

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FELIPE CÉSAR SABADINI

**DETERMINANTES SOCIOECONÔMICAS DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE  
PAINÉIS FOTOVOLTÁICOS RESIDENCIAIS NO BRASIL**

**São Carlos**

**2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

FELIPE CÉSAR SABADINI

**DETERMINANTES SOCIOECONÔMICAS DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE  
PAINÉIS FOTOVOLTÁICOS RESIDENCIAIS NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Orientador: Prof. Dr. Herick Fernando  
Moralles**

**São Carlos**

**2019**





# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

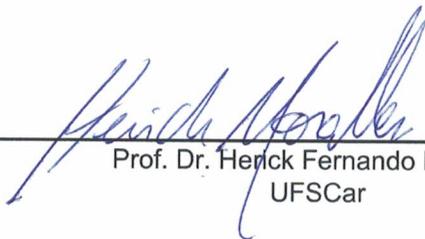
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

---

## Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Felipe Cesar Sabadini, realizada em 11/09/2019:



---

Prof. Dr. Herick Fernando Morales  
UFSCar

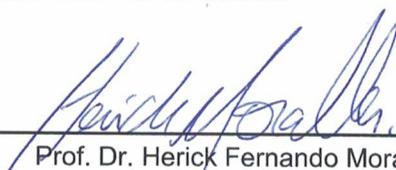
---

Profa. Dra. Ivete Delai  
UFSCar

---

Profa. Dra. Flávia de Castro Camioto  
UFTM

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Ivete Delai, Flávia de Castro Camioto e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



---

Prof. Dr. Herick Fernando Morales

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.  
Isaac Newton

Aos meus pais, Roberto e Luceile

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo o apoio e incentivo durante esta jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Herick Fernando Moralles pela paciência, disponibilidade e por ter dividido comigo seu conhecimento através de seus ensinamentos.

À minha companheira, Anaisa, pelo apoio, ajuda e por colorir minha vida.

Aos meus poucos e bons amigos.

Aos técnicos-administrativos da Universidade Federal de São Carlos.

Ao proletariado brasileiro que através de seus impostos sustentam a educação brasileira.

## RESUMO

A situação ambiental atual demanda novas formas de geração de energia, a matriz energética corrente é dependente de combustíveis fósseis que além de seu potencial danoso também é um recurso natural não renovável. Sensível à essa mudança, o governo brasileiro, publicou a resolução normativa 482/2012 da ANEEL, que estabeleceu as condições para a troca de energia entre microgeradores. O cenário atual demonstra que além dos benefícios ambientais, outras motivações e barreiras também são levantadas pela literatura como motivações que levam à adoção de painéis fotovoltaicos. Este trabalho tenta preencher parte dessa lacuna, sendo o primeiro a examinar a influência de fatores socioeconômicos na distribuição espacial de painéis fotovoltaicos residenciais nos municípios brasileiros levando em conta o fator espacial como uma determinante. Foi elaborado um modelo *cross section*, também foram utilizados os modelos espaciais de dados em painel SAR e SEM. Os resultados encontrados neste trabalho demonstram influências das variáveis população, PIB do agronegócio e salário, demonstrando convergência com estudos anteriores, o modelo escolhido foi *spatial error* por apresentar melhores índices, a variável espacial e *peer effects* demonstraram significativa influência na adoção dos painéis.

Palavras-chave: Painel fotovoltaico. Econometria Espacial. Distribuição Regional

## ABSTRACT

The current environmental situation demands new forms of energy generation, the current energy matrix is dependent on fossil fuels that besides its harmful potential is also a non-renewable natural resource. Sensitive to this change, the Brazilian government published ANEEL's normative resolution 482/2012, which established the conditions for the exchange of energy between micro generators. The current scenario shows that besides the environmental benefits, other motivations and barriers are also raised by the literature as motivations that lead to the adoption of photovoltaic panels. This work tries to fill part of this gap, being the first to examine the influence of socioeconomic factors on the spatial distribution of residential photovoltaic panels in Brazilian municipalities taking into account the spatial factor as a determinant. A cross section model was elaborated, and spatial models of data in SAR and SEM panels were also used. The results found in this work demonstrate influences of the variables population, per capita income of agribusiness and salary, demonstrating convergence with previous studies, the chosen model was spatial error for presenting better indexes, the spatial variable and peer effects showed significant influence on the adoption of panels.

Keywords: Photovoltaic panel. *Spatial* Econometrics. Regional Distribution

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resumo dos principais achados RBS.....	18
Figura 2 Potencial de Geração Fotovoltáica em telhados residenciais por unidade da Federação.....	23
Figura 3 Projeção do crescimento da capacidade instalada e custos até 2050 .....	25
Figura 4 Participação de renováveis no consumo final de energia, por setor, 2015 .....	29
Figura 5 Total de unidades e potência de geração distribuída no Brasil 2012-2016.....	38
Figura 6 Distribuição por unidade da federação das unidades de geração distribuídas no país por potência instalada.....	41
Figura 7 Distribuição por unidade da federação das unidades de geração distribuídas no país por unidades instaladas .....	41
Figura 8 Distribuição dos paineis fotovoltaicos no Brasil por município .....	42
Figura 9 Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	44
Figura 10 Consumo final de energia por fonte .....	44
Figura 11 Convenção “Rainha” de Contiguidade.....	57
Figura 12 Convenção “Torre” de Contiguidade .....	57
Figura 13 Convenção “Rainha” de Contiguidade de segunda ordem .....	58
Figura 14 Taxa de irradiação para geração distribuída no Brasil .....	64
Figura 15 Fluxograma modelos de estimação .....	68
Figura 16 Correlação entre variáveis Loggdp <sub>gen</sub> e Logemp .....	70
Figura 17 Correlação entre as variáveis Logpop e Logsal .....	71
Figura 18 Mapa de significância LISA.....	74
Figura 19 Mapa clusters LISA.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Total de unidades e potência de geração distribuída no Brasil 2012-2016 .....	39
Tabela 2 Energia distribuída no país por fonte.....	39
Tabela 3 Localização do uso da energia gerada nas unidades de geração distribuída .....	40
Tabela 4 Uso final energia gerada por geração distribuída no Brasil.....	40
Tabela 5 Correlação entre as variáveis – Matriz de Pearson.....	69
Tabela 6 Magnitude de força coeficiente de Pearson.....	70
Tabela 7 Resultados regressao clássica .....	72
Tabela 8 Resultados modelo <i>spatial error</i> e <i>spatial lag</i> .....	76

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Motivos e barreiras encontrados em estudos anteriores .....	15
Quadro 2 Comparação entre barreiras e políticas adotadas.....	37
Quadro 3 Resumo de determinantes, autores baseados, hipóteses, proxy e fonte de coleta de dados .....	63
Quadro 4 Resumo das hipóteses e comportamento esperado da determinante .....	65

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. REVISÃO DA LITERATURA: PANORAMA E DETERMINANTES.....	18
2.1 Revisão Bibliográfica Sistemática.....	18
2.2 Experiências Nos Principais Mercados Mundiais .....	19
2.3 Potencial Da Energia Fotovoltáica No Brasil.....	22
2.4 Potencial De Instalação De Painéis Fotovoltáicos No Brasil.....	24
2.5 Projeção Da Viabilidade Econômica.....	24
2.6 Perspectivas Mercadológicas.....	26
2.7 Perspectivas Institucionais.....	27
2.8 Barreiras Encontradas No Brasil .....	30
2.9 Políticas De Incentivo Vigentes E Outras Recomendações .....	33
2.10 Evolução Nos Anos Recentes.....	38
2.11 Afinal, O Brasil Está No Caminho Certo? .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
2.12 Determinantes.....	45
2.12.1 Determinantes Regionais.....	45
2.12.2 Determinantes Ambientais .....	47
2.12.3 Determinantes Econômicas .....	48
2.12.4 Determinantes Governamentais.....	49
2.12.5 Determinantes Sociais .....	50
2.13 Econometria Espacial .....	52
2.13.1 Índice De Moran.....	54
2.13.2 Matriz De Ponderação Espacial.....	56
2.13.3 Matriz De Pesos Espaciais Gerais De Cliff E Ord .....	59
2.14 Modelos De Econometria Espacial.....	60
3. OBJETIVOS E HIPÓTESES .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4. MÉTODO.....	62
4.1 Variáveis E Fontes De Dados.....	62
4.2 Modelo Econométrico .....	65
4.3 Estratégia De Estimacão.....	66
4.4 Modelo SAR.....	68
4.5 Modelo SEM .....	69
5. RESULTADOS .....	72
5.1 Preparação Do Modelo .....	69

5.2 Regressão Tradicional .....	72
5.3 Escolha Melhor Matriz Espacial.....	73
5.4 LISA Global E Local .....	73
5.5 Regressao Espacial <i>Spatial Error</i> E <i>Spatial Lag</i> .....	75
6. DISCUSOES .....	78
6.1 Recomendações Sobre Políticas Públicas .....	78
6.2 Ações Já Realizadas.....	79
7. CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	82

## 1. INTRODUÇÃO

As consequências das mudanças climáticas induzidas pela atividade humana são uma preocupação crescente para a comunidade internacional (IPCC, 2018). Cerca de 65% das emissões de CO<sub>2</sub> são provenientes da queima de combustíveis (REN21, 2018). Ciente da situação, vários compromissos internacionais foram assinados, o mais recente, em 2015, o acordo de Paris configurou um marco para manter o aumento da temperatura média global máxima o mais próximo possível de 1,5°C, onde mais de 190 países se comprometeram a reduzir os Gases de Efeito Estufa (GEE) em cerca de 20% a 40%.

Segundo a Organização Econômica para Cooperação e Desenvolvimento (OCDE) (2016), dois terços das emissões de gases de efeito estufa advém da produção e uso de energia. Contudo, apesar da grande dependência atual de fontes não renováveis, as perspectivas futuras são boas, pois até 2050, 65% do uso mundial de energia pode vir de fontes renováveis (IEA, 2014). Levando em consideração o consumo final de energia, 79.5% é originária de fontes fósseis, considerando apenas a fonte para geração de energia elétrica, esse valor vai para 73.5% (REN21, 2018)

Dentro das várias alternativas sustentáveis à geração de energia, o uso da energia solar aparece de forma promissora, sendo abundante e um recurso de enorme potencial a ser explorado tanto para alcançar a plena oferta de acesso de energia elétrica no mundo, como para reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

A principal tecnologia de energia solar no mundo é solar fotovoltaica, em que a luz do sol é convertida em eletricidade por meio de um sistema baseado em silício. A geração de energia solar fotovoltaica é limpa, segura e altamente eficiente. Como a escassez global de energia e a poluição tornaram-se cada vez mais proeminentes, a energia solar tem recebido atenção mundial (ZHANG E HE, 2013).

O ano de 2017 foi especialmente marcante para energia solar fotovoltaica, foi o ano em que foi adicionada maior capacidade de geração desta fonte do que qualquer outro tipo de tecnologia. Os cinco principais mercados mundiais - China, Estados Unidos, Índia, Japão e Turquia - foram responsáveis por quase 84% da nova capacidade instalada; os cinco seguintes foram Alemanha, Austrália, Coreia do Sul, Reino Unido e Brasil (REN21, 2018).

Globalmente, a expansão do mercado é motivada, em grande parte, ao aumento da competitividade da energia solar fotovoltaica combinada com o aumento da

demanda por eletricidade nos países em desenvolvimento, bem como para a crescente consciência do potencial da energia solar fotovoltaica para mitigar a poluição. No entanto, a maior parte da demanda global continua a ser impulsionado em grande medida por incentivos e regulamentos governamentais (REN21, 2018).

Além dos benefícios anteriores, a literatura também aponta outros fatores, como motivos individuais como aumentar a autossuficiência do lar ou obter independência da rede elétrica central (PALM E TENGVARD, 2011; JAGER, 2006; BERGMAN ET AL., 2009). Os recentes aumentos dos preços da energia também contribuíram para o desejo dos indivíduos de se protegerem contra flutuações futuras e cortes de energia (PRAETORIUS ET AL., 2010).

Todavia, é possível notar que barreiras financeiras também são levadas em conta, as quais envolvem o alto custo de investimento, retorno em longo prazo (entre 8 e 11 anos segundo Scarpa e Willis (2010)), e subsídios governamentais (BALCOMBE ET AL., 2013; ENLUND; ERIKSSON, 2016; PALM; TENGVARD, 2011).

De fato, em alguns casos, tanto a instalação como os custos de manutenção superam o retorno esperado, como é o caso da adoção de painéis fotovoltaicos residenciais no Arizona (ZHAI E WILLIAMS, 2012). Os mesmos custos também são encontrados no contexto da intenção dos consumidores de adotar painéis fotovoltaicos na Grécia: o alto custo de instalação e manutenção afetam negativamente intenções de adoção (SARDIANOU E GENOUDI, 2013). Um mesmo ponto de vista na literatura sugere ainda que existe uma percepção que os painéis fotovoltaicos são excessivamente caros (BAZILIAN ET AL., 2013).

Outras barreiras também ofuscam a adoção de sistemas fotovoltaicos, uma delas diz respeito à propriedade do imóvel: pessoas que moram em casas alugadas tem uma probabilidade significativamente menor de possuir sistemas fotovoltaicos do que as casas aonde moram os proprietários (WELSCH E KÜHLING, 2009).

Além disso, a instalação de um sistema de micro geração envolve muitas vezes grandes modificações no que se refere ao sistema elétrico (SCARPA E WILLIS, 2010; WEE ET AL., 2012). Outras barreiras incluem uma mudança nos requisitos de manutenção e complexidade do sistema (SCARPA E WILLIS, 2010).

A dificuldade em encontrar informações confiáveis sobre a micro geração também é um grande obstáculo à adoção, apesar dos esforços do governo e de diversos grupos de interesse para reduzir essa barreira (BALCOMBE ET AL., 2013).

O Quadro 1 resume os principais achados em estudos anteriores no contexto mundial:

Quadro 1 Motivos e barreiras encontrados em estudos anteriores

INCENTIVOS	AUTORES	BARREIRAS	AUTORES
Taxa de radiação solar	Hang et al. (2008)	Alto Investimento	Jager (2006)
Spillovers	Robinson; Rai (2015)	Longo tempo de retorno	Faiers; Neame (2006)
Preocupações ambientais	Pedersen (2000)	Manutenção	Sardianou ;Genoudi (2013)
Autossuficiência	Palm; Tengvard (2011)	Adaptações do domicílio	Scarpa; Willis (2010)
Economia com a geração	Islam (2014)	Falta de Informações confiáveis	Balcombe et al. (2013)
Tarifas subsidiadas	Balcombe et al. (2013)		

Fonte: desenvolvida pelo autor

A literatura também traz outros fatores socioeconômicos que são determinantes na adoção dos painéis fotovoltaicos. Kwan (2012) ao analisar a distribuição de painéis fotovoltaicos nos Estados Unidos, concluiu que a renda é um fator positivo para a adoção, a regressão também encontrou resultados positivos de adoção em comunidades de brancos, enquanto regiões com asiáticos e negros possuem menor porcentagem. Dharshing (2017), na Alemanha, encontrou resultados semelhantes aos de Dastrup et. Al. (2012), nos municípios de Sacramento e San Diego, nos Estados Unidos, seus resultados indicam que status socioeconômicos mais altos como renda e educação tem efeito positivo na adoção dos painéis.

Por sua vez, Dharshing (2017) trabalhou com idade, mas encontrou um efeito inverso, a população entre 60 e 75 anos possui mais aversão à essa tecnologia. De Grote (2016) analisou a região de Flandres, na Bélgica, e corrobora vários resultados encontrados por Kwan (2012), além da renda o valor do imóvel também indicava uma maior possibilidade de adoção. Em relação à idade, o estudo conclui que a partir dos 25 anos os indivíduos são mais propensos à adoção.

Também na Alemanha, o estudo de Shaffer & Brun (2015) indica que depois da irradiação solar, a alta densidade populacional é o fator mais decisivo para adoção de painéis fotovoltaicos, contrastando com Kwan (2012), que afirma que a densidade populacional tem um efeito negativo, já que em áreas muito urbanizadas há menos

espaço para instalação nos telhados. Os resultados também indicaram que a capacidade de painéis fotovoltaicos instalados se relaciona positivamente com a taxa de casas próprias e PIB per capita.

Sigrin et al (2015), aplicando uma *survey* em San Diego, Califórnia, chegou a resultados semelhantes aos citados. Na comparação entre adotantes e não adotantes, esses tendem a possuir renda maior, também se diferenciam por habitarem casas maiores e possivelmente gastarem mais com energia elétrica. Adotantes também tinham tendência em ter mais aparelhos domésticos e um nível educacional maior. Os resultados de Palm (2018) na Suécia corroboram a maioria dos estudos anteriores, já que apresenta como grandes determinantes de adoção maior escolaridade e renda.

Balcombe et al. (2013) também encontrou correlação entre classes sociais, renda e educação para aqueles que adoram painéis, os autores concluíram que diferentes segmentos adotam essa tecnologia, mas classificaram os adotantes de painéis fotovoltaicos como “elite acadêmica e econômica”. Outros estudos também demonstraram a relação entre a renda e investimentos em sistemas fotovoltaicos (ABU-ARQOUB ET AL., 2014, GALLEGOS ET AL., 2014, JIANG E ZHU, 2012, SCHAFFER E BRUN, 2015).

Claudy et al. (2010), Mahapatra e Gustavsson (2009) e Keirstead (2007), respectivamente na Irlanda, Suécia e Reino Unido sugerem que a maior taxa de adoção de painéis fotovoltaicos se encontra entre indivíduos com maior renda e nível de educação. Uma maior renda mitiga os custos de adoção, mas a causalidade entre adoção e educação é menos exata.

Além de servir de base para escolha das determinantes a serem adotadas neste trabalho, também é possível extrair de estudos anteriores que a maioria dos trabalhos se contextualiza em países desenvolvidos, havendo um *gap* a ser explorado em países em desenvolvimento, especialmente o Brasil e seu grande potencial de geração solar.

Dessa forma, estudar hábitos dos consumidores e como a adoção de uma tecnologia se estabelece pode auxiliar com políticas públicas que possam ajudar a ampliar essa acolhida, tendo em vista que estudos prévios mostram a influência de fatores socioeconômicos, além da influência de atributos regionais nessa adoção. Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é examinar os fatores socioeconômicos determinantes na adoção de painéis fotovoltaicos residenciais no Brasil e analisar sua distribuição espacial.

A justificativa se baseia na recente onda de publicações internacionais sobre o tema, utilizando diversos métodos e também diferentes recortes geográficos em vários países. Ademais, apesar de vários estudos trabalharem com barreiras e incentivos socioeconômicos referentes aos painéis fotovoltaicos, poucos levam em conta a dinâmica espacial como um determinante do espriamento dos painéis. Algumas pesquisas recentes como Bollinger e Gillingham (2012), Richter (2013), Müller e Rode (2013), Rode e Weber (2012); Graziano e Ozik (2014); Balta-Ozkan et al (2015) Schaffer e Brun (2015) argumentam que a adoção de energia fotovoltaica não é determinada apenas pelas características socioeconômicas de cada região, mas também pela dependência espacial entre regiões vizinhas.

Este trabalho tenta preencher parte dessa lacuna, sendo o primeiro a examinar do a influência de fatores socioeconômicos na distribuição espacial de painéis fotovoltaicos incluindo a variável espacial e utilizando econometria espacial para análise. As hipóteses do modelo construídas com base na literatura são as seguintes:

H1: Municípios com maior radiação solar tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H2: Adoção dos painéis fotovoltaicos é espacialmente correlacionada, logo, a adoção dessa tecnologia em uma área de uma localização dependerá da adoção dessa tecnologia pelos seus vizinhos.

