

Fatores associados à difusão de energia solar residencial no Brasil

RESUMO

Adelar Fochezatto

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
adelar@pucrs.br

Mariza Bethanya Dalla Vecchia Korzeniewicz

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
bethanyadvk@gmail.com

Isabela Mallmann Fochezatto

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil
isafoche@msn.com

O uso de energia solar está aumentando mundialmente por ser acessível, abundante e inesgotável. No Brasil houve grande aumento nos anos mais recentes. O objetivo deste estudo é analisar os fatores associados à expansão da capacidade instalada de energia solar residencial nas mesorregiões do Brasil. Considerando que o sistema de geração e uso deste tipo de energia ainda é pouco conhecido, a hipótese é que haja forte efeito de vizinhança (dependência espacial) na sua difusão. Para capturar este efeito, é usado um modelo de econometria espacial. Os resultados confirmam que, juntamente com a renda per capita e a educação, o efeito vizinhança é um fator importante na explicação da expansão da energia solar residencial de pequeno porte nas mesorregiões brasileiras. O efeito vizinhança reforça a ideia de aprendizado social (SHOVE et al., 2012). Os demais resultados revelam que a transição energética para a energia solar, embora virtuosa sob o ponto de vista ambiental, pode estar aprofundando as desigualdades sociais, principalmente pela exclusão ao acesso à nova tecnologia por inviabilidade econômica ou técnica em razão do tipo de moradia (WALKER & DAY, 2012).

PALAVRAS-CHAVE: Recursos naturais. Energia solar. Dependência espacial.

INTRODUÇÃO

O uso de energia de placas solares vem crescendo exponencialmente ao longo dos últimos anos, dentre os principais fatores de seu crescimento está o fato de ter se tornado economicamente mais acessível. Vários estudos para diferentes países destacam o alto crescimento da geração de energia solar fotovoltaica (FV). Muitos destacam o alto potencial deste tipo de energia por ela ser acessível, abundante, inesgotável e limpa. Um dos principais entraves apontados para o seu crescimento é o elevado custo das instalações. Apesar de estar diminuindo nos últimos anos, o custo das instalações tem motivado a formulação de políticas específicas, como a redução da carga tributária sobre os insumos necessários.

Dados da OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) de 2014 mostram que, nos últimos dez anos, a capacidade instalada acumulada de energia solar FV cresceu em média 49% ao ano. Este crescimento passou a ser mais acentuado a partir de 2010, principalmente na Alemanha, Itália, Estados Unidos, China, Japão e Espanha. Apesar disso, a participação do consumo deste tipo de energia no total ainda é pequena. Os destaques são Alemanha e Itália, com 5,3% e 7%, mas na Europa, como um todo, a participação é de apenas 2,6%. Em termos de projeções de longo prazo em nível mundial, a OECD projeta que a energia FV venha a representar 2% do total da geração de eletricidade em 2020, 7% em 2030 e 16% em 2050.

A literatura aponta algumas ressalvas ao uso deste tipo de energia. A primeira refere-se à cola utilizada nos equipamentos que tem em sua fórmula componentes poluentes que, em contato com a água, podem contaminá-la. A segunda refere-se ao risco de combustão, caso as placas solares sejam submetidas a temperaturas muito elevadas. A terceira ressalva é a preocupação com a reciclagem das placas, por terem uma vida útil de uso estimada em 30 anos (FTHENAKIS, 2000). Apesar dessas ressalvas, a energia solar é considerada uma energia limpa, já que não emite gases poluentes, além de possibilitar a redução da degradação ambiental e de melhorar a qualidade dos recursos hídricos. Há também benefícios socioeconômicos, pois aumenta a independência de energia regional ou nacional e acelera o processo de eletrificação de áreas rurais (TSOUTSOS, 2005).

O Brasil vem acompanhando esta tendência, tendo acelerado o ritmo de expansão no período mais recente, especialmente após 2016, considerando a potência instalada. Embora a energia solar ainda não seja o tipo de energia renovável mais consumido, vem crescendo e aumentando a sua participação na matriz energética nacional (ESPOSITO e FUCHS, 2013). Em 2017, o uso das energias renováveis solar e eólica ultrapassou o uso de energia nuclear no Brasil, de acordo com os dados da OECD (2019). Atualmente o país possui um total de 84.511 usinas instaladas gerando 1.031.118,20 kW de potência.

O objetivo deste estudo é analisar os fatores associados à expansão da capacidade instalada de energia FV de pequeno porte destinada ao consumo residencial no Brasil. A expansão deste tipo de energia pode diferir entre as regiões do país por causa de um conjunto de fatores: diferenças naturais relativas às condições climáticas, particularmente à incidência de radiação solar; diferenças socioeconômicas, como renda, educação, estruturas urbanas e políticas locais. Além destes fatores, outro fator que pode ser relevante para explicar a expansão deste tipo de energia é a dependência espacial, que se relaciona com a imitação, difusão de hábitos ou interação e compartilhamento de informações entre

vizinhos. Dado que a instalação de micro usinas residenciais é ainda uma novidade para os consumidores, a hipótese é de que haja dependência espacial, ou seja, a sua expansão ocorre de forma gravitacional no espaço geográfico. Este estudo preenche uma lacuna importante, pois não existem ainda trabalhos similares aplicados ao caso brasileiro.

A literatura relacionada ao tema destaca o alto crescimento deste tipo de energia verificado nos últimos anos, bem como a perspectiva de aumento de sua importância no futuro. O seu crescimento, no entanto, não é homogêneo entre países ou entre regiões. Estas diferenças se relacionam com fatores naturais, custos das instalações e outros fatores socioeconômicos. Entre os estudos que fazem uma revisão a respeito das motivações e barreiras para a adoção desta tecnologia em nível regional estão Balcombe *et al.* (2013); Balta-Ozkan *et al.* (2015) e Copiello & Grillenzoni (2017).

