORREIA NETO, J. F. Financial alternatives to enable distributed microgeneration projects with photovoltaic solar power. **Revista de Administração Mackenzie**, São Paulo, v. 18, p. 120-147, jan./fev. 2017. (verificar entrada da citação)
- CENGIZ, M. S.; MAMIS, M. S. Price-efficiency relationship for photovoltaic systems on a global basis. **International Journal of Photoenergy**, Egito, ID 256101, p. [1-2], 2015.
- CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA. **Convênio ICMS 16/2015**. 2015. Disponível em: https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/CV016_15. Acesso em: 26 nov. 2018.
- GEVORKIAN, P. **Solar power in building design**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Renewable energy sources and climate change mitigation**. Nova Iorque: IPCC, 2012.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Boosting solar pv markets: the role of quality infrastructure**. (IRENA). Abu Dhabi: IRENA, 2017.
- ANRADE JÚNIOR, L. M. D.; MENDES, L. F. R. Microgeração fotovoltaica conectada à rede elétrica: considerações acerca de sua difusão e implantação no Brasil. **Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 18, n. 2, p. 31-51, maio/ago. 2016. (verificar entrada da citação)
- LOPES, R. A. **Energia solar para a produção de eletricidade**. São Paulo: Artliber, 2012.
- PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar. Rio de Janeiro, 2014.
- RAI, V.; BECK, A. L. Public perceptions and information gaps in solar energy in Texas. **Environmental Research Letters**, Inglaterra, ID 074011, v. 10, n. 7, jul. 2015.
- REEVES, D. C.; RAI, V.; MARGOLIS, R. Evolution of consumer information preferences with market maturity in solar pv adoption. **Environmental Research Letters**, Inglaterra, ID 074011, v. 12, n. 7, jul. 2017.
- REIS, L. B. D. **Geração de energia elétrica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011.
- SIGRIN, B.; PLESS, J.; DRURY, E. Diffusion into new markets: evolving customer segments in the solar photovoltaics market. **Environmental Research Letters**, Inglaterra ID 084001, v. 10, n. 8, ago. 2015.
- THE WORLD BANK GROUP. **World Development Indicators**. 18 fev. 2018. Disponível em: <http://databank.worldbank.org/data/reports.aspx?source=2&series=EG.ELC.ACCS.ZS#>. (verificar entrada da citação)
- UNITED NATIONS. **Global issues - population 2018**. Disponível em: <http://www.un.org/en/sections/issues-depth/population/index.html>. Acesso em: 05 maio 2018.

Sobre os autores

Orlando Roque da Silva

Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Metodista de Piracicaba. É professor de Administração na Universidade Paulista. Coordenador e professor do Programa de Mestrado em Governança Corporativa no Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas. Foi um dos ganhadores do 59º prêmio Jabuti de melhor livro na categoria Engenharia, Tecnologia e Informática.

Fernando Silva

Mestre em Administração pelo Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas (FMU). Especialista em Mercados financeiros pela Universidade Mackenzie. Graduado em Engenharia elétrica pelo Centro Universitario da FEI.

Fonttamara Leite Lima

Mestre em Administração de Empresas pelo Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas. Professora de Marketing e Administração. Especialista em Gestão Estratégica de Negócios. Graduada em Marketing.

Wellington Fernando Bastos

Graduado em Ciência da Computação pelo Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas e Especialista pela FGV (2011). Atualmente docente na UNIP, FMU e CPS - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Banco de dados, desenvolvimento de Software para web e aplicativos mobile.

Recebido em: 04/08/2019

Aceito em: 27/09/2019