H3: Municípios com maior salário médio mensal tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H4: Municípios com maior número de pessoas ocupadas tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H5: Municípios com maiores índices de educação tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H6: Municípios com maior densidade populacional tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

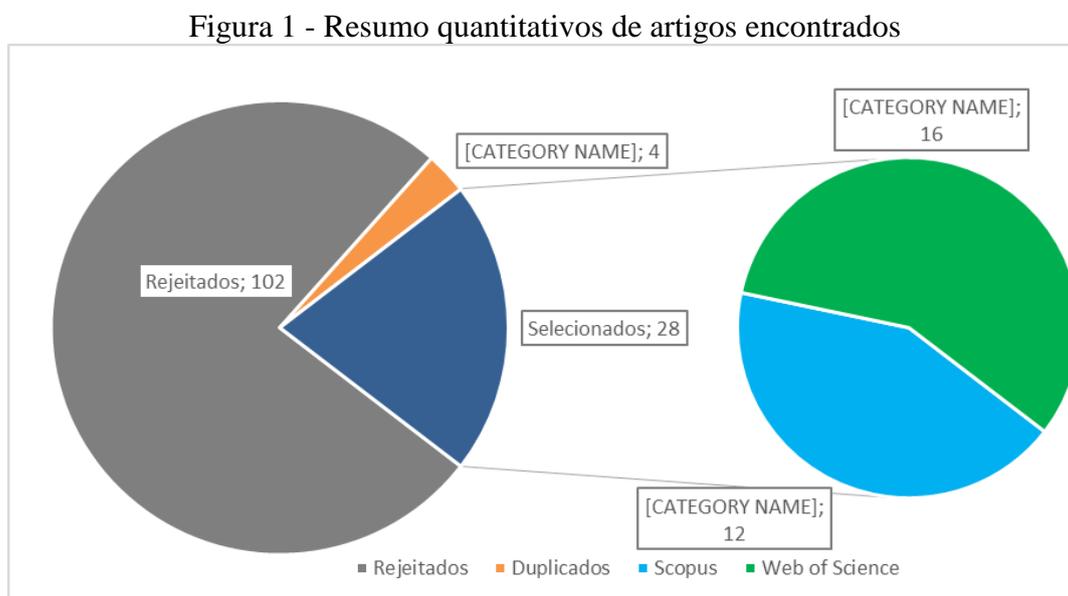
Os resultados encontrados neste trabalho pretendem colaborar com políticas públicas mais efetivas, entender padrões dos consumidores e levar a um futuro sustentável com maior participação dos consumidores. Academicamente, esta pesquisa fornece uma nova compreensão de motivações e barreiras da tecnologia de painéis fotovoltaicos em países em desenvolvimento.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA: PANORAMA E DETERMINANTES

### 2.1 Revisão Bibliográfica - Método

A busca foi realizada nas bases de dados *Web of Science*, e *Scopus*. As *strings* de busca utilizados foram *spatial econometrics* e *photovoltaic panels* no ano de 2017, além disso, foi feito um recorte temporal de dez anos, apesar do tema já ser recorrente a mais tempo, esse recorte tem como objetivo a coleta de artigos mais recentes e busca de métodos quantitativos aplicados a esse tema, os idiomas selecionados foram inglês e português. Além disso, devido à multidisciplinariedade do tema, não se pretende fazer um recorte por área de estudo, uma pesquisa feita previamente já demonstrou que áreas diversas como Economia, Engenharia, Administração e Ecologia podem contribuir para uma boa revisão.

Para posterior análise, foi utilizado o software START para organização e sistematização da revisão bibliográfica. A Figura 1 mostra os principais resultados encontrados:



Após a revisão inicial, onde foram encontrados vários artigos com grande número de citação e com maior divulgação dentro do espaço científico, também foi realizada a técnica *snowball*. Essa técnica é uma forma de amostra não probabilística

utilizada em pesquisas sociais onde os participantes iniciais de um estudo indicam novos participantes que por sua vez indicam novos participantes e assim sucessivamente, até que seja alcançado o objetivo proposto (o “ponto de saturação”). O “ponto de saturação” é atingido quando os novos entrevistados passam a repetir os conteúdos já obtidos em entrevistas anteriores, sem acrescentar novas informações relevantes à pesquisa (WHA, 1994).

## 2.2 Experiências nos principais mercados mundiais

Basicamente, o termo geração distribuída aplica-se a sistemas de pequeno porte instalados em residências, unidades comerciais ou unidades industriais para atender parte da demanda local. Nesta configuração, os sistemas fotovoltaicos são usualmente instalados no telhado da unidade consumidora, reduzindo as perdas de energia com transmissão e distribuição – pois são ligados diretamente à rede de distribuição já existente, junto aos pontos de consumo da energia (ANEEL, 2017).

De acordo com IEA (2018), para a capacidade acumulada, os principais países são China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Itália, com a Índia não muito atrás. O objetivo é mostrar as ações realizadas por esses países para chegar a esse patamar exemplar.

Em relação à China, a conferência de Copenhague (COP15) em 2009 foi marcada pelo compromisso que esse país assumiu perante o mundo com a redução das emissões de CO<sub>2</sub>. A sua meta foi de uma redução de CO<sub>2</sub> por unidade de PIB de 40% a 45% até 2020, em comparação a 2005. O seu plano para atingir o resultado é através do aumento de 15% das fontes de energia não fósseis na sua matriz energética. Com essa meta, a China atende às expectativas internacionais e à visão de longo prazo para seu planejamento econômico e social. Grau, Huo e Neuhoff (2012) apontam que a China em 2009 promoveu uma série de políticas de mercado para geração de energia fotovoltaica e lançou o programa “Golden Sun”, além de alguns projetos em grande escala de *feed-in-tariffs (fit)*<sup>1</sup>. Todas estas iniciativas têm o objetivo de um “programa de médio e longo prazo de desenvolvimento de energia renovável” com metas oficiais de instalação

---

<sup>1</sup> Pagamento feito a domicílios ou empresas que produzem a sua própria eletricidade através da utilização de métodos que não contribuem para o esgotamento dos recursos naturais, proporcional à quantidade de eletricidade produzida.

até 2020. Houve também incentivos através de subsídios para os investidores que adquiriram o sistema de geração fotovoltaico diretamente dos fabricantes. Esse subsídio corresponde a uma redução de 50% quando aplicado na rede fotovoltaica da cidade e de 70% quando aplicado fora da rede fotovoltaica nas áreas rurais.

Além disso, segundo os mesmos autores Grau, Huo e Neuhoff (2012) existe o apoio ministerial na implantação e inovação com alta tecnologia a pequenas empresas e um orçamento de apoio em P&D para instituições de pesquisa e empresas. Outras facilidades foram criadas para incentivar ainda mais a indústria fotovoltaica, como empréstimos e créditos oferecidos pelos bancos do governo e do estado aos fabricantes, investimentos e subsídios diretos aos fabricantes fotovoltaicos, com redução de impostos e empréstimos a juros reduzidos. Esses regimes de apoio à tecnologia para os sistemas fotovoltaicos são amplamente utilizados e conseguiram permitir a viabilização dos projetos de geração fotovoltaica e com redução de custos.

Na Alemanha, Jacobsson (2006) argumenta que o movimento da opinião pública na segunda metade da década de 1980 fez a grande diferença junto aos parlamentares alemães por mudanças na matriz energética do país, por sua vez, em 1990, a Lei *feed-in* foi aprovada com o objetivo de incentivar os geradores de energia renováveis com uma garantia de pagamentos por unidade gerada, durante um período fixo, no qual o prazo é estipulado por cada país que o adota. Esta lei também estabelece os regulamentos para as interconexões com as redes elétricas locais para que os produtores possam vender a energia gerada por estas fontes renováveis (REN21, 2018).

Paralelamente aos incentivos, diversos programas com empréstimos subsidiados para compra de sistemas de geração de energia fotovoltaica foram implementados, visando estimular investimentos na indústria fotovoltaica e projetos de P&D (GRAU, HUO E NEUHOFF, 2012). De acordo com os mesmos autores, os incentivos dados pelo governo alemão para o uso da energia fotovoltaica foram: apoio ao investimento para fábricas na Alemanha; subsídios e incentivos em dinheiro; doação em dinheiro; subsídio de investimento; empréstimos a juros reduzidos pelo banco de desenvolvimento alemão a nível nacional, pelos bancos estaduais de desenvolvimento, através de mercado de capitais pelas garantias públicas, através de financiamento para P&D pelo Ministério Federal do Ambiente, Conservação da Natureza e Segurança Nuclear (BMU) e Ministério Federal da Educação e Pesquisa. Além disso, os autores afirmam que o acelerado desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica nas últimas

décadas reduziu o preço do sistema em 52% entre os anos 2006 e 2011, apesar disso, a maioria dos novos investimentos no setor fotovoltaico ainda é obtida por meio do apoio governamental.

No Japão, Avril, Mansilla e Busson (2012) relatam em ordem cronológica os diversos programas de demonstração que foram lançados pelo governo e administrados pela fundação nova energia. Estes programas de demonstração permitem o desenvolvimento das instalações enquanto a tecnologia não está madura e sem forte apoio de P&D para melhorar a tecnologia. Os principais programas de demonstração implementados foram: o Programa de Disseminação do Sistema Fotovoltaico Residencial em 1994, com subsídios do custo da instalação e, o Projeto Piloto de Promoção de Infraestrutura de Eco Escola em 1997, que implementou o piloto da escola amiga do meio ambiente. Com o objetivo de promover a implantação de novas energias localmente, criou-se o Projeto de Apoio para os Esforços Locais em 1997, com subsídios de até 50% do valor da instalação para sistema com saída de 50 kW ou mais. Já para as empresas, para acelerar a nova energia junto a empreendedores privados, criou o Projeto de Subsídio Financeiro para Empreendedores que introduzem a Nova Energia em 1999. Em 2000, lançou o Projeto de introdução e promoção da nova energia em nível regional e o Programa de Apoio para Deter o Aquecimento Global em 2001. Devido à nova meta do Governo em dobrar a capacidade instalada até 2020, as instalações de geração de energia fotovoltaica em 2009 ampliaram mais que 100% em relação a 2008.

Nos Estados Unidos, o crescimento do mercado de energia solar ocorre devido a um conjunto favorável de políticas públicas (TIMILSINA, KURDGELASHVILI E NARBEL, 2012). Essas políticas se baseiam em investimentos no projeto “*Solar America Initiative*”, em P&D, para tornar a energia fotovoltaica competitiva. Os investimentos variam entre estados: a) através de linhas de financiamento diferenciado para compra de equipamento aplicado somente em cinco estados; b) transferências diretas baseadas em desconto, empréstimos ou em desempenho, podendo chegar a cobrir até 50 % do valor da instalação (é utilizado em mais da metade dos Estados; c) por meios fiscais/tributários através de dedução dos impostos sobre a edificação d) somente por meio fiscal, através de desconto ou eliminação das taxas nos sistemas fotovoltaicos e) através do *net metering*, na qual a parcela da energia não consumida é utilizada pela concessionária e creditada para consumo futuro (utilizada por quase a

totalidade dos Estados americanos) f) ou por meio de crédito via redução do imposto de renda em 30% do custo da instalação (EPE, 2012). O relatório apresenta os três fatores fundamentais para o crescimento da energia fotovoltaica nos Estados Unidos: o baixo custo para gerar a energia, o processo de inovação e a expansão de mercado e a estabilidade política e legal.

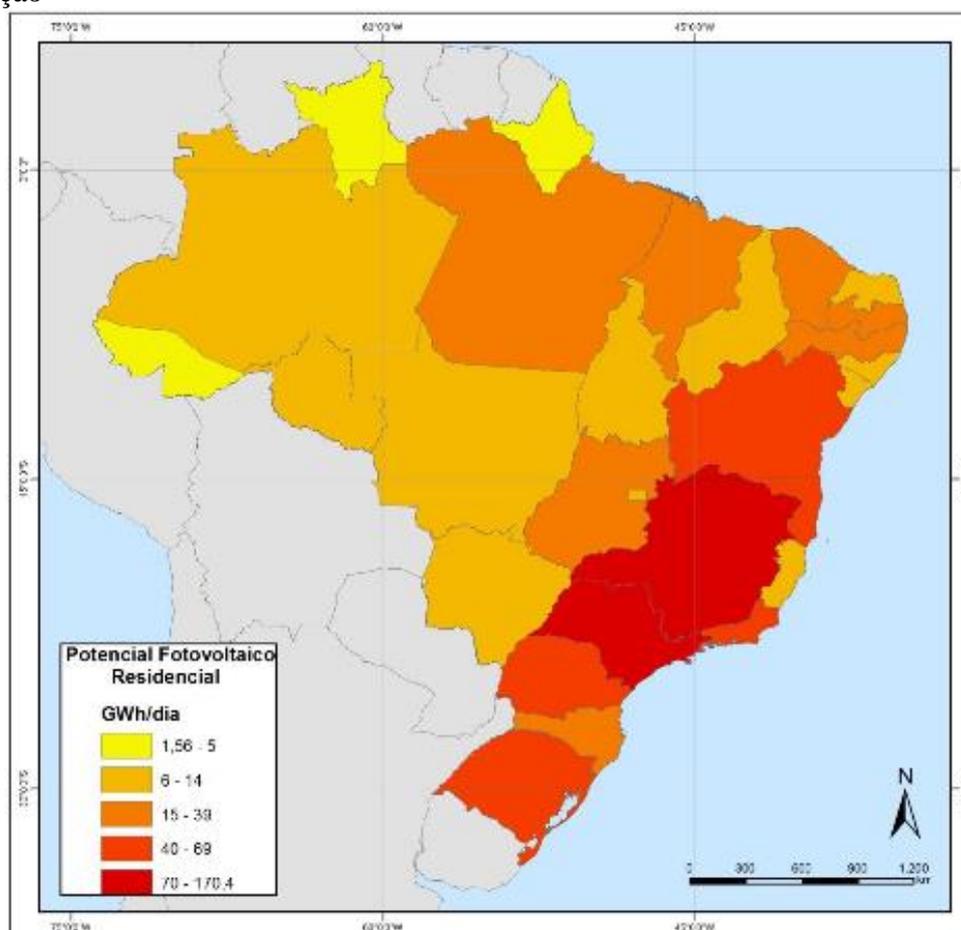
Na Itália, o sistema de geração de energia por células fotovoltaicas iniciou-se em 2003, atendendo a diretiva da Comunidade Europeia (CE) para fontes renováveis. Fortes incentivos do governo foram feitos através do “*Programa Conto Energia*”, que resultou na grande participação e elevado aumento das instalações fotovoltaicas, por sua vez, Cucchiella e D’Adamo (2012) argumentam que o governo italiano teve um papel importante na implementação, através de um regime de apoio muito atraente, misturando net metering e *feed-in-tariff* segmentado. As instalações de geração de energia fotovoltaica, tanto as de pequeno como as de médio porte, foram construídas nas regiões do Norte, que são mais ricas, com investimento pessoal próprio por famílias ou pequenas e médias empresas, enquanto que no Sul, onde a irradiação solar é maior, os investimentos foram em grandes centrais de geração, geralmente efetuadas por empresas de energia ou por empresas de investimentos (ANTONELLI E DESIDERI, 2014).

### **2.3 Potencial da energia fotovoltaica no Brasil**

Para calcular o potencial de energia fotovoltaica distribuída no país a metodologia utilizada foi a de EPE (2014), basicamente são utilizados três dados: nível de irradiação solar no país, área de telhado disponível para instalação dos painéis e eficiência na conversão do recurso solar em energia elétrica.

Com base na metodologia descrita foi elaborado a Figura 2:

Figura 2 Potencial de Geração Fotovoltaica em telhados residenciais por unidade da Federação



Fonte: EPE (2014)

Os resultados demonstram que, embora a região mais povoada do país possua uma menor radiação comparada com alguns estados do Norte e Nordeste, o número intenso de residências alavanca o potencial das regiões Sul e Sudeste.

Além disso, baseado no potencial de geração fotovoltaico e consumo de eletricidade residencial para o Brasil o potencial residencial fotovoltaico em Gwh/ano é de 287.505; já o consumo anual residencial é de 124.896 Gwh. Conclui-se então que, apesar de ser pouco factível o potencial de geração é 2,3 vezes maior que o consumo e que área geográfica não é um fator limitante à implementação de energia fotovoltaica

distribuída. Soma-se a isso o fato de que no futuro a construção de novas residências, ocupação de novas áreas e o desenvolvimento tecnológico devem elevar o potencial fotovoltaico.

#### **2.4 Potencial de instalação de painéis fotovoltaicos no Brasil**

Primeiramente, foram considerados como aptos somente domicílios do tipo casa. A razão dessa escolha é que no caso de apartamentos, a instalação é dificultada em função da cobertura do edifício nem sempre estar disponível, além de oferecer restrições contratuais por ser uma área comum. Outra restrição é derivada da condição de diferentes formas de ocupação do domicílio. Domicílios alugados ou cedidos dificilmente irão receber uma instalação fotovoltaica por se tratar de um investimento de longo prazo e de difícil transferência para outro imóvel. Portanto, o locatário não tem estímulo para investir em um imóvel de terceiro, havendo perspectiva de mudança. O locador, por sua vez, também não é incentivado, uma vez que o benefício da redução na conta de energia é auferido pelo inquilino. Logo, convém considerar como aptos somente os domicílios do tipo casa própria.

Através do último censo nacional realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2016, foram levantados os números de domicílios que apresentavam a condição acima, própria quitada e em aquisição. O número total de domicílios nesta condição era de 65% do total de residências no país, seguindo o estudo EPE (2012) foi adotado um fator de 85% referente a obstáculos limitantes como sombras, antenas, caixas d'água, etc. O percentual de domicílios aptos para o objetivo em questão seria:

$$F = 0,65 \times 0,85 \cong 0,55 = 55\% \quad (1)$$

Além disso, como não há estudos sobre a ocupação comercial, utilizou-se o mesmo fator que o residencial, por analogia.

#### **2.5 Projeção da viabilidade econômica**

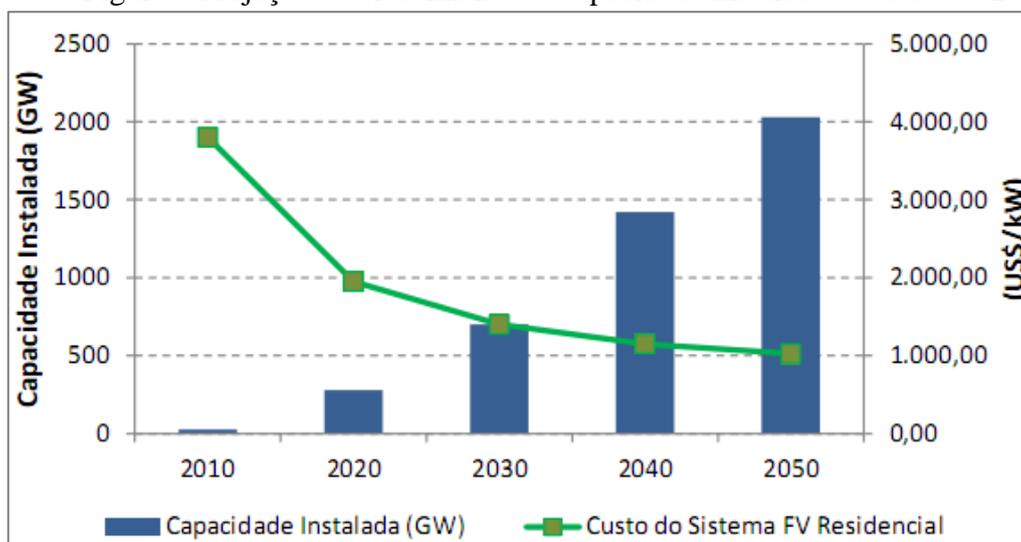
No Brasil, os sistemas solares fotovoltaicos tornaram-se uma opção interessante devido à combinação de a) as tarifas residenciais elevadas, que variam de 17 até 39 US\$ centavos por kW h, b) a grande disponibilidade de recursos de radiação solar, variando

de mais de 1500 a quase 2200 kW h / m<sup>2</sup> / ano c) a redução internacional dos preços dos módulos solares que decresceram de cerca de 23 US\$ /W em 1980 para 1 US\$/W em 2017. Após determinar a viabilidade de inserção desta tecnologia no Brasil e ver que não há limitações geográficas por parte da oferta, se torna necessário o estudo econômico da viabilidade desse projeto.

Segundo Bazillian et al. (2013) o cenário internacional de energia solar fotovoltaica apresentou significativa alteração nos últimos anos. O cenário passado mostrava uma tecnologia usualmente utilizada para ofertar geração isolada, falta de escala na indústria, dúvidas sobre adequação dos materiais de fornecimento, além do alto custo do negócio. Entretanto, o cenário foi alterado positivamente acarretando um viés positivo sobre o cenário, dentre os fatores que contribuíram para estão a rápida redução de custos, mudanças na própria indústria que percebeu a abundância dessa fonte além das mudanças climáticas que pressionaram o uso de fontes alternativas de geração.

Em termos de perspectivas mundiais, a IEA (2014) prevê que a capacidade fotovoltaica instalada passe de 27 Gwh em 2010, para cerca de 2000 GW em 2050. A Figura 3 ilustra o cenário de expansão traçado pela IEA.

Figura 3 Projeção do crescimento da capacidade instalada e custos até 2050



Fonte: IEA (2014)

A expansão demonstrada contribui para prolongar o cenário de redução de custos da fonte e o aumento da capacidade instalada verificada nos últimos anos. Com o objetivo de demonstrar a redução de custos frente ao aumento da capacidade, um estudo

da IEA (2014) calculou a taxa de aprendizagem, que visa mensurar com que velocidade os custos tendem a cair dado o aumento de capacidade acumulada, o resultado foi de 18%, ou seja, cada vez que a produção acumulada dobra, os custos reduzem em 18%. Em outro estudo, IEA (2014) estima que entre 2010 e 2025 haverá decréscimo de mais de 40% do custo de instalação dos sistemas fotovoltaicos. Para o Brasil, as perspectivas de redução de custo seguem a mesma tendência internacional de queda nos custos (EPE, 2012).

## **2.6 Perspectivas mercadológicas**

Após o potencial de geração de energia ser estimado Figura 2 é necessário saber o percentual que pode ser transferido das unidades de geração para o sistema de transmissão. Segundo Zilles et al. (2012), a comparação indica um percentual de exportação à rede de aproximadamente 64% para uma residência, já para o setor comercial supõe-se que o consumo seja mais simultâneo à geração, adotando-se uma compensação de 10% apenas.

Entretanto, depois de estimado o potencial de geração e de oferta por parte das unidades descentralizadas, o próximo passo é definir a magnitude desse mercado. Devido aos altos custos dos sistemas fotovoltaicos, arroga-se que apenas consumidores com alto poder aquisitivo poderão realizar o investimento necessário, pelo menos enquanto os custos de instalação não decrescerem. Segundo Francisco (2010) existe uma alta correlação entre consumo de eletricidade mensal por domicílio e faixa elevada de renda.