O primeiro fator para que haja energia FV é a presença de radiação solar (ZHANG *et al.*, 2011; BALCOMBE *et al.*, 2013; BALTA-OZKAN *et al.*, 2015; COPIELLO & GRILLENZONI, 2017). No Brasil, a radiação solar é abundante em todo o território nacional, com uma incidência relativamente maior em áreas das regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste.

O sistema de energia FV é produzido através da captação de potência elétrica dos raios solares pelas células fotovoltaicas existentes nas placas. Há três tipos de tecnologia de instalação deste tipo de energia: painel rígido, também conhecido por silício cristalino; filmes finos, também chamado de silício amorfo; e, por último, a célula orgânica (OPV). Os painéis fotovoltaicos de silício cristalino representam 80% do consumo mundial, podendo ser de diferentes variações de silício, seguidos pelos filmes finos, que representam quase o restante do consumo do mercado fotovoltaico (ESPOSITO & FUCHS, 2013; SILVA Jr *et al.*, 2024).

O segundo fator importante que influencia a difusão deste tipo de energia é o seu relativamente alto custo de instalação. Em vista disso, espera-se que políticas de incentivo à adoção de energia FV e a renda per capita tenham uma relação positiva com o aumento do número de instalações e com a potência instalada (ZHANG *et al.*, 2011; ZHAI & WILLIAMS, 2012; SARDIANOU & GENOUDI, 2013; SCHAFFER & BRUN, 2015; VASSEUR & KEMP, 2015). No Brasil, é uma relação inversa entre a renda per capita e a incidência de radiação solar. Com isso, é de se esperar uma relação inversa entre radiação solar e aumento do número de produtores e da potência instalada. Ao mesmo tempo, espera-se uma relação positiva com a renda per capita.

Outros dois fatores associados que influenciam a instalação de equipamentos de energia solar são a densidade populacional e o tipo de configuração urbana (SCHAFFER & BRUN, 2015; GRAZIANO & GILLINGHAM, 2015; BALTA-OZKAN *et al.*, 2015; SOMMERFELD *et al.*, 2017; BROTO, 2017). Estas duas variáveis tendem a ser correlacionadas. Por exemplo, uma maior densidade populacional tende a ser maior em cidades com alta presença de prédios e arranha-céus e isso diminui o potencial de instalação de usinas em relação a cidades menos densas, mais espalhadas e com participação relativa de casas maior. Espera-se, portanto, que a densidade demográfica seja associada negativamente com o número de usinas e com a potência instalada per capita. Os estudos de Bollinger & Gillingham (2012), Rode & Weber (2012) e Graziano & Gillingham (2014) encontraram resultados que confirmam esta hipótese. Suas descobertas indicam que centros urbanos menores

contribuem para a adoção de energia FV residencial mais do que áreas urbanas maiores.

Outros fatores socioeconômicos apontados pela literatura são os níveis educacionais da população e o grau de consciência em relação à preservação do meio ambiente e com desenvolvimento sustentável. Estes dois fatores tendem a estar positivamente associados. Além destes, a literatura aponta ainda a proporção de casas próprias (inverso de alugadas), a idade, o gênero e o estado civil do proprietário, bem como o tamanho dos arranjos familiares (SARDIANOU & GENOUDI, 2013; BALCOMBE *et al.*, 2013; BALTA-OZKAN *et al.*, 2015; SCHAFFER & BRUN, 2015; GRAZIANO & GILLINGHAM, 2015; SOMMERFELD *et al.*, 2017). Em estudo realizado para Grécia, Sardianou & Genoudi (2013) concluem que indivíduos de meia-idade e com alto grau de instrução são relativamente mais propensos a adotar fontes renováveis de energia. Concluem ainda que a renda afeta positivamente esta adoção e que o estado civil e gênero não são fatores estatisticamente significativos.

Outra motivação para a adoção de energia FV confirmada pelos estudos é o efeito de pares, que pode se dar por inspiração, difusão de hábitos, emulação comunitária ou pelo compartilhamento informal de informações entre vizinhos (SCHELLY, 2014; SHOVE *et al.*, 2012). Este tipo de efeito, na literatura da análise espacial, é conhecido por dependência espacial ou de efeitos de transbordamento espacial (ANSELIN, 1988; LeSAGE & PACE, 2009; ALMEIDA, 2012). A dependência espacial caracteriza muitos fenômenos sociais, significando que o comportamento dos agentes é afetado pelo que acontece nas áreas circunvizinhas (COPIELLO & GRILLENZONI, 2017).

Em termos teóricos, Manski (1993) identifica três tipos potenciais de efeitos de grupos no comportamento individual: endógenos, contextuais e correlacionados. No primeiro caso, o comportamento individual influencia o comportamento médio do grupo e, ao mesmo tempo, é influenciado pelo comportamento do grupo. No segundo caso, o comportamento individual pode ser influenciado por características exógenas ao seu grupo. Por fim, os indivíduos de um grupo tendem a se comportar de maneira semelhante, pois possuem características similares ou enfrentam condições políticas, institucionais ou ambientais similares (BALTA-OZKAN *et al.*, 2015).

Vários estudos confirmam a importância das instalações ocorridas nos arredores, especialmente no passado recente, sobre a adoção e difusão de energia FV residencial (RICHTER, 2013; MÜLLER & RODE, 2013; SCHAFFER & BRUN, 2015; GRAZIANO & GILLINGHAM, 2015; BALTA-OZKAN *et al.*, 2015; PALM, 2016; RODE & WEBER, 2016; DHARSHING, 2017; ZHAO *et al.*, 2017; COPIELLO & GRILLENZONI, 2017b). Bollinger & Gillingham (2012) testaram os efeitos na difusão de energia FV residencial na Califórnia, destacando dois aspectos que originam os transbordamentos sociais: a visibilidade dos painéis fotovoltaicos e a informação repassada boca a boca. Graziano & Gillingham (2015) encontram evidências de que os efeitos de transbordamentos diminuem ao longo do tempo e com a distância geográfica. Zhao *et al.* (2017) afirmam que a difusão da adoção de energia FV residencial pode ser descrita como a formação de clusters espaciais que tendem a se espalhar para as áreas circundantes. Segundo Schaffer & Brun (2015), estes efeitos acabam desempenhando um efeito maior do que a presença de radiação solar. Rode & Weber (2012), em estudo para a Alemanha, concluem que a dependência espacial é mais forte quando se usa unidades geográficas mais

desagregadas o que leva a crer que o comportamento imitativo na adoção de energia FV residencial é altamente localizado.

Além dos aspectos naturais e os relacionados ao tipo de energia, outros fatores, como a regulamentação e incentivos governamentais, explicam o alto crescimento verificado. No Brasil, os processos de regulamentação da geração e distribuição de energia solar são recentes. Em 2012, a ANEEL estabeleceu algumas regras para a geração de energia solar por particulares (mini-geração). A resolução normativa n. 482 foi o primeiro ato regulatório a permitir o sistema de compensação, onde a energia produzida por painéis fotovoltaicos instalados em telhados gera créditos que podem ser compensados, abatendo assim os custos da conta de luz. Este sistema de compensação é conhecido como *net-metering*. Ele representa o marco inicial da geração solar distribuída no Brasil. Em 2015 algumas regras foram alteradas, aumentando o limite de capacidade das unidades, reduzindo a burocracia de conexão de sistemas e criando a geração compartilhada.

Em termos de incentivos governamentais, existe uma série de isenções fiscais e condições especiais de financiamento para a produção e comercialização de equipamentos para a geração de energia solar: a) isenção de Impostos sobre Produtos Industrializados (IPI) para painéis fotovoltaicos e similares bem como para elementos acessórios, como cabos, conectores e estruturas de suporte; b) isenção de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para a comercialização de geradores fotovoltaicos (não estão incluídos os inversores e outros componentes do sistema); isenção de ICMS da energia solar injetada na rede, fazendo que as unidades produtoras e consumidoras passassem a pagar o imposto apenas sobre o consumo líquido de energia (consumida menos injetada na rede); e c) financiamento da Caixa Econômica Federal a pessoas físicas para a aquisição de equipamentos com quitação em até 240 meses com taxas de juros de mercado.

Existe ainda o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) do Ministério de Minas e Energia. O mesmo foi criado para estimular a geração distribuída no país e visa criar linhas de crédito e formas de financiamento que ajudem a ampliar a instalação destes sistemas em residências, comércio e indústrias. Além das linhas de crédito, também pretende estabelecer valores de referência para a venda de energia solar, estruturar a comercialização da energia excedente; e promover a atração de investimentos para a nacionalização de tecnologias em energias renováveis.

Este conjunto de políticas são suficientes para efetivamente promover a acessibilidade do conjunto da sociedade às novas tecnologias energéticas? Considerando o conceito de co-produção de Jasanoff (2004), a ciência, a tecnologia e a ordem social não são separadas e sim mutuamente constitutivas. Isto significa que os conhecimentos científicos e as tecnologias são moldados por valores culturais, estruturas políticas e instituições sociais. Cabe então saber qual é a ordem social no acesso à energia solar. Os resultados deste estudo, que serão analisados mais adiante, revelam que há desigualdade no acesso à energia solar: proprietários de casas se beneficiam enquanto que moradores de apartamentos e de casas populares ficam para trás. Este é um arranjo de distribuição de benefícios que é co-produzido pela tecnologia dos painéis de telhado, pelas normas urbanas e pelas estruturas econômicas existentes. Estes resultados suscitam reflexões acerca da desigualdade e justiça social (WALKER & DAY, 2012; SOVACOOOL & DWORKIN, 2015; JENKINS *et al.*, 2016).

METODOLOGIA

Sob condições específicas, o método de mínimos quadrados ordinários (MQO) é o melhor estimador linear. No entanto, a presença de dependência espacial viola algumas suposições deste estimador. Dois casos são especialmente críticos: a suposição de que não há nenhuma variável relevante omitida; e a suposição de que os erros são independentes e homocedásticos. Quando se trabalha com dados desagregados por subdivisões territoriais é comum haver dependência espacial entre as observações. Dependência espacial ocorre quando o valor de uma variável de interesse em um local específico depende do valor desta mesma variável em locais próximos. Quando isso acontece, o método de estimação não espacial não é o mais indicado, pois incorre em problema de variáveis omitidas. Esta omissão, por sua vez, pode violar a suposição de independência e homocedasticidade dos resíduos (LeSAGE & PACE, 2009; ALMEIDA, 2012; GOLGHER, 2015; ARBIA, 2014).

O primeiro passo na análise econométrica espacial é verificar se efetivamente existe dependência espacial. Para isso, em geral se observa o comportamento dos resíduos do modelo não espacial verificando se são espacialmente independentes ou se formam clusters espaciais. Para isso é preciso definir uma matriz de pesos espaciais que represente adequadamente a estrutura espacial das informações utilizadas nas estimações. Várias são as possibilidades de construção destas matrizes, usando a contiguidade geográfica (*Queen* ou *Rook*), a distância euclidiana, com diferentes funções de decaimento, ou definindo um determinado número de vizinhos mais próximos. Neste último caso, também se usa a distância euclidiana em relação aos vizinhos mais próximos (ANSELIN, 1988; LeSAGE & PACE, 2009; ALMEIDA, 2012; GOLGHER, 2015; ARBIA, 2014).