No que se refere ao processo de difusão da tecnologia entre os consumidores, por ser uma inovação descontínua e exigir uma mudança por parte dos consumidores, Rogers (1995) descreve a distribuição de adoção como uma curva em formato de sino, que pode ser dividida em cinco grupos: inovadores, adeptos iniciais, maioria inicial de adeptos, maioria tardia de adeptos e retardatários. O processo de difusão tecnológica é puxado pelos inovadores e adeptos iniciais, que usualmente representam 2,5% e 13,5% das adoções, respectivamente. Os adeptos iniciais são geralmente também líderes de opinião capazes de catalisar as taxas de adoção de forma significativa, incentivando a maioria inicial a optar pela tecnologia. A partir de então, gradualmente entram em cena a maioria inicial tardia e por fim os retardatários.

Para Guidolin e Mortarino (2010), a adoção de um sistema fotovoltaico é um complexo processo de decisão requerendo um grau de informação que o consumidor médio não dispõe. Segundo Jager (2006), nos primeiros estágios de adoção da tecnologia os consumidores não possuem a informação completa e irão, no curto prazo, experimentar percepções negativas em termos de investimento financeiro e procedimentos administrativos, enquanto a percepção positiva associada ao processo de compra é posterior e mais abstrata. Islam e Meade (2013) realizaram experimentos de escolha discreta para mensurar a intenção de adoção de sistemas fotovoltaicos em residências em Ontário no Canadá, o estudo concluiu que são parâmetros relevantes para a escolha na amostra: redução de custos de instalação e economia de energia em contraste com o aumento dos preços dos combustíveis fósseis.

## **2.7 Perspectivas Institucionais**

Existe um vasto portfólio de produtos renováveis, alguns dos quais são rentáveis e já competem facilmente no mercado. No entanto, todos enfrentam de alguma forma uma multiplicidade de barreiras econômicas e não econômicas. Diversos países já implantaram uma variedade de políticas públicas para promover a energia fotovoltaica, mas o aumento de escala necessário só pode ser alcançado através de uma abordagem mais eficaz e abrangente. Para que se promova efetivamente a energia fotovoltaica no Brasil é necessário um planejamento institucional de longo prazo, será apresentado os passos indicados para que esse planejamento acontece baseado no documento da IEA (2018).

A primeira etapa é realizada com o estabelecimento de metas, estabelece-las tem sido um dos principais motores da expansão de energia fotovoltaica em muitos países. As metas devem ser estabelecidas (e alcançadas) pelos governos nacionais, pelos órgãos de poder regional e pelas empresas, embora por si só não sejam suficientes, constituem um indicador importante da direção dos objetivos e, especialmente quando consagradas na legislação, podem proporcionar certo grau de segurança política aos investidores, trazendo a iniciativa privada a participação. As metas devem cobrir curto, médio e longo prazo, envolver outros setores (pesquisa, indústrias), serem institucionalizadas pela legislação e possuir um claro propósito (diminuir emissões de CO<sub>2</sub>, aumentar segurança energética, etc).

Após o estabelecimento de metas, o modo como elas devem ser atingidas deve ser definido em estratégias e planos de ação. Estas devem fornecer um roteiro para a implantação, com base numa avaliação dos recursos e reconhecendo o estado atual da situação e da implantação da geração fotovoltaica no país, os planos devem ser regularmente atualizados. As melhores práticas nessa fase seriam a identificação de barreiras e medidas para supera-las além do envolvimento de todos os setores da sociedade.

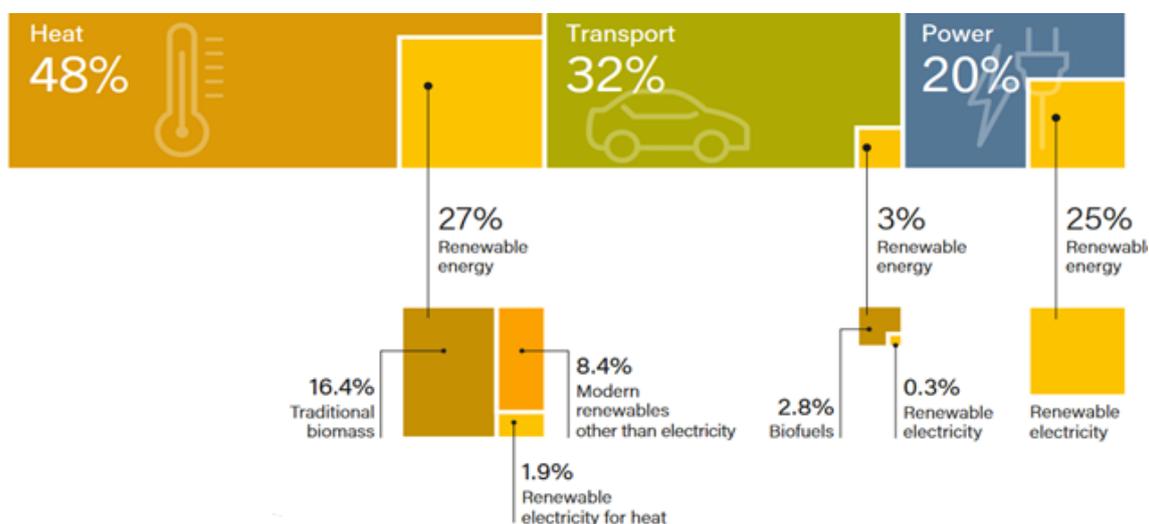
O terceiro passo se refere aos bancos de dados sobre o setor fotovoltaico no país. Uma vez que metas e estratégias devem ser sustentadas por bons dados é missão dos governos produzir e publicar dados sobre o setor e como ele se coloca em relação aos dados internacionais.

O próximo passo é o acompanhamento e avaliação das políticas de incentivo. Com a melhoria dos dados agora é possível acompanhar o progresso realizado e avaliar a eficácia das políticas e medidas realizadas. As avaliações regulares podem ajudar a garantir que a implantação da energia fotovoltaica no país é tão rentável quanto mostravam estudos na fase de planejamento, bem como tomar medidas corretivas em relação a políticas sem resultado.

Após esse planejamento mais generalizado, também deve-se tomar medidas específicas em relação as características do próprio setor. É vital que as políticas de incentivo à energia fotovoltaica criem condições equitativas dentro do mercado de energia. A geração fotovoltaica, por exemplo, traz benefícios que não são necessariamente precificados, como a redução da poluição atmosférica ou maior segurança energética através da utilização de recursos locais. Em alguns países, os subsídios aos combustíveis fósseis podem distorcer o mercado e pode haver uma falta de transparência sobre como os preços da energia são definidos (por exemplo, como subsídios e encargos são distribuídos).

Embora importante, apenas a geração de energia não é capaz de atingir metas robustas, diversos setores como transporte e aquecimento podem trazer maior contribuição global para o mercado de fotovoltaicos, por exemplo, além de diminuir as emissões através de seus veículos, trazem oportunidade de balancear a geração ao longo do dia ao utilizar as baterias dos veículos para armazenamento nas horas de pico de geração. A Figura 4 demonstra a participação mundial de fontes renováveis em setores como transporte e geração de energia e o quanto ainda há espaço para evoluções.

Figura 4 Participação de renováveis no consumo final de energia, por setor, 2015



Fonte: IEA (2018)

De forma mais específica, podemos citar de qual forma as políticas públicas podem ser direcionadas para melhor aproveitamento de energia fotovoltaica no Brasil.

- Apoio à inovação

Enquanto muitas energias renováveis se tornaram comuns, ainda existem algumas tecnologias que estão mais distantes do mercado e de um número dos desafios tecnológicos permanecem. Mesmo para as tecnologias estabelecidas, há margem de manobra para a inovação contínua e é necessário adaptar as tecnologias às circunstâncias locais. As atividades de pesquisa e desenvolvimento são também uma forma importante de construir um setor fotovoltaico nacional e independente do mercado externo, principalmente porque há uma dependência grande da China.

- Remuneração adequada

Como já visto, os custos nivelados da geração fotovoltaica diminuíram drasticamente nos últimos anos. No entanto, esse setor ainda necessita de algum tipo de apoio financeiro, especialmente porque a maioria dos países não precificam o carbono de forma eficaz e existem outras barreiras como custos de capital elevados.

O apoio financeiro pode ser particularmente necessário para as fases iniciais do destaque num país, uma vez que os custos da implantação inicial tendem a ser mais elevados devido à ausência de cadeias de abastecimento locais. Além disso, o

investimento é frequentemente considerado mais arriscado, aumentando os custos financeiros. Ao mesmo tempo, o governo precisa assegurar que o apoio ao setor não seja excessivo e prejudicial à competitividade, por exemplo, uma vez que os custos baixam, os incentivos vão sendo retirados.

## **2.8 Barreiras encontradas no Brasil**

Os autores Garlet et al. (2019) descrevem as barreiras à adoção da geração distribuída de energia fotovoltaica no Brasil, apesar de um diferente método (questionário), o trabalho ajuda a estender as barreiras relatadas anteriormente, mas provenientes de países desenvolvidos, para o Brasil. Após a coleta dos resultados os autores também dividem as barreiras de acordo com as dimensões técnica, econômica, social, de gestão e política.

No que se refere à dimensão técnica, embora a tecnologia fotovoltaica tenha avançado significativamente nas últimas décadas os entrevistados relataram a falta de uma maior sustentabilidade institucional, por exemplo, normas técnicas sobre a durabilidade do sistema (FERON, 2016), A falta dessa regulamentação é um fator de limitação dos entrevistados, um exemplo seria a regulamentação de pré-requisitos, mesmo sistemas fotovoltaicos possuindo longa durabilidade (por volta de vinte anos), como qualquer sistema, sua longevidade pode ser significativamente influenciada pela má qualidade (RODRIGUES ET AL., 2016). Na prática, isso poderia ser solucionado através de portarias e resoluções tanto da Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) quanto do INMETRO, por exemplo, os materiais que podem ser usados para o desenvolvimento do sistema fotovoltaico devem ser analisados para que se habilite no mercado apenas aqueles com qualidade superior (OBEIDAT, 2018).

Além disso, como a energia do painel depende de sua eficiência, potência, número de painéis e recursos solares, os usuários finais precisam entender como gerenciar o sistema cuidadosamente, entendendo suas limitações e evitando danos, uma vez que muitas falhas são causadas por consumo de energia excessivo ou negligência do usuário. Obeidat (2018) afirmou que os defeitos do material são uma das as principais causas de falha do dispositivo, esses defeitos são potencializados por energia de campos elétricos, altas densidades de corrente, temperatura, aumentos e tensões nas interfaces da camada de material, etc.

Outro fator limitante da difusão da distribuição da geração distribuída de energia fotovoltaica no do Brasil refere-se às instalações de sistemas realizadas sem acompanhamento profissional. Falta de conhecimento das tecnologias avançadas e de mão-de-obra qualificada resultam em problemas associados com a implementação e manutenção de projetos de energia renovável (MANJU E SAGAR, 2017). Além disso, uma vez que estas instalações são feitas em áreas já conectadas à rede, o cenário favorece o “amadorismo” já que se houver irresponsabilidade na instalação e manutenção o consumidor pode usar a energia principal da rede (KARAKAYA E SRIWANNAWIT, 2015).

Outras barreiras técnicas levantadas pelos entrevistados são intermitência da geração de energia, uma falta de conhecimento sobre orientação solar das casas e a arquitetura dos telhados. Uma vez que a exposição é um requisito básico para o funcionamento correto dos sistemas fotovoltaicos, uma operação afetada por diferentes variáveis climáticas pode sofrer como resultado queda de eficiência na energia gerada (BOUTASSETA ET AL., 2018).

Karakaya & Sriwannawit (2015) afirmam que, para as zonas urbanas, a superfície para a integração dos painéis fotovoltaicos no telhado é muito limitada em construções antigas. No entanto, através de políticas, é possível incentivar o planejamento e a concepção de novos edifícios com sistemas fotovoltaicos integrados na sua estrutura para maximizar o espaço de instalação.

Já em relação à dimensão econômica, em consonância com os estudos do exterior, o custo inicial de um sistema fotovoltaico inclui altos valores e, portanto, representa uma barreira. Além disso, o fato do projeto possuir um longo *payback* também é uma barreira importante. Considerando os elevados custos de investimentos, o retorno dos investimentos pode durar muito tempo, tornando a utilização da energia fotovoltaica financeiramente inviável (ZHANG, SONG E HAMORI, 2011)

O imposto sobre a circulação de mercadorias e serviços (ICMS) foi outro aspecto econômico associado à limitação da adoção da tecnologia fotovoltaica, pois compromete o desempenho das indústrias locais e dificulta o avanço de novos negócios. Além disso, a taxa de utilização do serviço de distribuição (TUSD) é vista como barreira pelos entrevistados, uma vez que o montante determinado pela ANEEL para

efetuar o faturamento mensal de usuários de o sistema de distribuição de eletricidade pode inviabilizar o retorno.

Outra dimensão analisada pelos autores é a social. A cultura do consumo é vista como uma variável que influencia na difusão da tecnologia fotovoltaica no Brasil, já que a população se sente insegura quanto à confiabilidade deste tipo de geração de eletricidade e já está adaptada em receber a eletricidade da rede sem ter que fazer um grande investimento, medidas que interrompam essa inércia seriam essenciais. Além disso, a conscientização de pessoas físicas e jurídicas não é fortemente preocupada com o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável (BRUM ROSA ET AL. 2016). Düştegör et al. (2018) argumentou que o medo de experimentar algo e não possuir conhecimento suficiente sobre algo é um fator que impede as pessoas de dar um passo em direção mudança. Isso destaca a importância de dedicar esforços para levar campanhas educativas com o objetivo de fornecer informações claras aos consumidores sobre os benefícios ambientais das energias renováveis, aumentando a sua consciência.

A compra de um sistema fotovoltaico é uma decisão de alto envolvimento, em que os potenciais adotantes geralmente investem tempo e consideração antes de tomar uma decisão (JAGER 2006). Devido à complexidade da tomada decisão as pessoas acham complexo obter informações completas sobre o assunto, pois há vários fatores envolvidos na tomada de decisão (PALM 2018). A dificuldade em encontrar informações confiáveis sobre a micro geração é, portanto, um grande obstáculo à adoção, apesar dos esforços dos grupos de interesse governamentais e de micro geração para reduzir essa barreira (BALCOMBE ET AL. 2013).

Uma dimensão abordada pelos autores e que não havia sido citada anteriormente é a dimensão da gestão, especialmente por se tratar em como esse mercado se organiza no Brasil, nesse caso, nas relações entre consumidores e fornecedores.

Uma gestão inadequada pode dificultar processo de difusão da inovação em uma variedade de contextos. Um serviço de pós-venda fraco ou negligenciado prestado pelas empresas que instalam sistemas fotovoltaicos é uma importante barreira gerencial para a difusão de tecnologia no país. Há um grande problema em relação à existência de pessoas inexperientes realizando a instalação desses sistemas, o principal problema é que as empresas visam apenas a venda do produto, sem oferecer serviços de manutenção confiáveis e adequados. Isso representa um desafio para os custos e qualificação de mão de obra para gerenciar e garantir a sustentabilidade do sistema.

Islam and Meade (2013) argumentaram que a informação e o conhecimento, através de abordagens de marketing eficazes e campanhas educativas, são mais propensos a acelerar a conservação de energia e difusão comportamento das tecnologias renováveis.

No que se refere à dimensão política, devido aos altos preços dos equipamentos e instalações, os sistemas fotovoltaicos geralmente não são rentáveis sem o apoio de políticas em vários países. Assim, as ações do governo para facilitar o processo de criação de negócios neste segmento são de vital importância para a rápida difusão desta inovação (FARIA ET AL. 2017). No entanto, a instabilidade política que existe no Brasil, pode levar ao fraco desempenho do setor elétrico como um todo, devido a restrições práticas para se levar a cabo reformas profundas no setor de energia.

### **2.9 Políticas de incentivo vigentes e outras recomendações**

Como já dito anteriormente, a norma regulamentar nº 482/2012 da ANEEL pode ser considerada o marco regulatório inicial da geração distribuída no Brasil, foi a partir da implementação do “sistema de medição líquida” que se abriram novas possibilidades para os consumidores do país.

Para fins de conceito, o Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE) estabelece que Geração Distribuída é a geração elétrica feita próximo do (s) consumidor (es), independente da tecnologia e fonte de energia.

A geração distribuída contempla: cooperadores; geradores que utilizam resíduos de combustíveis como fonte de energia; geradores de emergência; geradores para operação em horários de pico; painéis fotovoltaicos; pequenas turbinas eólicas; e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) (INEE, 2014).

O ponto de partida para o processo de inclusão da energia fotovoltaica na matriz energética brasileira foi a Chamada de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) Nº 13 da ANEEL, de agosto de 2011, que promoveu a instalação de usinas solares fotovoltaicas de 0,5 MWp a 3 MWp e de estações solarimétricas para a análise do desempenho técnico-econômico dos projetos. O projeto estimulava os proponentes a se associarem com agentes difusores de conhecimento, com intercâmbio com universidades, institutos de pesquisa e especialistas internacionais. O objetivo era analisar as melhores tecnologias disponíveis, os impactos na rede elétrica e a necessidade de ajustes fiscais e financeiros para inserir essa fonte na matriz elétrica brasileira (ANEEL, 2017).

A resolução nº 482/2012 estabeleceu condições gerais de acesso do micro geração distribuída (até 100,0 kW) e da mini geração (entre 100,0 kW e 1.000,0 kW) aos sistemas de distribuição de energia elétrica; e também sua regulação, ao implementar o sistema de medição líquida (ANEEL, 2017). Segundo esse mecanismo, a energia excedente é transferida para a distribuidora local e, em seguida, compensada no consumo de energia elétrica da mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma propriedade (mesmo Cadastro Individual - CPF, ou Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas - CNPJ). Assim, o saldo positivo de um mês seria utilizado para reduzir o consumo em outro ponto, ou na fatura do mês seguinte (MME, 2015). Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), os créditos de energia gerados teriam validade de 36 meses, o processo promove apenas a troca de kWh entre um produtor-consumidor (prosumidor) e a distribuidora, não envolvendo qualquer tipo de remuneração.

Em 2015, a RN nº 687/2015 da ANEEL definiu novas regras. Os limites para mini geração (até 75,0 kW) e micro geração (entre 75,0 kW e 5.000,0 kW; e até 3.000,0 kW para pequenas centrais hidroelétricas) foram alterados. As modalidades de mini e micro geração podem agora incluir propriedades individuais, condomínios e cooperativas. O "autoconsumo remoto" é definido quando a quantidade de energia gerada em um determinado mês é superior à energia consumida, e o consumidor fica com os créditos, cuja data de vencimento aumentou de 36 meses para 60 meses. Também foi criado o conceito de geração compartilhada, que consiste em uma associação de consumidores dentro de uma mesma área de concessão, através de um consórcio ou cooperativa, composta por pessoas físicas ou jurídicas que possuem unidades consumidoras com micro ou mini geração distribuídas em locais diferentes das unidades consumidoras nas quais o excesso de energia será compensado (ANEEL, 2015).

Foi também a partir da resolução nº 687/2015 que houve um aumento na implantação de novos sistemas de geração distribuída, possibilitando novos modelos de negócio, como o serviço solar, o Contrato de Aquisição de Energia (CAE), as ações solares e o aluguel de telhados e condomínios solares. Outro fator muito importante é que desde 2015 houve um aumento significativo nas tarifas de energia elétrica devido a não aprovação da Medida Provisória (MP) nº 579/2012, que inicialmente visava à redução obrigatória da tarifa elétrica, a medida acabou gerando um

endividamento generalizado dos distribuidores. Com o aumento de preços da energia elétrica, muito consumidores podem ter sido influenciados a adotar geração distribuída para se protegerem contra a flutuação dos preços da energia.

Como no Brasil, com o sistema de medição líquida, a energia gerada tem o mesmo valor que a energia consumida, o retorno financeiro é melhor para aqueles que pagam taxas mais caras, normalmente consumidores residenciais e comerciais de baixa tensão. Dessa forma, a atratividade financeira dos investimentos de geração distribuída tem aumentado especialmente neste segmento (FARIA, TRIGOSO, CAVALCANTI, 2017)

Em relação aos marcos regulatórios, o Governo federal vem adotando algumas ações de incentivo à expansão da geração distribuída, o que também tem contribuído para um crescimento do mercado de energia fotovoltaica.

Entre 2014 e 2016, entraram em operação os parques fotovoltaicos da chamada pública nº 013/2011 - Projetos Estratégicos: "Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira" (24,6 MW contratados, custando R\$ 396 milhões).