Para escolher a matriz de pesos vários tipos foram testados, tendo sido escolhida aquela com maior valor do I de Moran para a variável de interesse do estudo (Inpotenpc). A Tabela 1 mostra os valores das diferentes matrizes, sendo que a matriz de dois vizinhos mais próximos (Knn=2) foi a escolhida para este estudo.

Tabela 1. Valor do I de Moran para diferentes matrizes de pesos (variável Inpotenpc)

Matriz	<i>Queen</i>	<i>Rook</i>	Knn=1	Knn=2	Knn=3	Knn=4	dbw4	dbw7	dbw=10
Inpotenpc	0,775	0,775	0,760	0,790	0,760	0,754	0,744	0,637	0,607

Fonte: elaboração própria.

Nota: dbw4, dbw7, dbw10 indicam matrizes de distância com limites de distância euclidiana (*threshold*) de 4, 7 e 10 respectivamente; e em todos os casos, menos *Queen* e *Rook*, a função de distância usada é do tipo uniforme (1/d).

Com a matriz de pesos é possível testar formalmente a presença de dependência espacial nos resíduos da regressão não espacial. Existem quatro testes para verificar a presença de dependência espacial (LM ou multiplicadores de Lagrange), os quais indicam se existe dependência espacial e o tipo da mesma, se na variável endógena, nos resíduos ou em ambos. Além de diagnosticar a natureza da dependência espacial, estes testes indicam, também, qual o modelo mais adequado.

Para verificar a existência de dependência espacial e, em caso afirmativo, efetuar a escolha do tipo de modelo espacial, foi estimado o modelo de Mínimo Quadrados Ordinários (MQO). A Tabela 2 mostra os resultados dos testes.

Percebe-se que os testes LMerr e LMlag foram ambos significativos na versão não robusta e que apenas o teste RLMLag foi significativo na versão robusta.

Tabela 2. Testes de dependência espacial (multiplicadores de Lagrange)

Multiplicadores	Parâmetro
LMerr	17,924***
LMlag	30,622***
RLMerr	0,558
RLMLag	13,255***
SARMA	31,179***

Fonte: elaboração própria.

Nota: *, **, *** denotam significância a 10%, 5% e 1%.

Dado que a dependência espacial foi encontrada apenas na variável dependente, então o operador de defasagem espacial desta variável é adicionado ao modelo MQO clássico. Neste caso é usado o modelo SAR, que apresenta a seguinte especificação (ANSELIN, 1988; LeSAGE & PACE, 2009; ALMEIDA, 2012; GOLGHER, 2015; ARBIA, 2014):

$$Y = \rho WY + X\beta + \varepsilon \quad (1)$$

em que: WY é o operador de defasagem espacial; ρ é o parâmetro de auto correlação ou dependência espacial; X é uma matriz de variáveis explicativas; β são parâmetros estimados associados às variáveis explicativas; e ε é o termo de erro, com as propriedades tradicionais (independente e homocedástico). Neste caso o valor esperado de Y é:

$$E(Y) = (I - \rho W)^{-1}(X\beta + \varepsilon) \quad (2)$$

$$E(Y) = (I - \rho W)^{-1}(X\beta), \text{ dado que } E(\varepsilon) = 0 \quad (3)$$

Portanto, este tipo de modelo é especialmente importante porque captura os efeitos de transbordamentos, que são transmitidos no sistema via $(I - \rho W)^{-1}\beta$. No modelo não espacial este efeito não é capturado, pois o efeito de X sobre Y é dado apenas por β . Este modelo não pode ser estimado por MQO por causa das conexões entre as observações introduzidas pela matriz de pesos espaciais. O operador de defasagem espacial está correlacionado com o termo de erro (equação 2), que, desta forma, deixa de ser independente. Por isso usa-se o método de estimação por máxima verossimilhança (ANSELIN, 1988; LeSAGE & PACE, 2009; ALMEIDA, 2012; GOLGHER, 2015; ARBIA, 2014).

Neste estudo, são analisadas as pequenas usinas (menos de 10 kW de potência) cuja produção se destina ao uso na própria unidade residencial. Aplicando este filtro, foram consideradas 20.828 unidades instaladas, que em maio de 2019 totalizavam 50.845,64 kW (ANEEL, 2019). Estas informações foram consolidadas para as mesorregiões brasileiras, dado que para níveis geográficos inferiores (municípios ou microrregiões) haviam muitos valores zerados. A Tabela 3 mostra a definição das variáveis usadas, suas fontes e sinal esperado e a Tabela 4 mostra as estatísticas descritivas destas variáveis (em logaritmo natural).

Tabela 3. Variáveis utilizadas nos modelos, fonte e sinal esperado para os coeficientes.

Sigla	Descrição	Fonte	Sinal esperado
potenpc	Potência instalada em kW/população (x100.000)	ANEEL	Var. endógena
area	Área da região em Km ²	IBGE	+
dens	População da região/Área da região	IBGE	-
piibpc	Produto Interno Bruto da região/População da região	IBGE	+
educ	Indicador de Educação (x100)	FIRJAN	+
radia	Indicador de Radiação Solar	INMET	+
txurb	População urbana/População total (x100)	IBGE	+

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4. Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas nos modelos.

Variáveis	Mínimo	Mediana	Média	Máximo
Inpotenpc	0,000	2.855	2.703	5.288
Inarea	7,927	10,164	10,348	13,090
Indens	0.2922	3.6090	3.5208	7.8132
Inpiibpc	8,845	9,860	9,813	11,278
Ineduc	3.981	4.345	4.313	4.558
Inradia	2.708	2.833	2.875	3.045
Intxurb	3.529	4.160	4.143	4.570

Fonte: Elaboração própria.

Nota: a variável Inpotenpc refere-se a maio de 2019; as variáveis Inarea, Indens e Inradia referem-se ao ano de 2017; as variáveis Inpiibpc, Ineduc e Intxurb referem-se ao ano de 2016.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A Figura 1 mostra a distribuição espacial da potência instalada (Inpotenpc) nas mesorregiões brasileiras (mapa A) e da formação de clusters espaciais (mapa B). É possível observar uma maior concentração da variável nas regiões da metade sul do Brasil. O mesmo se verifica em termos de formação de clusters (manchas vermelhas). Considerando apenas a incidência de radiação solar, estes resultados não estão de acordo com o esperado.

Figura 1. Distribuição espacial e a formação de clusters da energia solar

A: Mapa de 5 intervalos iguais	B: Clusters - LISA
--------------------------------	--------------------

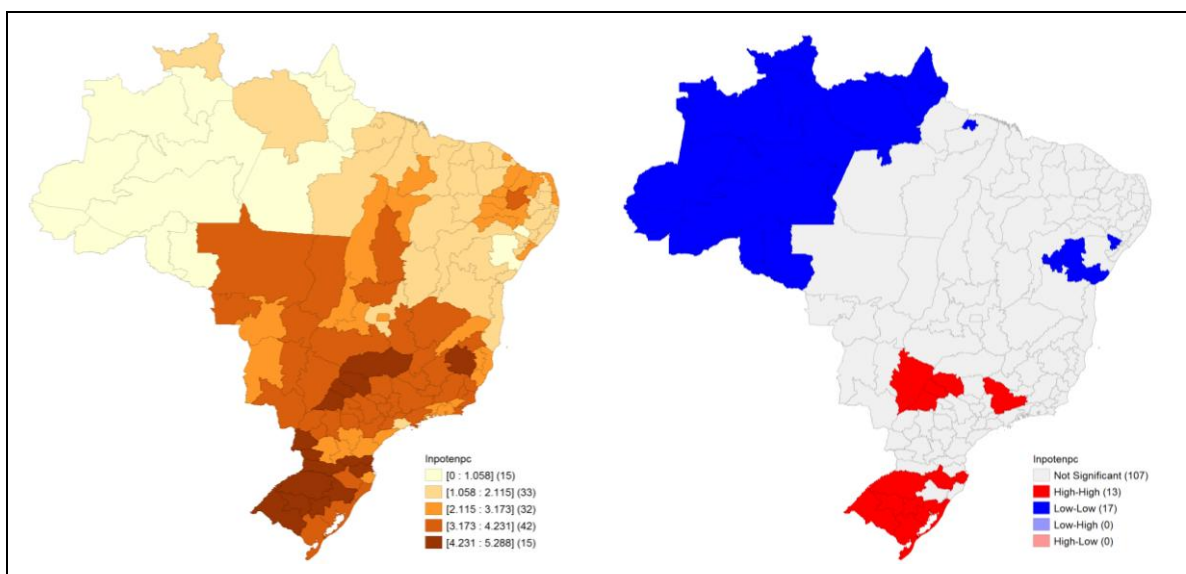


Figura 1. Distribuição espacial e a formação de clusters da energia solar residencial de pequeno porte (Inpotenpc)

Fonte: elaboração própria.

Os resultados das regressões para os modelos MQO e SAR estão na Tabela 5. O primeiro aspecto a ser observado é que há muita similaridade nos resultados dos dois modelos em relação às variáveis que se mostraram significativas e os sinais dos coeficientes das mesmas. No modelo SAR, no entanto, o ajuste aos dados é melhor já que o AIC é menor. O poder explicativo dos modelos é relativamente alto, com R^2 acima de 0,65. O *Jarque Bera Test* mostra que não foi rejeitada a hipótese nula de que os resíduos são normais e o *Breusch-Pagan test* mostra que não foi rejeitada a hipótese nula de que os resíduos são homocedásticos.

Analisando os resultados do modelo SAR, observa-se que há um forte efeito de transbordamento regional (*spillovers*) em instalações de micro usinas residenciais de energia solar. Este efeito é capturado pelo parâmetro (ρ). Desta forma confirma-se a principal hipótese do trabalho de que o processo de difusão deste tipo de energia, por ainda ser novidade, especialmente em relação a aspectos práticos de seu funcionamento, segue uma distribuição espacial não aleatória. Em outras palavras, as pessoas próximas de usinas já instaladas, por terem mais conhecimentos do seu funcionamento, tendem a ser mais propensas a usarem este tipo de energia.

Além dos *spillovers*, os resultados mostram que a renda per capita e a educação também explicam a expansão do uso de energia solar. Os resultados para a renda eram esperados, pois o custo de instalação para gerar este tipo energia continua relativamente alto, apesar de ele ter diminuído bastante nos últimos anos. A educação em geral anda na mesma direção da renda com o acréscimo, neste caso, de que ela tende a valorizar mais a questão ambiental. Ou seja, pessoas com maior nível de educação são relativamente mais propensas a adotarem práticas protetoras do meio-ambiente.

Tabela 5. Resultados dos modelos MQO e SAR (variável endógena: Inpotenpc)

const	-22,068*** (4,462)	-13,684*** (4,029)
lnarea	-0,127 (0,100)	-0,118 (0,085)
lndens	-0,041 (0,081)	-0,039 (0,068)
lnpibpc	0,585*** (0,176)	0,405*** (0,152)
lneduc	6,324*** (0,710)	4,032*** (0,719)
lnradia	-0,837 (0,888)	-0,531 (0,759)
Intxurb	-1,056** (0,458)	-0,751* (0,389)
Rho (ρ)		0,379*** (0,067)
Akaike info criterion (AIC)	309,77	281,44
Jarque Bera Test	1,3262	0,38073
Breusch-Pagan test	2,9088	1,6887
R ²	0,682	0,665
N	137	137

Fonte: elaboração própria.