Em relação a benefícios fiscais, houve isenção de Impostos sobre Produtos Industrializados (IPI), de acordo com o Decreto 7.212, de 15/06/2010, estão imunes ao IPI, energia elétrica, derivados de petróleo, combustíveis e minerais. Isenção de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), há isenção do ICMS para operações com equipamentos e componentes para o uso de energia solar e eólica, válido até 31/12/2021. Resolução Normativa nº 481/2012 ANEEL, ampliou para 80% o desconto da taxa do Uso do Sistema de Transmissão e da Taxa de Uso do Sistema de Distribuição para projetos com potência inferior a 30 MW (FARIA, TRIGOSO, CAVALCANTI, 2017)

A isenção de ICMS, PIS e COFINS sobre a geração distribuída. O imposto incide apenas sobre o excedente que ele consome da rede, e para instalações de menos de 1 MW. No entanto, diversos insumos, componentes e equipamentos necessários à fabricação desses produtos em território nacional ainda não estão contemplados pelo PADIS. É necessário revisar as tabelas de códigos de produtos do setor fotovoltaico e incluir nos benefícios do PADIS outros itens prioritários para a cadeia produtiva nacional (ANEEL, 2017).

Pela lei 13.203 de 8/12/2015, o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social foi autorizado a financiar, a taxas diferenciadas, os projetos de geração distribuída em hospitais e escolas públicas.

Foi criado o fundo *Inova Energy Plan*, de R\$ 3 bilhões, pelo BNDES, Financiador de Estudos e Projetos (FINEP) e pela ANEEL, voltado à iniciativa privada e com o objetivo de pesquisa e inovação tecnológica nas áreas de: redes inteligentes de energia elétrica, linhas de transmissão de alta tensão de longa distância, energias alternativas, como solar e eficiência de veículos elétricos.

Em resumo, as políticas públicas brasileiras de incentivo à adoção dessa tecnologia são baseadas em um tripé de isenções fiscais e tributárias, incentivos financeiros e criação de demanda. Os incentivos financeiros são baseados em linhas de financiamento a taxas de juros reduzidas e prazo longo para a compra de equipamentos de empresas cadastradas no FINAME que cumprirem os requisitos de conteúdo nacional e se comprometerem a elevar o percentual de conteúdo nacional segundo critérios flexíveis e bem definidos ao longo do tempo. Entretanto, para pessoas físicas, que compõem a grande maioria dos consumidores residenciais do país, a linha disponível que mais se aproxima do ideal é a do programa Construcard, dedicada a reformas imobiliárias e operada pela Caixa Econômica Federal. Apesar de ter prazos adequados (de 94 a 220 meses, com seis meses de carência), os custos financeiros são demasiadamente elevados para projetos fotovoltaicos, cerca de 20% ao ano, contra menos de 8% ao ano disponível para a geração centralizada (FARIA, TRIGOSO, CAVALCANTI, 2017).

A criação de demanda, embora seja feita pelo Estado e focada em usinas centralizadas de geração, acabam por fornecer o estímulo inicial e segurança institucional para os primeiros empreendimentos voltados a esse tipo de geração como para atrair investimentos em projetos e fomentar o desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional. Em outubro de 2014, o 6º Leilão de Energia de Reserva (LER/2014) resultou na contratação de 889,7 MW (1.048 MWp ou 202,3 MW médios) em projetos de energia solar fotovoltaica. Com um preço médio de R\$ 215,12/MWh, o leilão teve deságio de 17,89% frente ao preço-teto de R\$ 262/MWh estabelecido pelo governo. O Quadro 2 sumariza as discussões levantadas até aqui.

Quadro 2 Comparação entre barreiras e políticas adotadas

Barreiras	Políticas
Regulações institucionais que tragam segurança ao investidor	Norma regulamentar nº 482/2012 da ANEEL
Normas técnicas de qualidade dos sistemas fotovoltaicos	Obrigatório o registro do produto junto ao INMETRO, que autoriza o uso do selo de identificação da conformidade - a Etiqueta Nacional de Energia - e a comercialização do objeto
Acompanhamento profissional/conscientização do usuário	Ação do mercado
Custo excessivo/linhas de crédito especializadas	Programa para o Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) com isenção de ICMS e PIS/COFINS sobre a comercialização da energia e redução do imposto de importação sobre bens de capital destinados à produção de equipamentos de geração solar fotovoltaica
Complexidade na tomada de decisão	Ação do mercado
Conscientização sobre sustentabilidade na sociedade	Ação do mercado
Falta de pós-venda/marketing e propaganda	Ação do mercado
Subsídios para o setor ser rentável	Programa para o Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) - com taxas diferenciadas o BNDES apoiará projetos de eficiência energética e de geração distribuída por fontes renováveis em escolas e hospitais públicos  Desconto da taxa do Uso do Sistema de Transmissão e da Taxa de Uso do Sistema de Distribuição

	Criação do fundo Inova Energy Plan
--	------------------------------------

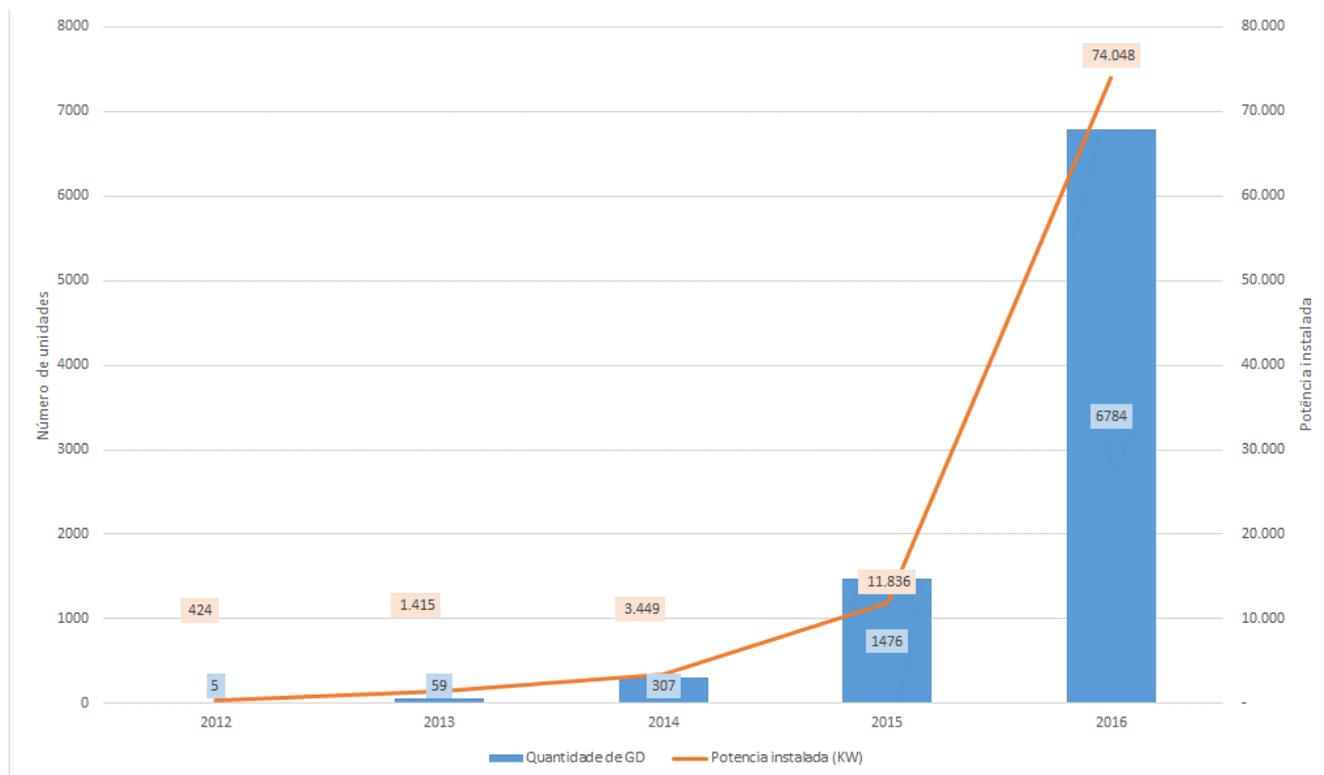
Fonte: desenvolvida pelo autor

### **2.10 Evolução nos anos recentes**

Após as mudanças regulatórias, a ANEEL estima que o Brasil terá cerca 1.230.000 micro e mini geração distribuídas instalações até 2024, o que equivaleria a 4.500,0 MW de capacidade instalada. Isso representa um enorme crescimento, ilustrando a importância de um marco regulatório adequado para o desenvolvimento do mercado fotovoltaico no Brasil (ANEEL, 2017) os gráficos e tabela abaixo servem para justificar o estudo bem como mostrar onde se encontram as unidades fotovoltaicas de geração distribuída no país.

A Tabela 1 e Figura 5 mostram a grande evolução no período estudado. Aparentemente sem informações e regulação suficiente nos anos iniciais, o número avança significativamente incentivado pela regulação do setor, também podem ser indicados as quedas de preço dos módulos fotovoltaicos e o aumento do preço da energia elétrica.

Figura 5 Total de unidades e potência de geração distribuída no Brasil 2012-2016



Fonte:Desenvolvida pelo autor

Tabela 1 - Total de unidades e potência de geração distribuída no Brasil 2012-2016

Ano	Quantidade de GD	Unidades consumidoras	Potência instalada (KW)
2012	5	5	423.94
2013	59	73	1,415.16
2014	307	334	3,448.68
2015	1476	1754	11,836.42
2016	6784	7745	74,048.16
Total	8631	9911	91172.36

Fonte: desenvolvida pelo autor

Em relação ao tipo de geração distribuída, a participação da radiação solar é responsável pela quase totalidade de unidades cadastradas, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 Energia distribuída no país por fonte

Tipo	Quantidade de GD	Unidades consumidoras	Potência instalada (KW)
CGH (Hidráulica)	11	25	5.455,50
EOL (Eólica)	46	61	5.168,10
UFV (Solar)	8,535	9,683	67.832,28

UTE (Biogás)	39	142	12.716,48
Total	8631	9911	91.172,36

Fonte: desenvolvida pelo autor

No que se refere à localização das unidades, segundo a Tabela 3, a grande maioria é gerada no mesmo local aonde é consumida, seguida de autoconsumo remoto (geração no ponto A, mas consumo no ponto B) e a geração compartilhada, apesar de ser introduzida há alguns anos para abrir possibilidade de participação de condomínios de energia, ainda não mostra resultados muito expressivos.

Tabela 3 Localização do uso da energia gerada nas unidades de geração distribuída

Modalidade	Quantidade de GD	Unidades consumidoras	Potência instalada (KW)
Autoconsumo remoto	739	1943	20.204,01
Geração compartilhada	24	100	3.615,47
Geração na própria localidade	7,868	7,868	67.352,88
Total	8631	9911	91.172,36

Fonte: desenvolvida pelo autor

Outro dado importante é o uso da energia gerada, a Tabela 4 demonstra que mais uma vez a expressiva participação de unidades residências como principal destino.

Tabela 4 Uso final energia gerada por geração distribuída no Brasil

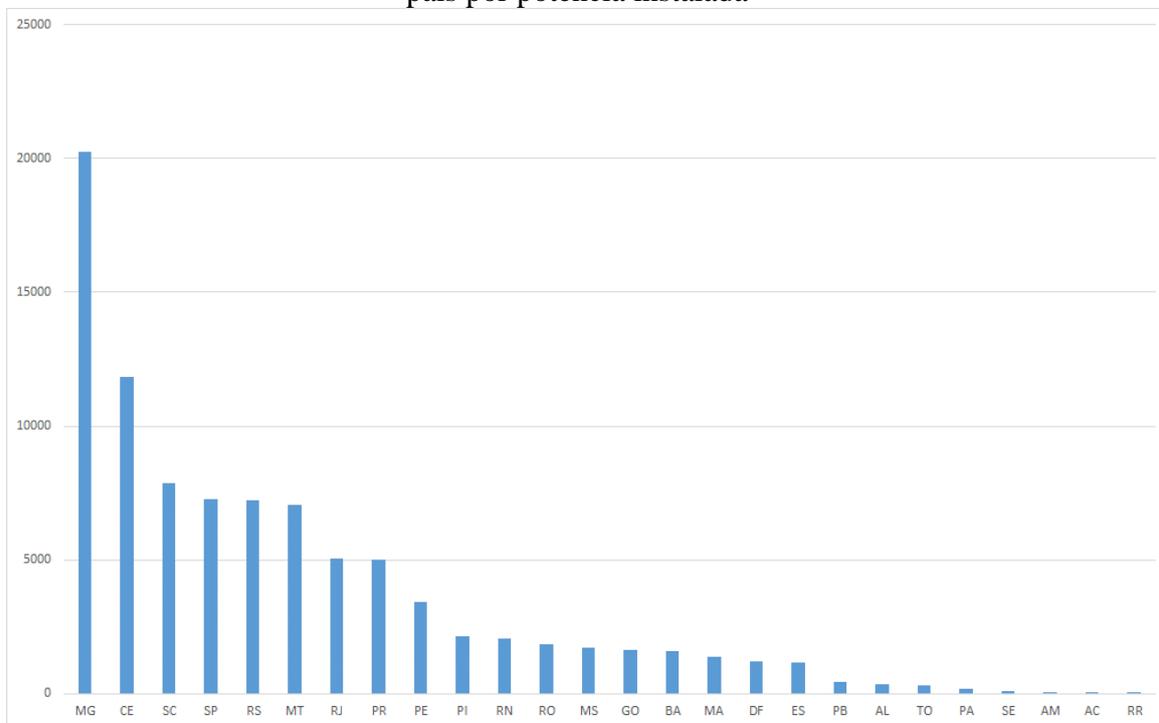
Tipo	Quantidade de GD	Unidades consumidoras	Potência instalada (KW)
Comercial	1399	1793	37.329,67
Iluminação pública	4	4	30,20
Industrial	200	228	16.191,46
Poder público	86	131	3.543,48
Residencial	6470	7430	25.270,07
Rural	179	302	8.374,78
Serviço público	23	23	432,70
Total	8361	9911	91.172,36

Fonte: desenvolvida pelo autor

Um dos dados mais interessantes pode ser visto nas Figura 6 e

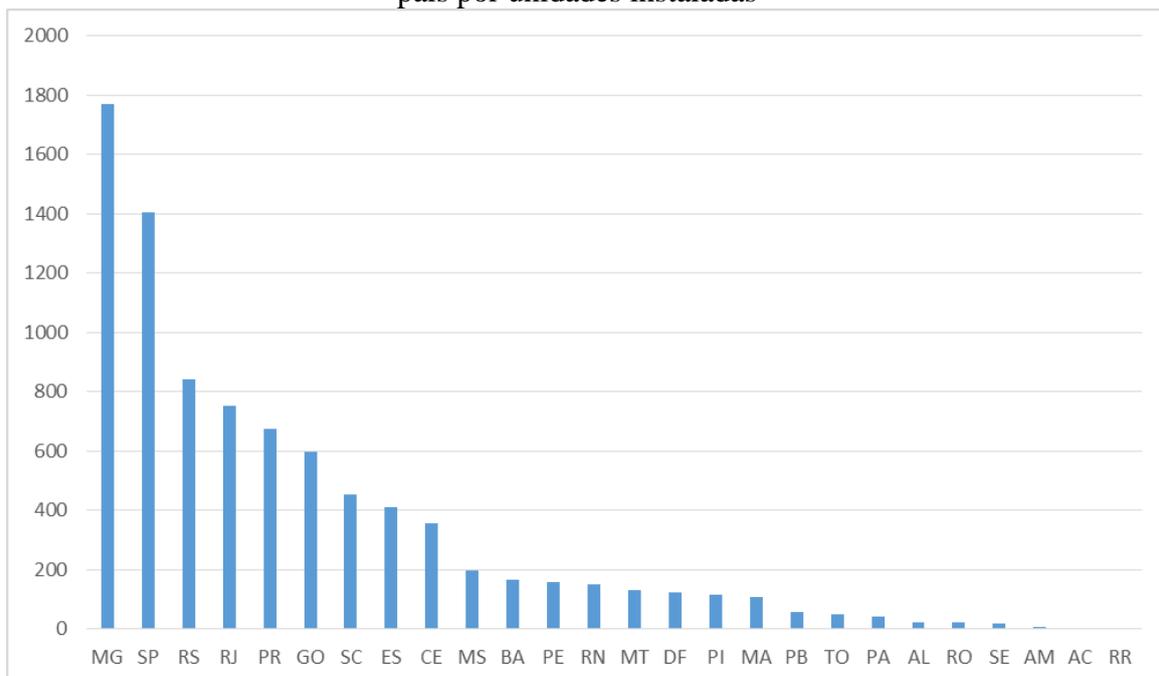
Figura 7, que descrevem o número acumulado de unidade e também de potência instaladas de geração distribuídas nos estados brasileiros.

Figura 6 Distribuição por unidade da federação das unidades de geração distribuídas no país por potência instalada



Fonte: desenvolvida pelo autor

Figura 7 Distribuição por unidade da federação das unidades de geração distribuídas no país por unidades instaladas



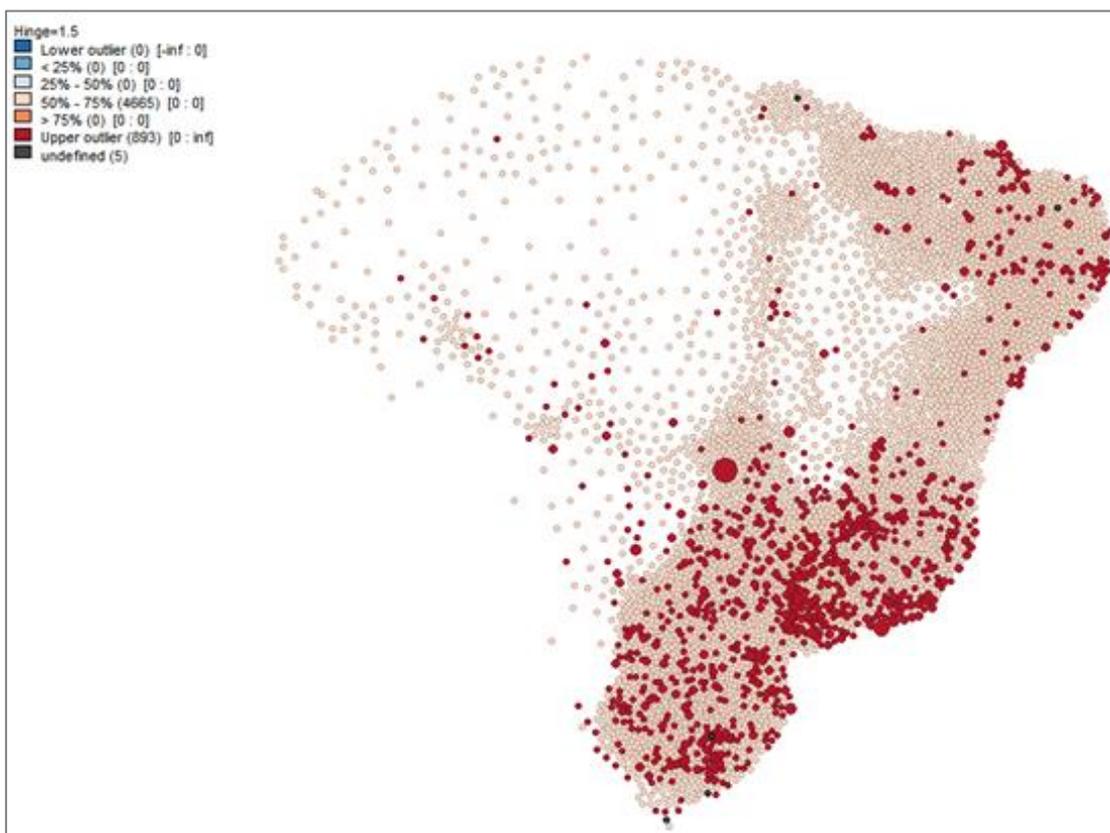
Fonte: desenvolvida pelo autor

O Estado de Minas Gerais lidera o crescimento quantitativo dos sistemas de energia solar fotovoltaica instalados, seguido por São Paulo e Rio Grande do Sul, conforme a Figura 7. A posição de liderança de Minas Gerais pode ser creditada a vários fatores: ter uma das dez tarifas de energia mais caras do país, em torno de R \$ 0,82 / kWh; baixos níveis de reservatórios hidrelétricos devido à persistente (crise hidrológica); altos impostos cobrados; e índices de radiação solar semelhantes aos os da região Nordeste (4,5 a 6,5 kWh / m<sup>2</sup>), além de baixa nebulosidade.

Além disso, é interessante notar um bom desempenho dos estados da região Sul do país, mesmo tendo menor irradiação solar. No caso dos estados de Santa Catarina e Paraná, existem projetos implementados pelos distribuidores CELESC e LASTEC, respectivamente. No Estado do Rio de Janeiro há uma concentração de empresas fotovoltaicas e um alto índice de radiação solar. No Estado de São Paulo existem três distribuidores e uma tarifa elétrica alta. A Bahia tem condições extremamente favoráveis para a energia solar fotovoltaica, é localizado próximo ao Equador, tem isenção de ICMS, PIS e COFINS, e possui um dos maiores índices de irradiação solar (4,5 a 6,1 kWh / m<sup>2</sup>) com baixa diferenciação; no entanto, situa-se no 11º lugar entre os estados que possuem energia solar sistemas DG fotovoltaicos instalados.

Por fim, a Figura 8 ilustra o mapa brasileiro desenhado a partir dos municípios e sua quantidade de painéis fotovoltaicos, apresentado uma melhor forma de observar a concentração das instalações.