Nota: *, **, *** denotam significância a 10%, 5% e 1%; erro padrão entre parênteses; e ausência de multicolinearidade (VIF < 5).

Os resultados para a taxa de urbanização foram na direção oposta da esperada inicialmente. Esperava-se um efeito positivo, com a justificativa de que as pessoas do meio urbano consomem e gastam relativamente mais com energia. No entanto, há pelo menos dois bons argumentos para justificar também o efeito negativo que foi encontrado. Primeiro, o fato de que nas cidades há menos casas em relação a apartamentos e, portanto, há relativamente menos pessoas com teto para a instalação de placas fotovoltaicas. Segundo, nas cidades há relativamente mais áreas sombreadas pelos prédios, diminuindo a área de incidência de radiação solar. Estes argumentos estavam guardados para a variável densidade populacional, mas esta não foi significativa.

As outras duas variáveis que não foram estatisticamente significantes, área geográfica da região e incidência de radiação solar, são fáceis de justificar. No caso da área, era esperado um efeito positivo, mas para isto deveria haver um certo povoamento mínimo dos territórios. Assim a sua não significância, pode estar associada ao fato de que nas grandes regiões há também grandes áreas vazias, com baixa ou nenhuma população. Em relação à incidência solar, pode-se justificar pela sua relação inversa com a renda per capita. As regiões com maior radiação solar são as que possuem menor renda e, como já foi dito, os custos das instalações das placas solares continuam relativamente altos.

A decomposição dos efeitos das variáveis explicativas pode ser observada na Tabela 6. Nela são apresentados três tipos de impactos das variáveis explicativas na potência instalada (lnpotenpc): o direto mostra o efeito das variáveis explicativas na potência instalada da própria mesorregião em questão; o indireto

mostra o efeito das variáveis explicativas das regiões vizinhas sobre a potência instalada da mesorregião em questão; e o total é a soma dos dois efeitos. Em linhas gerais, pode-se dizer que a expansão de energia solar é em parte explicada por fatores endógenos e em parte por fatores exógenos às mesorregiões. Os efeitos endógenos ou diretos, para as três variáveis significativas do modelo SAR, representam aproximadamente dois terços do total enquanto que os efeitos exógenos ou indiretos representam em torno de um terço do total.

Tabela 6. Impactos diretos, indiretos e totais do modelo SAR (variáveis com significância estatística)

Multiplicadores	Direto	Indireto	Total
Inpibpc	0,429	0,223	0,652
Ineduc	4,268	2,225	6,494
Intxurb	-0,795	-0,414	-1,209

Fonte: elaboração própria.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Um fator associado positivamente com a expansão da energia solar foi a presença de dependência espacial (efeito de contágio, dado pelo coeficiente ρ). Isto pode ser interpretado como um aprendizado social na difusão do uso de novas tecnologias, neste caso da energia solar. A instalação de um sistema solar em uma localidade torna a tecnologia visível, tangível e confiável, reduzindo a incerteza e inspirando a imitação. De acordo com Shove *et al.* (2012), vizinhos não são apenas pontos no mapa, mas redes de influência e aprendizado. Além disso, a aglomeração de usuários em uma região pode criar mercados locais para instaladores, facilitando o acesso a informações e serviços, impulsionando a adoção da nova tecnologia energética.

Os resultados mostram também que a adoção da energia solar é maior em áreas de maior renda (Inpibpc) e educação (Ineduc). Isso confirma o que era esperado, já que a adoção desta tecnologia implica em um investimento inicial com retorno ao longo do tempo. No entanto, este resultado indica que a transição energética pode, inicialmente, reproduzir ou até ampliar desigualdades sociais existentes. A energia solar corre o risco de se tornar um privilégio de classes sociais de maior renda, o que permite levantar questões sobre quem se beneficia das tecnologias limpas (SOVACOO, B. K. & DWORKIN, 2015; WALKER & DAY, 2012; JENKINS, 2016).

O coeficiente negativo para a taxa de urbanização (Intxurb), embora contra intuitivo à primeira vista, revela uma barreira sócio-técnica crítica: a incompatibilidade entre a tecnologia de micro usinas solares residenciais e a morfologia urbana de alta densidade. Pode-se dizer que a tecnologia é configurada para um tipo específico de usuário, o proprietário de casa com telhado adequado. Em cidades mais densas, boa parte da população reside em prédios, em casas populares ou em habitações precárias. Nos prédios a instalação exige acordo entre múltiplos proprietários, um sistema de rateio complexo para a energia gerada e a capacidade estrutural do telhado não suporta a instalação para todos os moradores. A Resolução Normativa 1.000/2021 da ANEEL tentou facilitar a

geração em condomínios, mas as barreiras institucional e física permanecem. As casas populares e habitações precárias têm estruturas frágeis, falta de titularidade documental (o que impede o acesso a financiamento) e alta densidade, tornando a instalação técnica e economicamente inviável (JASANOFF, 2004; BROTO, 2017).

Um resultado surpreendente foi que os locais com maior potencial natural de radiação solar (Inradia) não são os que mais adotam a energia solar. Provavelmente porque nesses locais (Região Nordeste do Brasil) a renda é relativamente menor. Isso reforça os resultados anteriores de que fatores sociais (renda e educação) são determinantes para a difusão desta tecnologia energética. Portanto, além do potencial natural, seriam necessárias políticas de fomento ou de acesso a financiamento para possibilitar que classes de renda mais baixas possam participar da transição energética.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde 2010, a geração e consumo de energia solar vem aumentando bastante, principalmente nos países mais desenvolvidos. Nestes países, este tipo de energia representa hoje ao redor de 2% total, com projeções de chegar a 16% em 2050. No Brasil o aumento passou a ser mais acelerado a partir de 2016. Esta expansão, no entanto, difere bastante entre países e regiões, o que se explica pela heterogeneidade de condições naturais, socioeconômicas e de configurações urbanas. No Brasil, verificou-se uma distribuição espacial desigual da potência instalada entre as mesorregiões brasileiras, com alta concentração nas regiões da metade sul do Brasil. Esta distribuição é curiosa na medida em que não segue o mesmo padrão da incidência de radiação solar.

Outro fator, de particular interesse neste estudo, é o conhecimento prático acerca do sistema de produção de energia solar (instalação, geração, uso e custos). Este é um conhecimento tácito e se difunde através da imitação, dos contatos, da interação e do compartilhamento de informações entre vizinhos (*spillovers*). O objetivo deste estudo foi verificar a presença deste mecanismo e de outros na expansão da capacidade instalada de geração deste tipo energia nas mesorregiões brasileiras. Foram consideradas apenas as pequenas unidades destinadas ao consumo residencial.

A principal hipótese do estudo foi confirmada, na medida em que o parâmetro estimado de dependência espacial da variável endógena foi positivo e significativo estatisticamente. Isto permite afirmar que lugares com alta carga de energia solar instalada estão cercados de lugares também com alta carga deste tipo de energia e vice-versa. Este resultado torna evidente que o conhecimento prático do funcionamento do sistema nas residências influencia a adoção do mesmo. Em outras palavras, os moradores próximos das residências que já possuem este tipo de energia, possivelmente por conhecerem melhor seus custos e benefícios, são mais propensos a também passarem a utilizá-la. Este resultado pode ser justificado pelo tema ainda ser novidade para as pessoas, associado ao fato de ser uma decisão importante em termos de custos de entrada.

Os outros fatores que explicam a expansão da energia solar são a renda per capita e a educação. Possivelmente a renda esteja associada aos custos de instalação e aos gastos domiciliares com energia e a educação com a valorização da questão da geração de energias limpas e sustentabilidade ambiental. A

divergência entre incidência de radiação e uso de energia solar explica-se também pelo fator renda per capita e gastos com energia, que tendem a ser relativamente menores nas regiões da metade norte do Brasil.

Em suma, com os resultados econométricos espaciais foi possível identificar padrões que são, em sua essência, fenômenos sociais. Pode-se concluir que a transição para a energia solar no Brasil é um processo sócio-técnico, onde fatores econômicos, padrões espaciais de aprendizado, desigualdades sociais e arranjos institucionais se entrelaçam. Para que seja bem-sucedida e justa, é necessário ir além dos incentivos de mercado e atuar com políticas sociais de inclusão à transição energética. Caso contrário, a transição energética poderá aprofundar as desigualdades sociais. Por um lado, com proprietários de renda média ou alta gerando a sua própria energia e reduzindo a sua conta de luz. Por outro, moradores de periferias urbanas e apartamentos continuando presos à tarifa cheia das distribuidoras, subsidiando indiretamente o sistema elétrico.

Factors associated with the diffusion of Residential Solar Energy in Brazil

ABSTRACT

The use of solar energy is increasing worldwide because it is accessible, abundant and inexhaustible. In Brazil there has been a large increase in recent years. The objective of this study is to analyze the factors associated with the expansion of the installed capacity of residential solar energy in the mesoregions of Brazil. Considering that the system of generation and use of this type of energy is still little known, the hypothesis is that there is a strong neighborhood effect (spatial dependence) in its diffusion. To capture this effect, a spatial econometrics model is used. The results confirm that, along with per capita income and education, the neighborhood effect is an important factor in explaining the expansion of small residential solar energy in the mesoregions of Brazil. The neighborhood effect reinforces the idea of social learning (SHOVE et al., 2012). The other results reveal that the energy transition to solar energy, although virtuous from an environmental point of view, may be deepening social inequalities, mainly due to the exclusion of access to the new technology due to economic or technical unfeasibility due to the type of housing (WALKER & DAY, 2012).

KEYWORDS: Natural resources. Solar energy. Spatial dependence.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil (CNPq) – Processo: 309574/2021-8.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. **Econometria Espacial Aplicada**, Campinas/SP: Alinea, 2012.
- ANSELIN, L. **Spatial econometrics: methods and models**. Dordrecht: Springer Kluwer, 1988.
- ARBIA, G. **A Primer for Spatial Econometrics with Applications in R**. Palgrave Macmillan, 2014.
- BALCOMBE, P.; RIGBY, D.; AZAPAGIC, A. Motivations and barriers associated with adopting microgeneration energy technologies in the UK. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 22, pp.655–666, 2013.
- BALTA-OZKAN, N.; YILDIRIM, J.; CONNOR, P. M. Regional distribution of photovoltaic deployment in the UK and its determinants: A spatial econometric approach. **Energy Economics**, 51, pp.417–429, 2015.
- BOLLINGER, B.; GILLINGHAM, K. Peer Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Panels. **Marketing Science**, 31(6), pp.900–912, 2012.
- BROTO, V. C. Energy landscapes and urban trajectories towards sustainability. **Energy Policy**, v.108, p. 755-764, 2017.
- COPIELLO, S. Building energy efficiency: A research branch made of paradoxes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 69, pp.1064–1076, 2017.
- COPIELLO, S.; GRILLENZONI, C. Is the cold the only reason why we heat our homes? Empirical evidence from spatial series data. **Applied Energy**, 193, pp.491–506, 2017a.
- COPIELLO, S.; GRILLENZONI, C. Solar photovoltaic energy and its spatial dependence. **Energy Procedia**, 141, pp. 86–90, 2017b.
- DHARSHING, S. Household dynamics of technology adoption: A spatial econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany. **Energy Research & Social Science**, 23, pp.113–124, 2017.
- ESPOSITO, A. S.; FUCHS, P. G. Desenvolvimento tecnológico e inserção da energia solar no Brasil, **Revista do BNDES** 40, 2013.
- FTHENAKIS, V. M. End-of-life management and recycling of PV modules. **Energy Policy**, v. 28, n. 14, p. 1051-1058, 2000.
- GOLGHER, A. B. **Introdução à Econometria Espacial**, Paco Editorial, 2015.
- GRAZIANO, M.; GILLINGHAM, K. Spatial patterns of solar photovoltaic system adoption: The influence of neighbors and the built environment. **Journal of Economic Geography**, 15(4), pp.815–839, 2015.
- JASANOFF, S. (ed). **States of Knowledge: The Co-production of Science and Social Order**. Routledge, 2004.