Figura 8 Distribuição dos painéis fotovoltaicos no Brasil por município



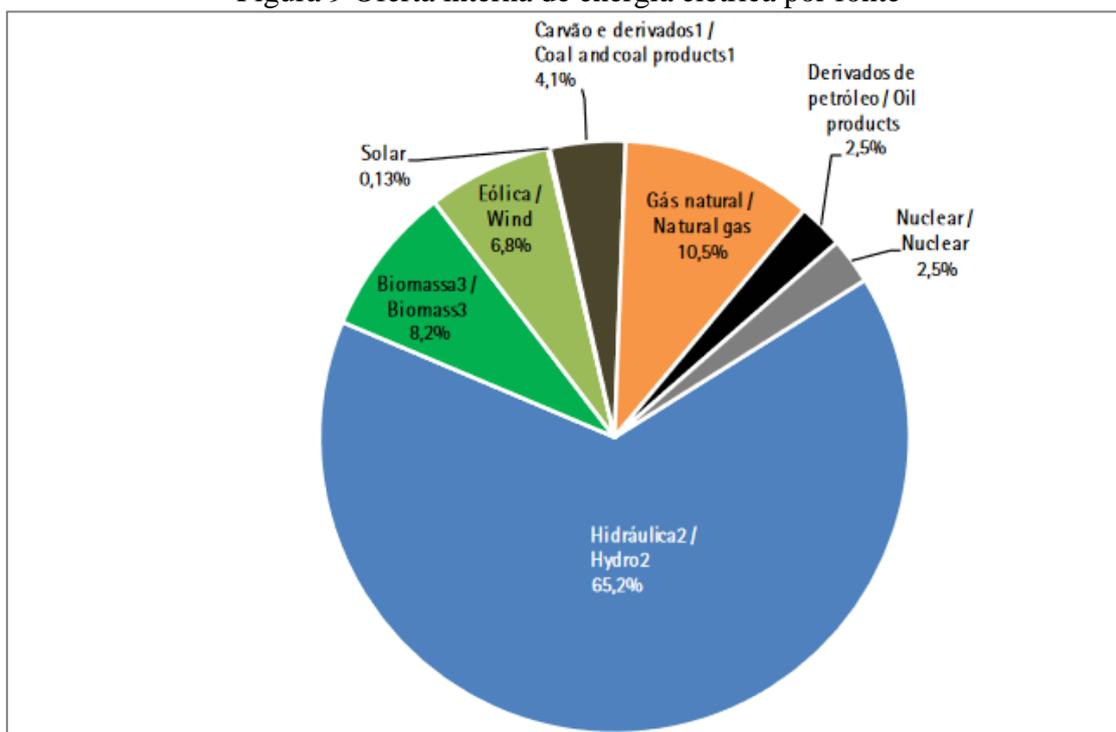
Fonte: Desenvolvida pelo autor

### 2.11 Realidade brasileira e o contexto mundial

Com grande acesso a informação, facilidade de realizar benchmarking e com números tão expressivos de outros países como a China e Alemanha, pode-se perguntar se o Brasil perde oportunidades ao não explorar seu grande potencial solar ou mesmo se há atraso em incentivos e políticas públicas. Esse questionamento é mais complexo e não possui uma resposta, entretanto, embora o país não esteja na vanguarda atual de investimentos e adoção da tecnologia fotovoltaica pode ser considerado uma liderança em sustentabilidade e ocupa posições chaves em diversos setores.

Por exemplo, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 65,2% da oferta interna. No total, fontes renováveis representam 80,4% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável. A Figura 9 ilustra melhor a posição de destaque que o Brasil tem internacionalmente pelo seu portfólio sustentável de geração elétrica.

Figura 9 Oferta interna de energia elétrica por fonte

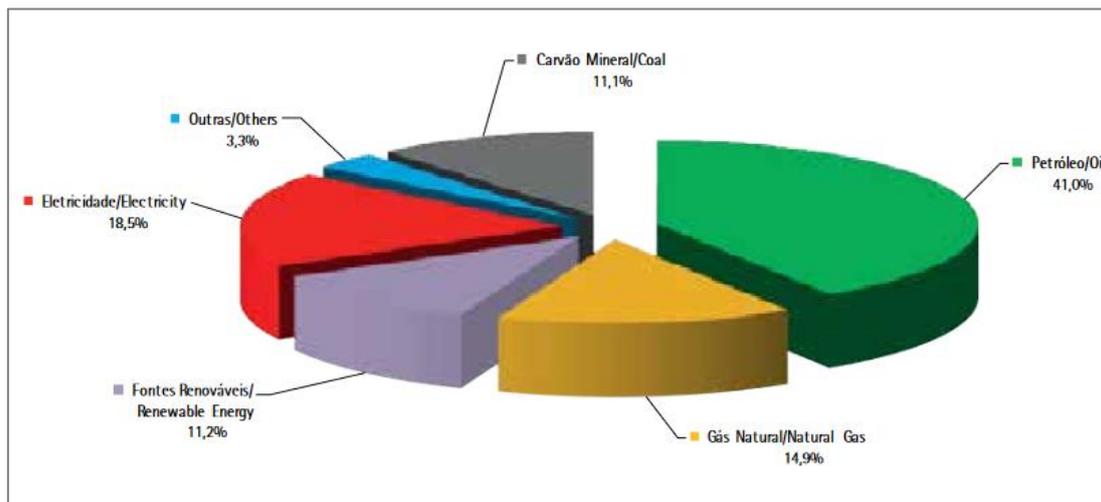


Fonte: EPE (2018)

Nesse sentido, ao compararmos o Brasil com outros países, podemos concluir que o país está na vanguarda no progresso nessa área. Embora para o ano de 2050 vários países têm como meta 100% de energia elétrica renovável, alguns países como Espanha, Itália, Japão e China tem metas em torno de 30%, a Alemanha tem para o ano de 2050 uma meta de 80% de energia elétrica originária de fontes renováveis, algo que o Brasil já alcançou.

Entretanto, ao analisar o consumo final por fonte de energia no Brasil, na Figura 10, para o ano de 2014 ainda há muito a ser feito, principalmente porque a principal fonte se torna o petróleo.

Figura 10 Consumo final de energia por fonte



Fonte: EPE (2018)

Em linhas gerais, o que se pode dizer é que o Brasil é um país com referência internacional em energia renovável, com uma grande parcela renovável em geração de energia elétrica e também no consumo final. O questionamento que se faz é se o Brasil quer e deve chegar ao nível de painéis fotovoltaicos de líderes internacionais, uma vez que pode satisfazer sua demanda também com outras fontes renováveis.

De toda forma, pode-se pesar por uma diversificação desse portfólio, visto que a matriz de geração elétrica é muito dependente de bons regimes hídricos. Outra oportunidade surge no consumo final de energia, tomando como exemplo o carro elétrico, uma vez que esse automóvel utilize energia elétrica, mais limpa, e que essa energia tenha sido gerada também de forma limpa, o Brasil abre caminho para todos os setores da sociedade serem exemplos mundiais.

## 2.12 Determinantes

### 2.12.1 Determinantes Regionais

As determinantes a seguir foram classificadas por sua capacidade de atuar geograficamente, seja porque a radiação solar é um fator natural, sem controle, ou porque o efeito de pares necessita de proximidade geográfica.

A dependência espacial também pode ser impulsionada pelos efeitos de transbordamento regionais: Se esses sistemas fotovoltaicos são altamente visíveis para o público, pesquisas anteriores sugerem que as taxas de adoção estão sujeitas a efeitos semelhantes (BOLLINGER E GILLINGHAM, 2012; ROBINSON E RAI, 2015).

Estudos em geografia regional indicaram que a dependência espacial influencia o desenvolvimento de regiões vizinhas. No caso de sistemas fotovoltaicos solares, pesquisas sugerem que semelhanças geográficas entre regiões vizinhas (por exemplo, radiação solar global) contribuem para o surgimento de "aglomerados solares".

O *peer effect*, também conhecido como efeito "imitação", "comportamento de manada" ou "interação social" ocorre quando o comportamento de um indivíduo é influenciado pelo comportamento de um grupo de referência (MANSKI, 1993). *Peer effect* podem ser categorizados em várias dimensões; uma distinção comumente feita é entre pares "ativos" e "passivos" (SCOTT E CARRINGTON, 2011). Os pares ativos envolvem indivíduos ou grupos que deliberadamente procuram convencer os outros; por exemplo, grupos de defesa solar (NOLL, 2014). Em contrapartida, os pares passivos são influenciados indiretamente (SCOTT E CARRINGTON, 2011). Um exemplo disso é quando um transeunte percebe um sistema painéis fotovoltaicos recém-instalado em sua vizinhança. Mesmo os *peer effects* sendo altamente localizados, eles podem contribuir para spillovers entre regiões adjacentes espacialmente, no caso em que a interação social ocorre através de fronteiras regionais.

Em estudos anteriores, *peer effects* foram destacados como um importante fator para os proprietários investirem em painéis fotovoltaicos (PALM, 2018). O autor escolheu analisar quais efeitos os pares, como parentes, amigos e vizinhos têm sobre a adoção de painéis fotovoltaicos. Os efeitos de pares que ele encontra são principalmente que os pares funcionam para confirmar que os sistemas fotovoltaicos são influenciados por esse círculo, ele também descobriu que os efeitos semelhantes ocorreram através de relações existentes e próximas em vez dos vizinhos que ainda não se conheciam.

A literatura supracitada fornece bases para a formulação da hipótese a ser avaliada na investigação proposta.

*H1: a adoção dos painéis fotovoltaicos é espacialmente correlacionada, logo, a adoção dessa tecnologia em uma área de uma localização dependerá da adoção dessa tecnologia pelos seus vizinhos.*

Estudos prévios demonstraram uma correlação positiva entre locais com altas taxas de radiação solar e a prevalência de energia solar nessas áreas (DORVLO E AMPRATWUM, 1998; TSOUTSOS ET AL, 2003; HANG ET AL., 2008; LAM ET AL., 2008). Áreas localizadas em locais com taxas mais altas de radiação solar são

propensos a possuir maior prevalência de instalações residenciais e fotovoltaicas comparadas com locais de menor insolação solar.

Dessa forma, a literatura consultada fornece bases para a formulação da hipótese a ser avaliada na investigação proposta.

*H2: Municípios com maior radiação solar tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.*

### **2.12.2 Determinantes ambientais**

As pessoas querem mostrar que são ambientalmente conscientes e se preocupam com problemas climáticos (PEDERSEN, 2000; HERÉN, 2009; SKILL, 2008). Além disso, muitas pessoas são motivadas a instalar os painéis pelo desejo de colaborar com o meio ambiente (CLAUDY; MICHELSEN; O'DRISCOLL, 2011; LEENHEER; DE NOOIJ; SHEIKH, 2011). Apesar desse desejo, vários estudos sugerem que há pouca intenção das famílias em pagar mais por essa melhoria (CLAUDY, MICHELSEN, O'DRISCOLL, 2011; WALTERS E WALSH, 2011; WIMBERLY, 2008; YAMAGUCHI ET. AL., 2013).

Embora as famílias possam ser motivadas pelo motivo ambiental, na consideração para adotar essa tecnologia, a decisão é mais frequentemente baseada em fatores financeiros do que ambiental (WIMBERLY, 2008; HACK, 2006; CLAUDY, PETERSON E O'DRISCOLL, 2013). Nessa mesma linha, outro fator relacionado ao meio ambiente como motivação para instalação é o desejo de demonstrar publicamente um compromisso ambiental para outras pessoas através de tecnologias que são visíveis fora da propriedade, como painéis solares ou turbinas eólicas (CAIRD E ROY, 2010; PALM E TEGNVARD, 2011). Outro estudo de Balcombe et al. (2013) sugere que os valores ambientais por si só não são suficientes para motivar a adoção de painéis fotovoltaicos.

De difícil captura com a base de dados disponível, essa variável justifica sua presença aqui pois é um fator muito relevantes. Em estudos internacionais, a captura dessa variável é feita a partir do número de votos em uma determinada região em um partido com fortes argumentos ambientais, embora seja possível a captura dos votos no Brasil, não acredita-se que os votos em um partido ambiental necessariamente capture a consciência ambiental, além da difícil identificação dos partidos em um cenário político muito pulverizado.

### 2.12.3 Determinantes econômicas

A aquisição de um painel fotovoltaico é uma decisão de alto investimento, na qual as famílias geralmente investem muito tempo e consideração antes de tomar uma decisão (JAGER, 2006).

Outra motivação encontrada em pesquisas anteriores é a vontade de economizar dinheiro, adquirindo menos eletricidade da rede ou vendendo sua própria eletricidade. Mais um motivo relacionado é instalar os painéis fotovoltaicos como proteção contra futuras altas de preço (BALCOMBE ET AL. 2013; ENLUND E ERIKSSON, 2016; ISLAM, 2014; PALM E TENGVARD, 2011; SHWOM E LORENZEN, 2012)

O custo de capital tem sido repetidamente destacado como a principal barreira para instalação de micro geração (ALLEN, HAMMOND E MCMANUS, 2008, SCARPA E WILLIS, 2010, BERGMAN E EIRES, 2011, CLAUDY, MICHELSEN E O'DRISCOLL, 2011). Resultados apontam que para muitas pessoas, o custo de capital é inacessível (SCARPA E WILLIS 2010) ou não há renda suficiente para instalação que justifique o retorno do investimento (CLAUDY ET. AL, 2010).

Do lado do custo, estudos anteriores sugerem que os altos investimentos iniciais associados a sistemas fotovoltaicos residenciais estão entre as principais barreiras para a adoção (ALLEN, HAMMOND E MCMANUS, 2008; SCHAFFER E BRUN, 2015). Dessa forma, é natural que estudos demonstrem uma relação entre renda e investimentos em sistemas fotovoltaicos (ABU-ARQOUB ET AL., 2014; GALLEGOS ET AL., 2014; JIANG E ZHU, 2012; SCHAFFER E BRUN, 2015).

Com relação aos benefícios financeiros da adoção de painéis fotovoltaicos, alguns trabalhos levam em consideração o papel da economia de energia gerada pelo próprio consumo: por exemplo, de uma experiência escolhida em Ontário, Canadá, o Islam (2014) descobre que, além das tarifas *feed-in*, o tempo de retorno e a economia de energia influenciam a decisão de adotar sistemas fotovoltaicos residenciais.

Regiões geográficas com maior renda também são as regiões com mais altas de instalações de painéis fotovoltaicos, estudos anteriores vincularam os rendimentos médios domiciliares acima da média com a adoção de tecnologia solar (LAM, 1998; CHANG ET AL., 2008).

Isso é provável tanto pela renda disponível para um investimento considerado alto como pela demanda residencial por eletricidade desse domicílio, uma grande

demanda por eletricidade justifica o investimento pois a eletricidade produzida será utilizada no próprio domicílio. O tamanho dos agregados familiares também pode desempenhar um papel, uma vez que os agregados familiares maiores têm um consumo de eletricidade mais elevado e podem partilhar o custo do investimento fixo entre um grupo maior de beneficiários (MILLS E SCHLEICH, 2009). Sardanou e Genoudi, (2013) concluíram que distribuição de renda em uma região também é um fator preponderante para adoção dessa tecnologia.

No que se refere à renda e emprego, a literatura anterior auxilia na formulação da terceira e quarta hipóteses a serem avaliadas na investigação proposta:

*H3: Municípios com maior salário médio mensal tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.*

*H4: Municípios com maior número de pessoas ocupadas tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.*

Essas hipóteses têm como objetivo mostrar a influência da economia na adoção dessa tecnologia. Como já mostrado anteriormente, o custo inicial da instalação do painel fotovoltaico é alto e seu tempo de *Payback* ainda é muito disperso entre a literatura, principalmente porque cada país tem sua política de incentivo ou não à essa tecnologia. Estudos anteriores sobre sistema de aquecimento solar de água concluíram que o tempo de retorno foram grandes influenciadores na tomada de decisão do consumidor para esta tecnologia. (FAIERS E NEAME, 2006; DURHAM, COLBY E LONGSTRETH, 1988).

#### **2.12.4 Determinantes Governamentais**

Os motivos e restrições que influenciam a absorção de sistemas fotovoltaicos podem ser diversamente afetados pela intervenção do governo. Tarifas *feed-in* emergem como uma das mais populares ferramentas de políticas eficazes (SOLANGI ET AL., 2011; JENNER ET AL., 2013). Em seu estudo, Haas et al. (2011) nota que os países com um esquema de tarifas *feed-in* vantajosos alcançaram maior eficácia em comparação com os países que usavam incentivos. A adesão fotovoltaica no Reino Unido, por exemplo, aumentou rapidamente com a introdução dessas tarifas (CHERRINGTON ET AL., 2013).

A introdução de tarifas *feed-in* também aumentou a adoção de micro geração no Reino Unido Balcombe et al.2013, e na Alemanha (SCHAFFER E BRUN, 2015).No

entanto, mesmo que o FIT possam efetivamente melhorar a disposição do público em investir em sistemas solares fotovoltaicos, as famílias ainda são obrigadas a despendem um gasto inicial substancial. Assim, alguns governos combinam as tarifas *feed-in* com subvenções ou esquemas de subsídio para aliviar uma nova barreira de custo (SOLANGI ET AL., 2011).

A introdução, assim como os ajustes posteriores, do sistema de tarifa *feed-in* tem aumentado significativamente a economia dos sistemas fotovoltaicos residenciais ao longo do tempo. Estudos de política sugerem que a tarifa tem sido uma das principais determinantes da implantação de energia renovável na Alemanha desde 2000 (JACOBSSON E LAUBER, 2006; LANGNIß, DIEKMANN E LEHR, 2009; LIPP, 2007; RODE E WEBER, 2012; WÜSTENHAGEN E BILHARZ, 2006).

Balcombe et al. (2013) aborda que tarifas *feed-in* reduziram o tempo de retorno para painéis fotovoltaicos no Reino Unido de 35-58 para 11 anos. Apesar da drástica redução o tempo de retorno ainda é maior do que o tempo de compensação aceitável calculado.

### **2.12.5 Determinantes Sociais**

Vários estudos sugerem que a taxa de adoção de novas tecnologias é inversamente proporcional à idade do consumidor (LABAY E KINNEAR, 1981; MORRIS E VENKATESH, 2000; LEE, LEE E EASTWOOD, 2003). Além disso, em uma pesquisa mais ampla sobre comportamentos frente ao aquecimento global, Kellstedt, Zahran e Vedlitz (2008) concluíram que indivíduos mais idosos têm menos preocupação com assuntos ambientais.

A literatura também sugere que os consumidores com maior nível de educação são mais propensos a adotar novas tecnologias (CLAUDY, ET AL. 2010, MAHAPATRA E GUSTAVSSON 2009). Estudos anteriores avaliando o processo de proliferação de tecnologias solares térmicas para o aquecimento de água também chegaram a conclusões semelhantes (GUAGNANO ET AL., 1986; HAAS ET AL., 1999). A educação pode representar tanto a consciência ambiental quanto a compreensão dos incentivos para a energia renovável (SHI ET AL., 2013).

Baseados nos estudos desses autores é possível elaborar outra hipótese

*H5: Municípios com maiores índices de educação tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.*

Outro fator com relevância é densidade populacional e, embora a literatura apresente vários resultados divergentes como Shaffer e Brun (2015) e Kwan (2012), acredita-se que essa tecnologia seja adotada inicialmente em centros urbanos e que o contato entre populações próximas, com alta densidade, criam *spillovers* onde a influência de um consumidor é repassada a outro.

Com base nessa teoria, mais uma hipótese foi formulada visando captar o efeito da concentração urbana:

*H6: Municípios com maior densidade populacional tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.*

A mostra as hipóteses e seus autores.

Quadro 3 Hipóteses e trabalhos base

<b>Determinante Teórico</b>	<b>Autores</b>	<b>Hipótese</b>
<i>Peer Effects</i>	Bollinger & Gillingham, 2012; Robinson & Rai, 2015; Palm, 2017	H1
Taxa Média de Irradiação Solar	Dorvlo & Ampratwum, 1998; Tsoutsos et al, 2003; Hang Et Al., 2008; Lam et Al., 2008	H2
Salário médio	Sardianou & Genoudi, 2013;	H3
Número de empregados	Lam, 1998; Chang Et Al., 2008	H4
Educação	Guagnano et Al, 1986; Haas et Al., 1999, Shi Et Al., 2013	H5
Densidade Populacional	Kwan, 2012; Zahran et al, 2008; Schaffer & Brun, 2012	H6

Fonte: elaborada pelo autor

### 2.13 Econometria Espacial

Nas últimas décadas, um conjunto cada vez maior de ferramentas analíticas para tratamento de dados espaciais tem surgido na literatura especializada. Estas ferramentas têm auxiliado pesquisadores em diferentes campos da ciência a lidar com a crescente disponibilidade de bases de dados georreferenciados.

A base para o estudo espacial foi definida na primeira lei da Geografia por Tobler (1970, p.18) “tudo está relacionado com tudo, mas as coisas mais próximas estão mais relacionadas entre si do que as mais distantes”. Do mesmo modo que a autocorrelação espacial, a heterogeneidade espacial deixou de ser apenas uma flutuação de parâmetros cuja correção teria de ocorrer, à medida que carrega informação que identifica tanto a intensidade quanto o padrão das associações espaciais.

A dependência espacial destaca dois aspectos chaves: 1) dependência variável espacial (autocorrelação espacial e correlação espacial) e 2) dependência das relações espaciais (homogeneidade espacial e heterogeneidade espacial).