- JENKINS, K.; MCCAULEY, D.; HEFFRON, R.; STEPHAN, H.; REHNER, R. Energy justice: A conceptual review. **Energy Research & Social Science**, v.11, p.174-182, 2016.
- KELLER, W. Geographic localization of international technology diffusion. **American Economic Review**, 92(1), pp.120–142, 2002.
- LESAGE, J.; PACE, R.K. **Introduction to Spatial Econometrics**. Chapman & Hall/CRC Taylor & Francis Group, 2009.
- MANSKI, C.F. Identification of Endogenous Social Effects: The Reflection Problem. **The Review of Economic Studies**, V. 60, N. 3, p. 531-542, 1993.
- MÜLLER, S.; RODE, J. The adoption of photovoltaic systems in Wiesbaden, Germany. **Economics of Innovation and New Technology**, 22(5), pp.519–535, 2013.
- ORGANISATION for ECONOMIC COOPERATION and DEVELOPMENT (OECD). **Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy**, International Energy Agency, 2014.
- ORGANISATION for ECONOMIC COOPERATION and DEVELOPMENT (OECD). **Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy**, International Energy Agency, 2019.
- PALM, A. Local factors driving the diffusion of solar photovoltaics in Sweden: A case study of five municipalities in an early market. **Energy Research and Social Science**, 14, pp.1–12, 2016.
- PALMER, J.; SORDA, G.; MADLENER, R. Modeling the diffusion of residential photovoltaic systems in Italy: An agent-based simulation. **Technological Forecasting and Social Change**, 99, 106–131, 2015.
- RICHTER, L.L. **Social Effects in the Diffusion of solar Photovoltaic Technology in the UK**, Cambridge Working Papers in Economics 1357, 2013.
- RODE, J.; WEBER, A. Does localized imitation drive technology adoption? A case study on rooftop photovoltaic systems in Germany. **Journal of Environmental Economics and Management**, 78, pp.38–48, 2016.
- SARDIANOU, E.; GENOUDI, P. Which factors affect the willingness of consumers to adopt renewable energies? **Renewable Energy**, 57, pp.1–4, 2013.
- SCHAFFER, A. J.; BRUN, S. Beyond the sun—Socioeconomic drivers of the adoption of small-scale photovoltaic installations in Germany. **Energy Research & Social Science**, 10, pp.220–227, 2015.
- SCHELLY, C. Residential solar electricity adoption: What motivates, and what matters? A case study of early adopters. **Energy Research and Social Science**, 2, pp.183–191, 2014.
- SHOVE, E.; PANTZAR, M.; WATSON, M. **The Dynamics of Social Practice: Everyday Life and how it Changes**. SAGE Publications, 2012.
- SILVA Jr, A. P. da; NASCIMENTO, D. E. do; ZUBA, M. E. Levantamento de indicadores para avaliação de desempenho da geração individual de energia elétrica fotovoltaica. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 20, n. 62, p.275-297, 2024.

SOMMERFELD, J.; BUYS, L.; MENGERSEN, K.; VINE, D. Influence of demographic variables on uptake of domestic solar photovoltaic technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 67, pp.315–323, 2017.

SOVACOOOL, B. K.; DWORKIN, M. H. Energy Justice: Conceptual Insights and Practical Applications. **Applied Energy**. v. 142, 15, p.435-444, 2015.

TIBA, C. (coord.). **Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 111 p., 2000.

TOBLER, A.W.R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Economic Geography**, 46, pp.234–240, 1970.

TSOUTSOS, T.; FRANTZESKAKI, N.; GEKAS, V. Environmental impacts from the solar energy technologies. **Energy policy**, v. 33, n.3, p. 289-296, 2005.

VASSEUR, V.; KEMP, R. The adoption of PV in the Netherlands: A statistical analysis of adoption factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 41, pp.483–494, 2015.

WALKER, G.; DAY, R. Fuel poverty as injustice: Integrating distribution, recognition and procedure in the struggle for affordable warmth. **Energy Policy**, 49, p. 69–75, 2012.

ZHAI, P.; WILLIAMS, E.D. Analyzing consumer acceptance of photovoltaics (PV) using fuzzy logic model. **Renewable Energy**, v.41, I(C), p.350-357, 2012.

ZHANG, Y.J. Interpreting the dynamic nexus between energy consumption and economic growth: Empirical evidence from Russia. **Energy Policy**, V.39, I(5), p. 2265-2272, 2011.

ZHAO, T.; ZHOU, Z.; ZHANG, Y.; LING, P.; TIAN, Y. Spatio-temporal analysis and forecasting of distributed PV systems diffusion: A case study of Shanghai using a data - driven approach. **IEEE Access**, 5, pp.5135–5148, 2017.

Recebido: 27/06/2024
Aprovado: 12/11/2025
DOI: 10.3895/rts.v22n68.18762

Como citar:

FOCHEZATTO, Adelar; KORZENIEWICZ, Mariza Bethanya Dalla Vecchia; FOCHEZATTO, Isabela Mallmann. Fatores associados à difusão de energia solar residencial no Brasil. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 22, n. 68, p.327-344, jan./mar, 2026. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/18762>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

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