A análise espacial permite recursos como: a produção de indicadores de correlação e dependência espacial como *cluster*, *outliers* e redes; além disso, também é uma etapa descritiva inicial e indispensável da modelagem econométrica espacial, que antecede tanto a análise confirmatória (estimação e contrastes); bem como o próprio exercício de predição espacial.

Agregando conhecimentos de várias áreas como Geografia, Economia e Estatística a Econometria Espacial surge mais recentemente com foco na interação espacial (autocorrelação espacial) e na estrutura espacial (heterogeneidade espacial) em modelos de regressão, tanto para os dados *cross-section* (transversais), como os de painel.

Na perspectiva de Elhorst (2014):

Econometria espacial é um subcampo da econometria que lida com os efeitos da interação espacial entre as unidades geográficas. As unidades podem ser códigos postais, cidades, municipalidades, regiões, condados, estados, jurisdições, países, e assim por diante, dependendo da natureza do estudo. Modelos econométricos espaciais também podem ser usados para explicar o comportamento dos agentes econômicos de diferentes unidades geográficas, como os indivíduos, empresas, governos, ou se eles estão relacionados uns com os outros através de redes [...] (ELHORST, 2014).

De acordo com Anselin (2001, p. 113), “econometria espacial é um subcampo da econometria que lida com as complicações causadas pela interação espacial

(autocorrelação espacial) e pela estrutura espacial (heterogeneidade espacial) em modelos de regressão para dados na forma de *cross-section* e painel de dados”.

Como é possível de se perceber, desconsiderar os efeitos espaciais pode acarretar em estimativas viesadas, inconsistentes e/ou ineficientes. Porém, ao incorporar os efeitos espaciais, a técnica econométrica, concomitantemente, sofisticou-se e tornou-se muito mais complexa. Logo, embora apresente como vantagem o estudo espacial em relação ao modelo econométrico tradicional, o estudo do objeto locacional provoca o surgimento de problemas. Primeiro, há correlação espacial entre as observações, violando as tradicionais hipóteses de Gauss-Markov utilizadas no modelo tradicional de regressão. O teorema afirma que assume que as variáveis explicativas são fixas em amostragem repetida. Em segundo lugar, a heterogeneidade espacial viola o pressuposto de que existe uma única relação linear através das observações dos dados amostrais. Se a relação varia à medida que se avança em toda a amostra de dados espaciais, procedimentos de estimação alternativos são necessários (LESAGE, 1998).

A dependência espacial indica que o valor de uma variável de interesse numa certa região  $i$  depende do valor dessa variável nas regiões vizinhas  $j$  (ANSELIN, 1988). Em resumo existe dependência entre as observações do conjunto de dados. Não obstante, essa dependência é bidirecional, onde duas regiões se afetam ao mesmo tempo, diferentemente da ocorrência notada em séries temporais cuja interação é unidirecional do passado para o presente.

A dependência ou a autocorrelação espacial igualmente pode ser expressa pela seguinte equação, medindo a covariância dessas variáveis em regiões distintas:

$$\text{cov}[y_i, y_j] = E[y_i y_j] - E[y_i] \cdot E[y_j] \neq 0, i = 1, \dots, n \text{ e } i \neq j \quad (2)$$

Se a variável apresenta um padrão sistemático na sua distribuição espacial, afirma-se que está auto correlacionada espacialmente. O objetivo da correlação espacial é encontrar e quantificar a existência entre os valores de uma variável específica com referência a uma localização espacial.

Uma medida de autocorrelação espacial positiva mostra a similaridade entre os valores do atributo estudado e da localização do atributo. Nessa situação, os valores de uma variável tendem a estar próximos de outros valores elevados em regiões próximas, do mesmo modo, a região de interesse com baixo valor estaria próxima a outras regiões

de baixos valores. Por outro lado, a autocorrelação espacial negativa indica a existência de similaridade entre os valores do atributo estudado e da localização espacial do atributo. Como comportamento padrão da autocorrelação espacial negativa teríamos uma região com altos valores no atributo de interesse próximas a regiões com atributos de baixo valor. Padrões aleatórios indicam zero de autocorrelação espacial, uma vez que os dados aleatórios independentes e identicamente distribuídos são invariantes em relação à sua localização espacial (GANGODAGAMAGE, ZHOU E LIN, 2008)

### 2.13.1 Índice de Moran

A análise espacial inicia-se pela verificação de ocorrência de correlação espacial através do índice Global de Moran  $I$ . O índice corresponde a uma extensão espacial do índice de correlação linear de Pearson, e é apresentado nas equações 3 e 4:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{Y})(y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2} \quad (3)$$

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \quad (4)$$

Onde:

$N$  corresponde ao número de regiões

$y_i$  É o valor do atributo considerado na região  $i$

$\bar{Y}$  Representa o valor médio do atributo na região de estudo

$W_{ij}$  São os pesos atribuídos conforme a conexão entre as regiões  $i$  e  $j$

$S_0$  É o agregado de todos os pesos espaciais

Como já mencionado, o índice varia entre -1 e +1. Resultados menores que zero indicam autocorrelação negativa ou inversa e maiores que zero indicam autocorrelação positiva ou direta, valores próximos a zero indicam aleatoriedade espacial. Ou seja, a autocorrelação espacial positiva indica que, no geral, uma área com um número grande de painéis fotovoltaicos instalados tende a ser cercada por área com grande número de painéis fotovoltaicos vizinhas e/ou

uma área com pequeno número de painéis fotovoltaicos tende a ser cercada por uma área semelhante. (ANSELIN, 1988). Dessa forma, a estatística I assemelha-se a um coeficiente de correlação, porém, não é idêntico a ele. Consequentemente, conclui-se que a estatística I é uma medida para capturar principalmente a autocorrelação espacial de primeira ordem.

Importante destacar que padrões globais de associação espacial podem estar também em consonância com padrões locais, embora essa não seja a regra. Na verdade, existem dois casos distintos. O primeiro caso acontece quando uma indicação de ausência de autocorrelação global oculta padrões de associação local. O caso oposto ocorre quando uma forte indicação de autocorrelação global pode camuflar padrões locais de associação (clusters ou *outliers* espaciais). Consequentemente, as estatísticas de autocorrelação global não têm capacidade de identificar a ocorrência de autocorrelação local, estatisticamente significantes (ANSELIN, 1999).

Para superar esse obstáculo, um novo indicador foi sugerido na literatura por Anselin (1999), com a capacidade de capturar padrões locais de associação linear estatisticamente significantes. O cálculo do Índice Local de Moran I, tem objetivo detectar a existência de clusters e outliers espaciais. A estatística de autocorrelação espacial local fornece uma medida, para cada unidade na região, da tendência da unidade em ter um valor de atributo que está correlacionado com valores verificados em áreas próximas. Ela calcula uma medida da associação espacial para um dado local individual. Segundo Anselin (1999), o indicador de I de Moran local faz uma decomposição do indicador global de autocorrelação na contribuição local de cada observação em quatro categorias, cada uma individualmente correspondendo a um quadrante no diagrama de dispersão de Moran, como mostrado na Equação 5.

$$I = \frac{(y_i - \bar{y}) \sum_j W_{ij} (y_j - \bar{y})}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2 / n} \quad (5)$$

Dado um conjunto de características ponderadas, o Índice assinala onde valores similares estão agrupados espacialmente, e características com valores que são muito diferentes dos valores do seu entorno (*outliers* espaciais). Após localizar os

agrupamentos espaciais a divisão é feita com base no seguinte critério (ANSELIN, 1988):

1) HH (ALTO/ALTO): *cluster* de valores altos (unidades com valores altos localizam-se próximas às unidades com valores altos);

2) LL (BAIXO/BAIXO): *cluster* de valores baixos (unidades com valores baixos localizam-se próximas às unidades com valores baixos);

3) HL (ALTO/BAIXO): *outlier* com valor alto em relação a vizinhos de baixo valor (Unidades com valores altos próximas às unidades com valores baixos);

4) LH (BAIXO/ALTO): *outlier* com valor baixo em relação a vizinhos de alto valor (unidades com valores baixos próximas às unidades com valores altos).

### 2.13.2 Matriz de ponderação espacial

A finalidade da matriz de ponderação espacial  $W$  é expressar quantitativamente as interações entre as regiões do objeto de estudo. Como dito anteriormente na lei de Tobler, quanto mais próximas as regiões, na teoria, mais forte são as interações. Em resumo, o que se deseja é ter de estimar um parâmetro que dê a ideia do grau de interação.

Qualquer matriz de pesos espaciais precisa atender às condições de regularidade impostas pela necessidade de invocar as propriedades assintóticas dos estimadores e dos testes. Segundo Anselin (2001, p. 244), “isso significa que os pesos precisam ser não-negativos e finitos e que correspondam a uma determinada métrica”.

Uma matriz de ponderação espacial é uma matriz quadrada de dimensão  $n$  por  $n$ , o grau de conexão entre as regiões conforme determinado critério de proximidade é representado pelos pesos espaciais  $W_{ij}$ , que mostram a influência da região  $j$  sobre a região  $i$ . O conceito de matriz de pesos espaciais é baseado na contiguidade, que, por sua vez, pode ser definida de acordo com a vizinhança, a distância tanto geográfica quanto socioeconômica, bem como uma combinação disso (Anselin, 2001). Entretanto, o processo de elaboração dos pesos de interação é um processo subjetivo, sujeito a muitas críticas. Os resultados da análise espacial serão sensíveis à escolha da matriz de pesos espaciais. Portanto, a discussão a respeito da tipologia das matrizes é uma questão importante na literatura.

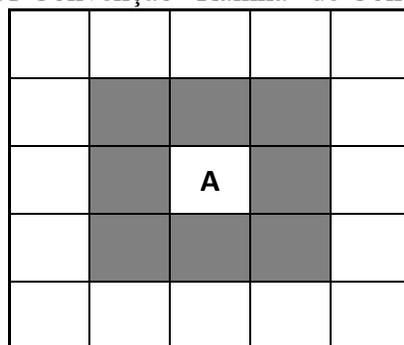
A matriz binária de pesos espaciais pode ser construída segundo a ideia de contiguidade ou de vizinhança, duas regiões são contíguas se compartilham em algum ponto uma fronteira física em comum. Formalmente:

$$W_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{se não houver fronteira entre } i \text{ e } j \\ 1, & \text{se houver fronteira entre } i \text{ e } j \end{cases}$$

Por convenção,  $W_{ij}=0$ , ou seja, nenhuma região  $i$  pode ser vizinha dela mesma. Dessa forma, o resultado será uma matriz quadrada com os termos da sua diagonal principal nulos, uma vez que se calcula frequentemente o traço da matriz de pesos espaciais, e como o traço é definido como a somatória dos elementos da diagonal principal da matriz, se esses forem nulos, o traço assumirá, conseqüentemente, o valor nulo também, facilitando uma série de contas.

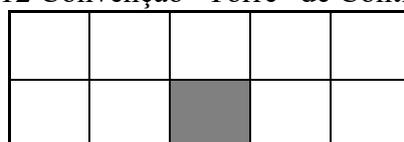
Entretanto, no modelo de contiguidade há complicações nas definições de fronteira, mais precisamente em como a fronteira é considerada, apesar das irregularidades dos limites fronteiriços reais a convenção de contiguidade é baseada no movimento das peças de xadrez. Se forem considerados apenas as extensões diferentes de zero, temos a contiguidade dita *torre* (*rook*), casos também sejam considerados os vértices de fronteira, temos a contiguidade rainha (*queen*). As Figura 11 e Figura 12 ilustram melhor essas situações:

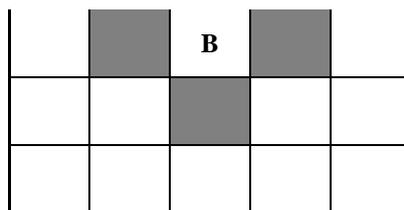
Figura 11 Convenção “Rainha” de Contiguidade



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Figura 12 Convenção “Torre” de Contiguidade

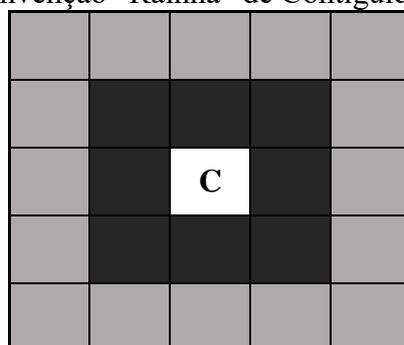




Fonte: Desenvolvida pelo autor

Uma vantagem comum a todas matrizes de pesos espaciais do tipo binário é a possibilidade de definir vizinhanças de ordens superiores. Uma matriz de vizinhança de primeira ordem é composta dos vizinhos das unidades espaciais. Uma matriz de vizinhança de segunda ordem é composta dos vizinhos dos vizinhos das unidades espaciais (os vizinhos de segunda ordem) e assim por diante. A importância de se definir matrizes de pesos espaciais de ordens superiores repousa em capturar processos espaciais que apresentam interações que se amortecem com o seu alastramento (Anselin, 2001). A *Figura 13*, por exemplo, utilizando a convenção rainha tem como vizinhos de primeira ordem elementos mais escuros e como elementos de segunda ordem (vizinhos dos vizinhos) mais claros.

Figura 13 Convenção “Rainha” de Contiguidade de segunda ordem



Fonte: Desenvolvida pelo autor

Por outro lado, pode haver um desequilíbrio ao utilizar esse método, visto que regiões podem ter muita área de contiguidade e poucos vizinhos e pouca área de contiguidade com muitos vizinhos. Para superar esse problema, adota-se a matriz dos  $k$  vizinhos mais próximos. Trata-se de uma matriz binária de contiguidade cuja convenção de vizinhança é baseada na distância geográfica. Formalmente:

$$W_{ij} = 0, \text{ se } d_{ij} \leq d$$

$$1, \text{ se } d_{ij} > d$$

Aonde  $d$  é um valor de distância. A vantagem dessa convenção é combater o desbalanceamento da conectividade de uma matriz, pois todas as unidades espaciais terão o mesmo número de vizinhos cada uma.

Uma alternativa de matriz geográfica é aquela baseada na distância geográfica entre as regiões, a ideia básica é que quando mais próximas as regiões, maior seu peso na matriz. Genérica e formalmente:

$$W_{ij} = f(D_{ij}) \quad (6)$$

Os pesos espaciais são uma função da distância entre as regiões  $i$  e  $j$ . Vale destacar que a função  $f$  pode assumir várias especificações, tais como: função de distância inversa, função de distância exponencial, função distância linear.

### 2.13.3 Matriz de pesos espaciais gerais de Cliff e Ord

O pensamento central da matriz de pesos espaciais gerais é unir duas características que influenciam na interação entre duas regiões, primeiramente, a proximidade geográfica influencia diretamente na interação, além disso, essa matriz insere o fator fronteira, quanto maior a área compartilhada de fronteira, maior a interação entre as regiões. Os pesos espaciais gerais ou pesos Cliff-Ord consistem no comprimento relativo da fronteira comum, ajustado pela distância inversa entre as duas observações (Anselin, 1999). Formalmente, os pesos Cliff-Ord podem ser expressos como:

$$W_{ij} = \frac{b_{ij}^{\beta}}{d_{ij}^{\alpha}} \quad (7)$$

Em que  $b_{ij}$  é a parcela da fronteira comum entre as observações  $i$  e  $j$  no perímetro de  $i$ , e  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros. Convém notar que  $b_{ij}$  não é necessariamente igual a  $b_{ji}$ .

### 2.14 Modelos de Econometria Espacial

Existem principalmente duas formulações básicas no processo de modelagem espacial, o que as divide é o comportamento em relação ao erro, dessa forma, os modelos expressam a dependência espacial como uma variável dependente espacialmente defasada ( $Wy$ ), ou na estrutura do resíduo, ( $E[\varepsilon_j \varepsilon_i] \neq 0$ ) existindo outras derivando dessa principal (GUJARATI, 2004).

Um dos modelos mais comumente utilizados para modelagem de correlação espacial é o modelo auto regressivo espacial (*spatial autoregressive model*), ou simplesmente modelo SAR. A ideia dos modelos SAR é utilizar a mesma ideia dos modelos AR em séries temporais, por meio da incorporação de um termo de *lag* entre os repressores da equação. Na sua forma mais simples, o modelo SAR tem expressão:

$$Y = \rho W_y + X\beta + \varepsilon \quad (8)$$

Onde  $Y$  é um vetor coluna, contendo  $n$  observações na amostra para a variável resposta, o coeficiente escalar corresponde ao parâmetro auto regressivo, representando efeito médio da variável dependente relativo à vizinhança espacial na região em questão, já o termo  $\varepsilon$  corresponde a um vetor coluna contendo os resíduos da equação. Além disso, a matriz  $W$  representa os pesos definidos de vizinhança.

Da mesma forma que os modelos SAR partem da especificação de modelos AR para séries temporais, outra classe de modelos espaciais parte da especificação de modelos MA (médias móveis) para observações no tempo. Estes modelos espaciais são denominados modelos de erros espaciais (*spatial error models*), ou simplesmente SEM. Esse modelo é apropriado quando as variáveis não incluídas no modelo e presentes no componente do erro são auto correlacionados espacialmente (GUJARATI, 2004). É representado por:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 x + \mu \quad (09)$$

Em que  $\mu = \lambda W_\mu + \varepsilon$ , sendo o coeficiente  $\lambda$  o parâmetro do erro autor regressivo espacial que acompanha a defasagem  $W_\mu$ .

O coeficiente escalar  $\lambda$  indica a intensidade da autocorrelação espacial entre os resíduos da equação observada. Mais especificamente, esse parâmetro mensura o efeito médio dos erros dos vizinhos em relação ao resíduo da região em questão. Note-se que,

ao contrário dos modelos SAR, os modelos SEM não apresentam a variável resposta como uma função direta dos seus *lags* espaciais. A autocorrelação espacial nos modelos SEM aparece nos termos de erro, além disso, em comparação com o modelo SAR é que o modelo SEM pode ser estimado via mínimo quadrados ordinários de forma consistente.

### 3. MÉTODO

O ato de mensurar variáveis de pesquisa, segundo Martins (1998), é a característica mais marcante da abordagem quantitativa; isso, por vezes, é a única forma de justificar a adoção de tal abordagem. Diante disto, o método que será utilizado no desenvolvimento da pesquisa será o quantitativo, pois serão coletados e analisados dados numéricos por meio de técnicas estatísticas e matemáticas. Além disso, o método de pesquisa utilizado neste trabalho foi a *Modelagem*, que de acordo com Martins (2011, p.96), trata-se do "uso de técnicas matemáticas para descrever o funcionamento de um sistema ou de parte de um sistema produtivo".

#### 3.1 Variáveis e fontes de dados

Como nos estudos anteriores, a variável dependente será o número total de painéis fotovoltaicos em um determinado território. A base de dados fornece informações importantes como a distribuidora que compra a energia, o titular que vende a mesma, classe (residencial, industrial e comercial), endereço (estado, município e CEP) e a potência instalada.

Para a avaliação das hipóteses estabelecidas, o presente trabalho coletou dados de fontes oficiais como IBGE, ANEEL, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais (INPE), e o índice de educação da Federação das Indústrias do Rio de Janeiro (IFDM - FIRJAN). Para captar a relação, foi construída uma estrutura de dados contendo municípios brasileiros com painéis fotovoltaicos como unidades *cross-section* em um horizonte de um ano, 2016, a escolha foi feita dessa forma pois esse é o ano mais recente em que é possível encontrar dados disponíveis tanto de painéis fotovoltaicos quanto socioeconômicos.

O Quadro 4 Resumo de determinantes, autores baseados, hipóteses, proxy e fonte de coleta de dados Quadro 4 faz a conexão entre os determinantes teóricos abordados no capítulo de revisão, seus respectivos autores e as hipóteses a serem testadas nesse trabalho, bem como também estão presentes os proxies a serem utilizadas e a fonte dessas informações.

Quadro 4 Resumo de determinantes, autores baseados, hipóteses, proxy e fonte de coleta de dados

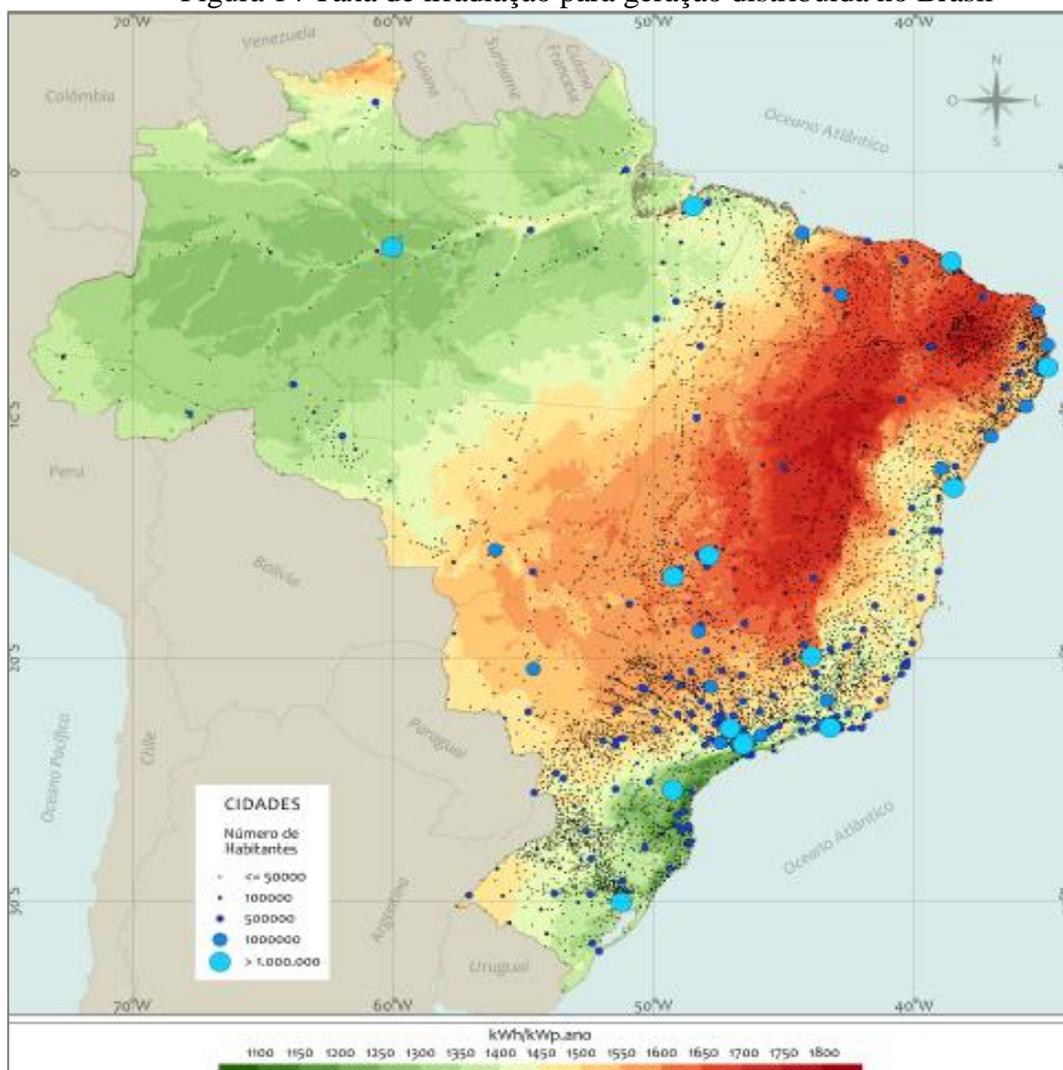
<b>Determinante Teórico</b>	<b>Autores</b>	<b>Hipótese</b>	<b>Proxy</b>	<b>Fonte</b>
<i>Peer Effects</i>	Bollinger & Gillingham, 2012; Robinson & Rai, 2015; Palm, 2017	H1	Parâmetro estimado (SAR)	Aneel
Taxa Média de Irradiação Solar	Dorvlo & Ampratwum, 1998; Tsoutsos et al, 2003; Hang Et Al., 2008; Lam et Al., 2008	H2	Potencial kWh/ano	Atlas radiação solar
Salário médio	Sardianou & Genoudi, 2013;	H3	Salário Médio Mensal	IBGE
Número de empregados	Lam, 1998; Chang Et Al., 2008	H4	Pessoal Ocupado	IBGE
Educação	Guagnano et Al, 1986; Haas et Al., 1999, Shi Et Al., 2013	H5	IFDM - Educação	FIRJAN
Densidade Populacional	Kwan, 2012; Zahran et al, 2008; Schaffer & Brun, 2012	H6	População/km2	IBGE

Fonte: desenvolvida pelo autor

Especificamente, em relação à determinante espacial os dados coletados na ANEEL foram divididos por ano e município, todos com a mesma data de coleta, 2016.

No que tange à taxa média de irradiação solar, os dados foram coletados na segunda edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar. Seguindo as orientações da Figura 14, os valores de irradiação de cada município foram estimados de acordo com o valor médio de irradiação de cada Unidade Federativa, em resumo, cada município pertencente ao mesmo estado tem mesmo valor de radiação, os valores foram medidos no potencial kWh/ ano.

Figura 14 Taxa de irradiação para geração distribuída no Brasil



Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar

No que tange ao salário médio, o IBGE mantém em suas bases de dados o cadastro central de empresas. Nesse cadastro são dispostos o pessoal ocupado total por município e o salário médio mensal de cada município. Os dados são retirados de empresas cadastradas tanto no IBGE quanto na base de Relações anuais de informações sociais (RAIS), pertencente ao ministério do trabalho. Os valores são apresentados em milhares de pessoas ocupadas e o rendimento médio em salários mínimos médios mensais.

Já em relação à educação, será utilizado o índice IFDM de educação, variando de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, maior o desenvolvimento da localidade. Serão excluídos da análise municípios que foram observados ausência, insuficiência ou inconsistência de dados.

O IFDM educação aborda os seguintes pontos para sua ponderação final: atendimento à educação infantil, abandono no ensino fundamental, distorção idade-série no ensino fundamental, docentes com ensino superior no ensino fundamental, média de horas-aula diárias no ensino fundamental, resultado do IDEB no ensino fundamental.

Os dados referentes à densidade populacional serão coletados das bases do IBGE. Os dados municipais de densidade populacional foram obtidos dividindo a população residente estimada pela extensão territorial de cada município, medido em quilômetros quadrados, também retirado das bases do IBGE.

Como variáveis de controle, os dados do PIB e PIB do agronegócio foram retirados da base do IBGE.

### 3.2 Modelo econométrico

Baseando-se no referencial teórico dos estudos anteriores são feitas as seguintes avaliações acerca das determinantes no Quadro 5:

Quadro 5 Resumo das hipóteses e comportamento esperado da determinante

Determinante Teórico	Hipótese	Sinal esperado
<i>Peer Effects</i>	H1	Espera-se que o uma região próxima de uma região que adota painéis fotovoltaicos seja influenciada positivamente e também adote essa tecnologia
Taxa Média de Irradiação Solar	H2	Como os painéis fotovoltaicos são mais eficientes conforme maior a irradiação daquela região, espera-se um sinal positivo e que quanto maior a irradiação, maior a quantidade de painéis naquela localidade.
Salário médio	H3	Pelos painéis fotovoltaicos serem uma tecnologia de alto investimento e com um retorno a longo prazo, espera-se um sinal positivo, já que quanto maior a presença de pessoas empregadas e quanto maior seu salário médio, mais painéis estarão presentes naquela localidade.
Número de empregados	H4	
Educação	H5	A teoria indica que quanto mais educação formal as pessoas recebem mais elas se tornam conscientes de questões

		ambientais e também ficam mais próximas de novidades, espera-se um sinal positivo, pois quanto maior o nível educacional, maior será a adoção do sistema.
Densidade Populacional	H6	Agregados populacionais proporcionam maior observação dos hábitos de vizinhos. Assim, com a maior concentração de domicílios, espera-se um sinal positivo, reflexo da fácil observação de painéis solares por outras pessoas.

Fonte: desenvolvida pelo autor

### 3.3 Estratégia de estimação

Para avaliar as hipóteses subjacentes ao presente trabalho, foi construída uma estrutura de dados em *cross-section*, contendo municípios brasileiros com painéis fotovoltaicos como unidades e uma análise de um ano, 2016. O modelo geral é descrito na equação 10.

$$\text{Logpv}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{Logpop}_{it} + \beta_2 \text{Logden}_{it} + \beta_3 \text{Logemp}_{it} + \beta_4 \text{Logsal}_{it} + \beta_5 \text{Logedu}_{it} + \beta_6 \text{Loggrad}_{it} + \beta_7 \text{Loggdpgen}_{it} + \beta_8 \text{Loggdpagro}_{it}$$

Em que,

Logpv: Logaritmo dos painéis fotovoltaicos no município;

Logpop: Logaritmo do número de habitantes do município;

Logden: Logaritmo número densidade do município;

Logemp: Logaritmo número de indivíduos empregados por município;

Logsal: Logaritmo número médio de salários mínimos por município;

Logedu: Logaritmo nota índice FIRJAN educação por município;

Lograd: Logaritmo índice irradiação por município;

Loggdpgen: Logaritmo PIB geral por município;

Loggdpagr: Logaritmo PIB do agronegócio por município;

$u$  : Resíduo da regressão.

Assim, a avaliação das hipóteses propostas reside na verificação da significância estatística e o sinal dos parâmetros do modelo de (10). Dessa forma, o estimador beta 1 a beta 5 avaliam as hipóteses H1, H3, H4, H5, e H6 respectivamente.

Contudo, para a avaliação da hipótese H2, é necessário considerar os efeitos espaciais no modelo. Assim, feita essa regressão do modelo em (10), será inserida uma variável a mais no modelo, com o objetivo de captar a existência e força de dependência espacial.

Assim, é preciso investigar se os resíduos do modelo convencional mostram-se auto correlacionados espacialmente. Para isso, será aplicado o teste I de Moran para cada período. Assumindo que os testes indiquem uma dependência espacial, será feito um modelo de dados em painel com dependência espacial.

A diferença entre modelo de *cross-section* tradicional e com dependência espacial consiste que no modelo tradicional, é assumido que as unidades em corte transversal são independentes entre si, obviamente, essa afirmação é pouco provável quando as unidades em observação são regiões (CLAUDY, MICHELSEN, O'DRISCOLL, 2011). Logo, o modelo necessita de adaptações para considerar a existência da dependência espacial entre as observações.

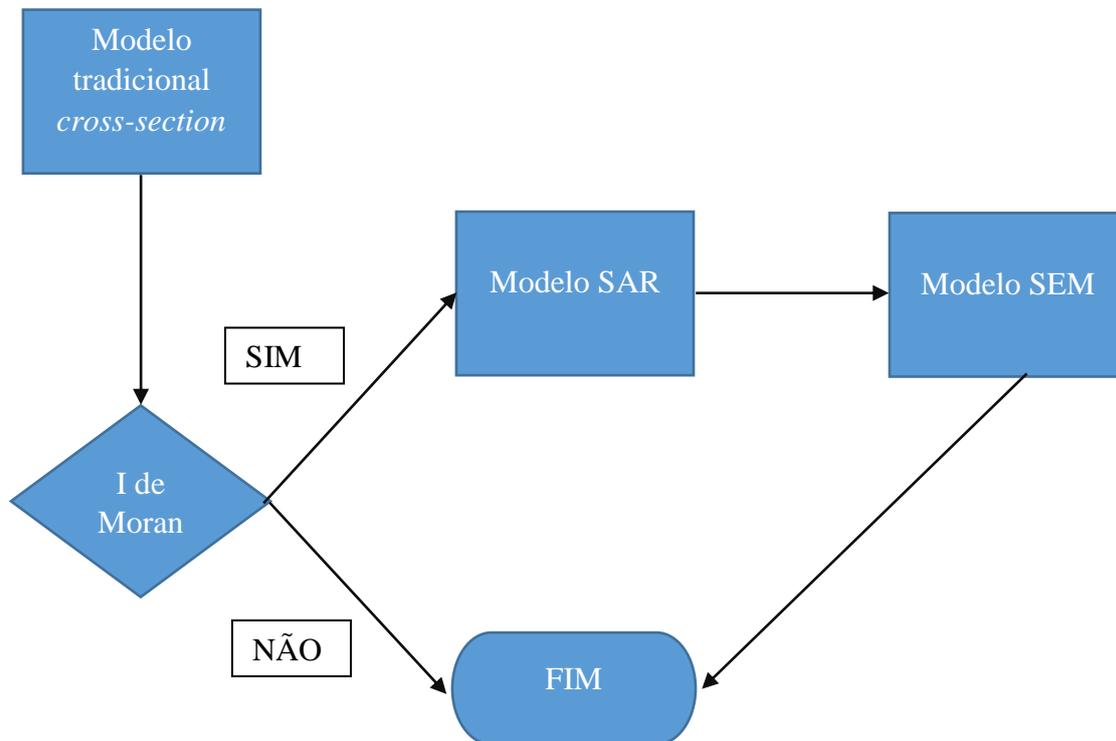
A dependência espacial é representada no modelo a partir da introdução da variável dependente defasada espacialmente (caracterizado como Modelo de *Lag* Espacial) ou a introdução de um processo autorregressivo espacial no termo de erro (Modelo de Erro Espacial) (ELHORST, 2003).

Feito essas considerações, serão feitos testes com diferentes formas de dependência espacial. A primeira delas é o modelo com defasagem espacial (SAR), e depois o modelo com erro auto regressivo espacial (SEM).

Desse modo, é possível observar que a avaliação de todas as hipóteses será realizada em uma abordagem *Bottom-Up*, em que se inicia com um modelo mais simples, como o apresentado em (10), e estimativas com especificações mais complexas vão sendo adicionadas ao modelo.

A Figura 15 ilustra os passos dos modelos.

Figura 15 Fluxograma modelos de estimação



Fonte: desenvolvida pelo autor

### 3.4 Modelo SAR

O modelo SAR considera que além da matriz de variáveis explanatórias da região, as variáveis dependentes das regiões vizinhas também ajudam a explicar a variável dependente de uma localidade. Assim, a autocorrelação espacial é inserida no modelo por meio da média ponderada dos valores da variável dependente observados na vizinhança ( $W_y$ ).

O que diferencia o SAR de um modelo de regressão linear convencional é o parâmetro espacial  $\rho$  o qual avaliará a H2 do presente trabalho. Se esse parâmetro assumir estatisticamente o valor zero, então é possível inferir que existe ausência de dependência espacial nessa variável, ou seja, os vizinhos não exercem influência no valor da variável estudada e os resultados serão similares ao do painel da equação (10), de modo que se rejeita a existência do *peer effect*.

Entretanto, mesmo que não seja detectada a dependência espacial na variável explicativa é possível que ela exista no erro aleatório, neste caso, o modelo de regressão a ser utilizado será outro.

### 3.5 Modelo SEM

O modelo SEM não possui a informação de vizinhança na variável explicativa, mas no resíduo do modelo. Quando os resíduos apresentam dependência espacial, o modelo deve incluir uma estrutura autor regressiva espacial de primeira ordem no termo de erro, sendo essa a principal diferença do modelo SAR. Uma questão quando usar a escolha do modelo SEM ao invés do SAR pode residir na falta de variáveis explicativas, que forçaria com que a dependência espacial seja introduzida apenas no erro aleatório.

Como é possível notar, a diferença dos modelos é o termo de dependência espacial é retirado como uma variável dependente espacialmente defasada é inserida como uma estrutura do termo do resíduo.

### 3.6 Preparação do modelo

Inicialmente, foi realizado um teste de correlação entre as variáveis para checar se isso poderia trazer prejuízo ao modelo, os resultados estão na Tabela 5.

Tabela 5 Correlação entre as variáveis – Matriz de Pearson

Variáveis	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
(1) Logpv	1.000								
(2) Logpop	0.557*	1.000							
(3) Logden	0.395*	0.533*	1.000						
(4) Logemp	0.599*	0.890*	0.591*	1.000					
(5) Logsal	0.380*	0.264*	0.203*	0.452*	1.000				
(6) Logedu	0.129*	-0.054*	0.222*	0.270*	0.344*	1.000			
(7) Lograd	0.037	-0.003	0.016	-0.204*	-0.391*	-0.316*	1.000		
(8) Loggdpgen	0.586*	0.874*	0.494*	0.954*	0.544*	0.235*	-0.255*	1.000	
(9) Loggdpagr	-0.393*	-0.574*	-0.641*	-0.559*	-0.185*	-0.057*	-0.201*	-0.474*	1.000

\* indica variáveis significantes ao nível de .05. Fonte: desenvolvida pelo autor

O coeficiente de correlação de Pearson, muitas vezes abreviado para correlação de Pearson, é uma medida da força e direção de associação que existe entre duas variáveis contínuas. A correlação de Pearson tenta traçar uma linha de melhor ajuste através dos dados de duas variáveis, e o coeficiente de correlação de Pearson,  $r$ , indica a distância entre todos esses pontos de dados e essa linha de melhor ajuste (ou seja, quão bem os pontos de dados se ajustam a esse novo modelo/linha de melhor ajuste). Seu valor pode variar de -1 para uma relação linear negativa perfeita até +1 para uma relação linear positiva perfeita. Um valor de 0 (zero) indica que não há relação entre duas variáveis.

A magnitude do coeficiente de correlação de Pearson determina a força da correlação. Embora não existam regras rígidas e rápidas para atribuir força de associação a valores particulares, algumas diretrizes gerais são fornecidas por Cohen (1988):

Tabela 6 Magnitude de força coeficiente de Pearson

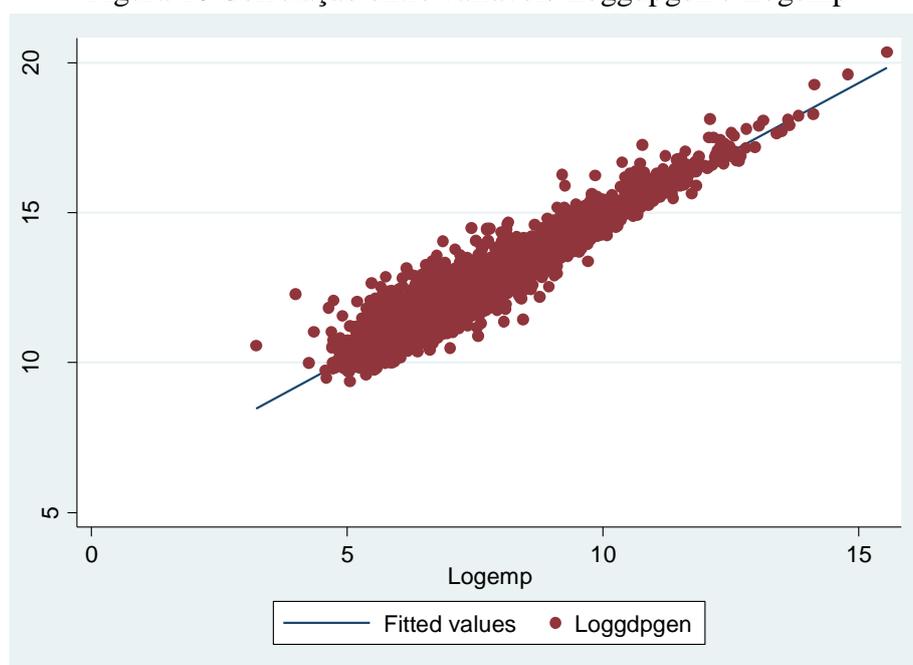
Valor do Coeficiente	Força de Associação
$0.1 <  r  < .3$	Correlação fraca
$0.3 <  r  < .65$	Correlação moderada
$ r  > .65$	Correlação forte

Fonte: adaptada de Cohen (1988)

No caso apresentado na Tabela 6, o coeficiente de correlação de Pearson sugere uma correlação positiva forte entre as variáveis *Loggdpgen* e *Logemp*, nesse caso, podemos afirmar que valores mais elevados do PIB estão positivamente relacionados com valores mais altos do número de empregados. Em contrapartida, há uma correlação fraca, a existente, entre as variáveis *Logpop* e *Logsal*, podemos afirmar que municípios com valores elevados de população também estão associados com valores mais altos de salários.

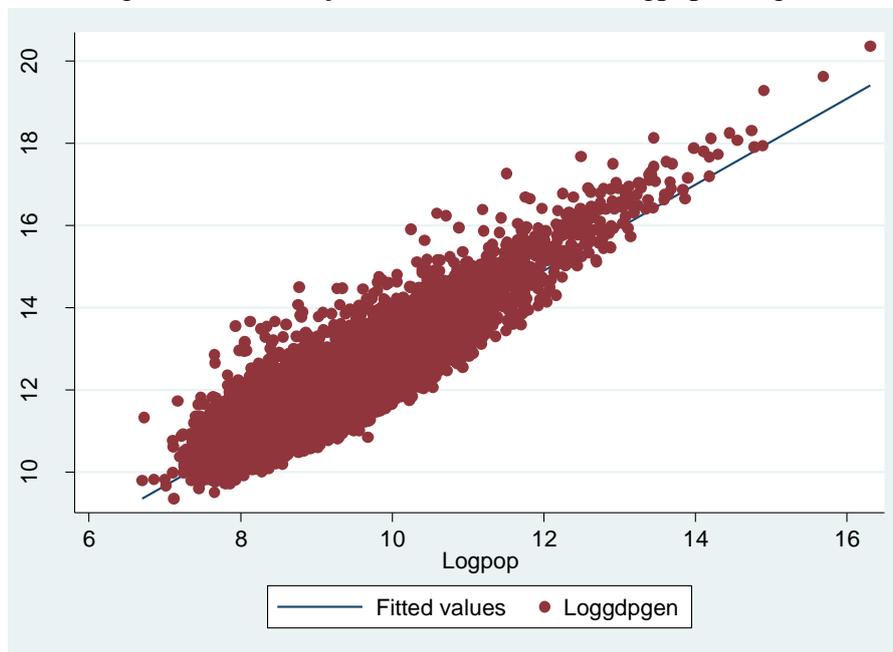
Uma outra forma de analisar os resultados também é possível na forma gráfica, como mostrado na Figura 16 e Figura 17.

Figura 16 Correlação entre variáveis *Loggdpgen* e *Logemp*



Fonte: desenvolvida pelo autor

Figura 17 Correlação entre as variáveis Logpop e Logsal



Fonte: desenvolvida pelo autor

Geralmente, um índice de correlação expressivo como as variáveis acima possui, indicaria problemas na regressão geral do modelo. Para se ter mais clareza dos valores o teste de inflação do fator da variância foi aplicado. O valor médio encontrado foi 12.5, a teoria indica que haveria problemas se esse valor fosse superior a 20 Field (2009), portanto a correlação entre as variáveis não é um problema do modelo.

Em relação heterocedasticidade, o teste de White rejeitou a hipótese nula de homocedasticidade e indicou heterocedasticidade no modelo. Entretanto, como a multicolineariedade se refere à correlação dos erros e nos erros do modelo se encontram também as variáveis espaciais isso não será um problema, visto que os modelos espaciais diminuem a multicolineariedade, também para ajudar no problema todos os valores serão convertidos para seu log.

## 4. RESULTADOS

### 5.2 Regressão tradicional

Os resultados das regressões são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 Resultados regressão clássica

	(1) Cross-section
ln_GDP <sub>Agro</sub>	0.0888125*
ln_GDP <sub>Gen</sub>	0.03830
ln_Rad	1.18428*
ln_Edu	1.17698
ln_Sal	0.24797
ln_Emp	0.47589*
ln_Den	0.00753
ln_Pop	-0.13426
Lambda	-
W	-
Akaike	636.840
R-squared	0.37745

\* indica variáveis significantes ao nível de .05.

Fonte: desenvolvida pelo autor

Inicialmente, se faz necessário a observação da significância das variáveis, nesse momento as únicas variáveis significantes foram número de empregados, PIB do agronegócio e radiação, indicando que se aumentarmos em 1% o valor do número de empregados por município e também valor da radiação, o número de painéis fotovoltaicos aumentará respectivamente 0,47% 0,088% e 1,18%.

Os outros valores, apesar de não significativos, também convergem com a teoria estudada, visto que todas as variáveis têm valores positivos ao influenciar a instalação de painéis fotovoltaicos, principalmente a educação. A variável população não demonstrou influenciar positivamente, pelo contrário, enquanto a variável densidade populacional também não demonstrou grandes valores, descartando então a hipótese que grandes populações ou grandes concentrações populacionais são fatores importantes.

Através dessa regressão é possível notar também a importância de estudar mais profundamente a variável espacial, o índice de Moran é significativo, portanto, esse modelo sofre autocorrelação espacial, os resultados também apontam que o melhor

modelo para explicar a autocorrelação espacial é o *spatial error*, que será abordado mais à frente.

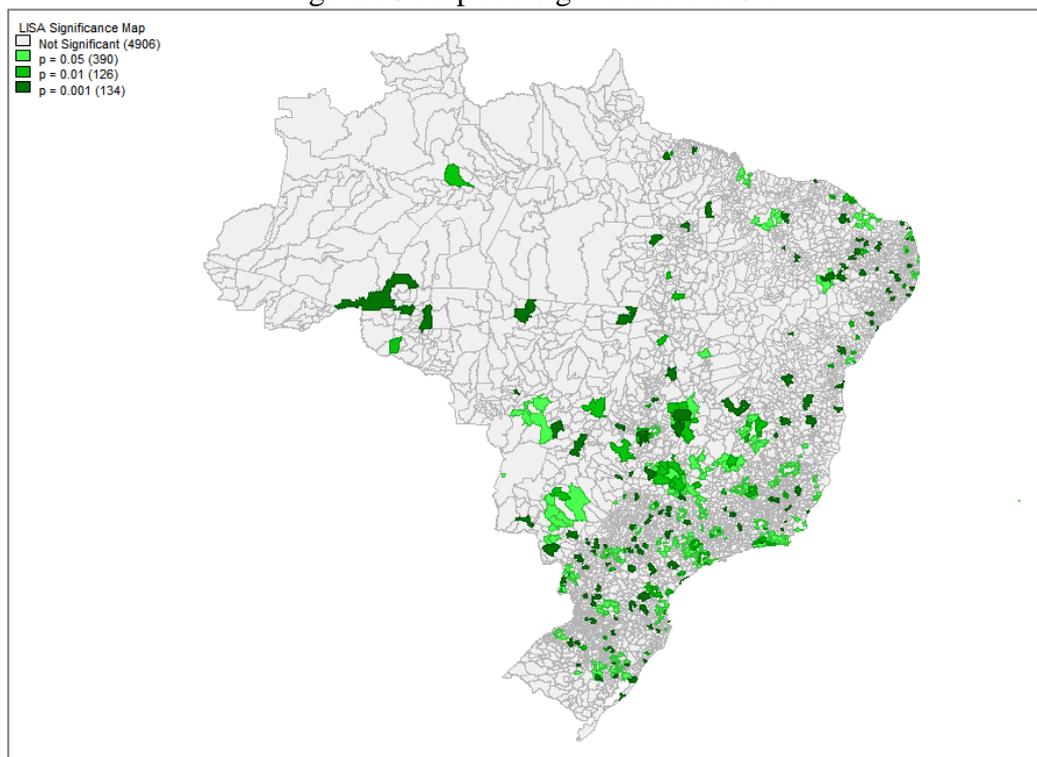
### 5.3 Escolha melhor matriz espacial

Como já dito anteriormente, um passo importante em modelos espaciais é a escolha da matriz espacial, que assumirá como os municípios interagem entre os outros. Foram realizados 5 testes diferentes utilizando 3 tipos de matrizes (matriz de distância, matriz tipo peão e matriz tipo rainha) com dois tipos de interações (ordem 1 e ordem 2) entre duas delas. O melhor resultado encontrado foi ao utilizar matriz tipo rainha com contiguidade ordem 1.

### 5.4 LISA Global e local

O índice I de Moran é muito importante pois demonstra as interações espaciais na totalidade da análise, no caso, todo o Brasil. Entretanto, por ter um olhar amplo algumas distorções podem ocorrer e certas características espaciais com menor nível de agregação podem passar despercebidos. É por isso que um outro índice é utilizado: *Local Indicators for Spatial Association*, conhecido como LISA, nos mostra a formação local de *clusters* no mapa, não captada pelo I de Moran. Após captar apenas *clusters* estatisticamente significativos os mesmos são divididos em positivos e negativos, ou seja, municípios com alto número de painéis fotovoltaicos que são rodeados por outros municípios com número alto de painéis fotovoltaicos, o mesmo se acontece para *clusters* “negativos” agrupando municípios com baixos números. A Figura 18 a seguir mostra a formação de clusters e suas respectivas significâncias.

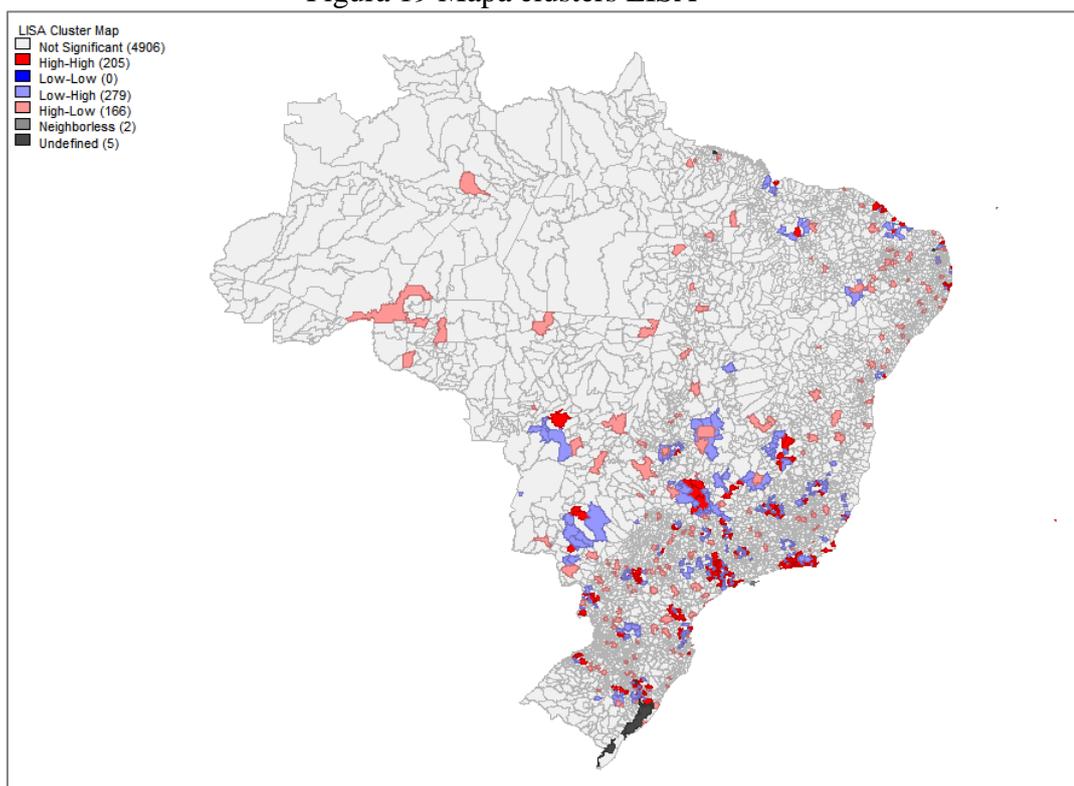
Figura 18 Mapa de significância LISA



Fonte: desenvolvida pelo autor

A Figura 19 ilustra mais claramente a formação de clusters e sua definição entre alto-alto e baixo-baixo. É possível identificar formação de clusters na região de Uberlândia, Diamantina (MG), Maricá-RJ e a grande São Paulo.

Figura 19 Mapa clusters LISA



Fonte: desenvolvida pelo autor

Também há regiões aonde há presença de municípios que diferem de suas vizinhas, cores vermelho claro ou azul claro mostram municípios que possuem valor alto, mas estão próximos de municípios com valores baixos, sendo exceção nessa região.

### 5.5 Regressão espacial *spatial error* e *spatial lag*

No que se refere aos modelos espaciais, a regressão inicial havia indicado que o melhor ajuste aconteceria com o modelo *spatial error*, entretanto, os dois modelos foram rodados para melhor entendimento. A Tabela 8 apresenta o resultado para discussão.

Tabela 8 Resultados modelo *spatial error* e *spatial lag*

	(1) Cross-section	(2) Modelo SEM	(3) Modelo SAR
<b>ln_GDPAgro</b>	0.0888125*	0.124029*	0.0906146*
<b>ln_GDPGen</b>	0.03830	0.03156	0.02301
<b>ln_Rad</b>	1.18428*	1.27394*	1.16749*
<b>ln_Edu</b>	1.17698	1.58021	1.13354
<b>ln_Sal</b>	0.24797	0.41884	0.23663
<b>ln_Emp</b>	0.47589*	0.489575*	0.499381*
<b>ln_Den</b>	0.00753	0.03186	-0.00220
<b>ln_pop</b>	-0.13426	0.09676	-0.13739
<b>Lambda</b>	-	0.204539*	-
<b>W</b>	-	-	0.0572759*
<b>Akaike</b>	636.840	606.86500	634.895
<b>R-squared</b>	0.37745	0.40775	0.38096

\* indica variáveis significantes ao nível de .05 (valor-p <=0.05)

Fonte: desenvolvida pelo autor

Comparando os três modelos aplicados podemos notar o que mais se adequa e explica as variáveis é o modelo *spatial error*, uma vez que o critério de informação de Akaike é o melhor.

A Tabela 8 mostra que um coeficiente sobre os erros espacialmente correlacionados (LAMBDA) é adicionado como um indicador adicional. Esse indicador possui um efeito positivo e é altamente significativo. Como resultado, o ajuste do modelo geral melhorou em relação ao primeiro modelo (sem coeficiente espacial) indicado em valores mais altos de R-squared e critério de informação de Akaike. Assim como o modelo anterior, os efeitos de outras variáveis independentes permanecem praticamente os mesmos.

A tabela mostra os resultados do modelo *spatial lag*. O termo espacial aparece como W\_LOGPV, seu parâmetro de coeficiente (Rho) reflete a dependência espacial inerente aos nossos dados da amostra, medindo a influência média nas observações de suas observações vizinhas. O parâmetro tem um efeito positivo e é altamente significativo. Como resultado, entretanto, o ajuste geral do modelo piorou, como indicado em valores menores de R quadrado e critério de informação de Akaike. Os efeitos de outras variáveis independentes permanecem praticamente os mesmos.

Dessa forma, como a regressão clássica inicial já indicava, o modelo que melhor explica o fenômeno espacial foi o *spatial error* demonstrando que a correlação espacial

se encontra no resíduo do modelo. Além das características espaciais, as outras variáveis significantes para o modelo, influenciando positivamente, foram a participação do PIB do agronegócio em cada município, radiação e número de empregados formais.

Em relação as hipóteses baseadas em trabalhos anteriores e que gostaríamos de testar:

H1: Adoção dos painéis fotovoltaicos é espacialmente correlacionada, logo, a adoção dessa tecnologia em uma área de uma localização dependerá da adoção dessa tecnologia pelos seus vizinhos.

H2: Municípios com maior radiação solar tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H4: Municípios com maior número de pessoas ocupadas tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

Já no que se refere as hipóteses abaixo, os resultados não mostraram significância das suas variáveis. Entretanto, alguns efeitos podem ter sido captados nas variáveis acima, exemplo disso seria H3, embora a variável salario não seja significativa, parte de sua explicação (municípios com maior salário médio mensal tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos) também é encontrada em H4, já que municípios com maior número de pessoas ocupadas também acaba apresentando um fator de renda.

H3: Municípios com maior salário médio mensal tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H5: Municípios com maiores índices de educação tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

H6: Municípios com maior densidade populacional tendem a possuir mais painéis fotovoltaicos.

A tabela X resume os principais achados em comparação com a revisão bibliográfica.

<b>Determinante Teórico</b>	<b>Autores</b>	<b>Hipótese</b>	<b>Resultado</b>
<i>Peer Effects</i>	Bollinger & Gillingham, 2012; Robinson & Rai, 2015; Palm, 2017	H1	Positivo, convergente com trabalhos anteriores
Taxa Média de Irradiação Solar	Dorvlo & Ampratwum, 1998; Tsoutsos et al, 2003; Hang Et Al., 2008; Lam et Al., 2008	H2	Positivo, convergente com trabalhos anteriores
Salário médio	Sardianou & Genoudi, 2013; Lam, 1998; Chang Et Al., 2008	H3	Não significativa, mas pode ser captado em H4
Número de empregados		H4	Positivo, convergente com trabalhos anteriores
Educação	Guagnano et Al, 1986; Haas et Al., 1999, Shi Et Al., 2013	H5	Não significativa
Densidade Populacional	Kwan, 2012; Zahran et al, 2008; Schaffer & Brun, 2012	H6	Não significativa

## 5. DISCUSSOES

### 6.1 Recomendações sobre políticas públicas

Como visto, a energia renovável tem crescido rapidamente nos últimos anos, especialmente na área de geração de eletricidade, adicionando capacidade de geração com menor impacto ao ambiente. No entanto, contabilizando o consumo final, a contribuição geral ainda é baixa, visto que o setor ainda é dominado combustíveis fósseis.

A energia renovável ainda precisa crescer mais e mais rápido para provocar uma transição energética que atinja as metas climáticas, garanta acesso universal à energia, reduza a poluição atmosférica e melhore a segurança energética. Um estudo da IEA

(2016) sugere que a energia renovável, juntamente com a eficiência energética, é responsável por contribuir com 80% de o esforço adicional necessário para alcançar o objetivo de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas metas.

## **6.2 Ações já realizadas**

Em relação às recomendações de políticas, para a geração distribuída, recomenda-se várias ações dentro dos diversos níveis de governo: Incluir os sistemas de geração de energia solar fotovoltaica nos contratos de financiamento habitacional nos moldes do Sistema Financeiro da Habitação (SFH), para que possam ser financiados com os mesmos recursos e mesmas condições; incluir os sistemas de geração fotovoltaica nos programas de habitação do Governo Federal, como o Minha Casa Minha Vida, e em programas estaduais, como o Casa Paulista, do CDHU-SP

Em imóveis já construídos, estender as condições de financiamento do Sistema Financeiro de Habitação também para a aquisição de sistemas fotovoltaicos, por meio de uma linha especial dentro do Construcard e/ou do Producard (com custos mais acessíveis, a exemplo das linhas do FGTS) ou de outro programa específico para este fim; coordenar esforços para incentivar os Estados e municípios a estabelecer abatimentos no ISS incidente sobre a instalação de sistemas fotovoltaicos e no IPTU de imóveis que investirem nesta tecnologia. Essas ações podem ter um positivo nas variáveis renda e emprego, isso acontece porque embora o salário e emprego não aumentem, condições financeiras mais favoráveis facilitam o preço de aquisição de bens.

Realizar campanhas de conscientização e educação para mostrar à sociedade brasileira os benefícios que a geração distribuída e a energia solar fotovoltaica podem trazer ao país, em especial nas esferas econômica, social, ambiental e de planejamento energético.

## **6. CONCLUSÕES**

Esse trabalho teve como principal objetivo examinar os fatores socioeconômicos determinantes na adoção de painéis fotovoltaicos residenciais no Brasil e analisar sua distribuição espacial.

Através de uma revisão bibliográfica prévia, foram encontradas diversas determinantes que se mostraram importantes em trabalhos anteriores. Essas determinantes foram utilizadas nesse trabalho com o objetivo de analisar se no Brasil

também seriam significativas. Junto às hipóteses, a revisão bibliográfica também buscou contextualizar o desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos no Brasil e no grande potencial de utilização, devido principalmente, a abundante radiação. Não obstante, com o intuito de explicar outras variáveis, também foi levantado barreiras que a literatura apontava para o caso do Brasil. Por fim, dados sobre o desenvolvimento dos painéis nos últimos anos justificaram o interesse deste estudo, já que seu crescimento e crescente e promissor.

As determinantes escolhidas para explicar a adoção de painéis fotovoltaicos foram: efeitos espaciais, taxa Média de Irradiação Solar, salário médio, número de empregados, Educação, Densidade Populacional e duas variáveis de controle PIB geral e porcentagem do PIB do agronegócio naquele município. A matriz de correlação e os testes antes da regressão inicial demonstraram que não havia problema com o modelo.

A regressão inicial demonstrou que as únicas variáveis significantes eram radiação e número de empregados por municípios, embora não haja significância de outras variáveis, o resultado dessas duas demonstra uma convergência com estudos anteriores, aonde a renda e radiação da região influenciavam positivamente na adoção dos painéis. Outro resultado demonstrado por essa regressão foi a presença de autocorrelação espacial e a indicação de que seria necessárias modelos espaciais para melhor explicar esses efeitos.

Os dois modelos executados foram o *spatial error* e *spatial lag*, embora o *r*-quadrado e o critério de informação de Akaike dos dois seja melhor que a regressão clássica, afirmando novamente que o modelo espacial explica melhor os resultados, o modelo escolhido foi o *spatial error* exatamente por conter melhores valores de *r*-quadrado e critério de informação de Akaike.

Também foram apresentados clusters espaciais presentes no Brasil. Embora de resultado ainda tímido, pois foram identificados clusters regionais apenas na grande São Paulo, na região de Uberlândia e no norte do Rio de Janeiro, essas informações podem ajudar a responder e elaborar novas questões como: há algum incentivo nessas regiões que as diferencia? Quais são as determinantes estudadas nesse trabalho que poderiam explicar a formação desses clusters Renda, educação, radiação, densidade? Outros trabalhos podem também analisar quais as determinantes através de outro método, uma *survey* com os adotantes complementaria os resultados encontrados aqui. Outra sugestão

é aplicar este trabalho em unidades federativas ou municípios que possuam mais dados, onde a manifestação e observação do efeito de pares seja ainda mais evidente.

Em relação à limites encontrados e sugestões futuras, embora a teoria aponte diversos fatores que podem ser determinantes na adoção de painéis fotovoltaicos, para o método utilizado e para o nível de agregação proposto (municipal), as principais barreiras encontradas foram a falta de dados.

O último censo populacional foi realizado em 2010, ano anterior ao início da política de incentivo à micro geração. Além disso, dados que possuem maior nível de detalhamento sobre a população dos não estão disponíveis para toda a população brasileira, a Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios, por exemplo, tem dados anuais sobre a população, mas apenas para estados e grandes capitais. Dessa forma, embora a Tabela 1 mostre vários incentivos e barreiras, as hipóteses desse trabalho foram moldadas também à disponibilidade de dados disponíveis para a construção de modelo de dados em painel.

Em suma, acreditamos que essa dissertação contribui para a expansão de estudos sobre energia sustentável do país, apresentando uma alternativa abundante, cada vez mais barata e com potencial de participação do cidadão. Academicamente, contribui para o entendimento da adoção dessa tecnologia no país e aplica a ferramenta de análise espacial às ferramentas clássicas econômicas.

## REFERÊNCIAS

ABU-ARQOUB, M., ISSA, G.F., SHUBITA, A.F., BANNA, A.A., 2014. Demand-driven algorithm for sharing and distribution of photovoltaic power in a small local area grid. *Int. J. Inf. Technol. Web Eng.* 9, 45–58.

ALLEN, S.; HAMMOND, G.; MCMANUS, M. Prospects for and barriers to domestic micro-generation: a United Kingdom perspective, *Appl. Energy* 85 (6) (2008)528–544.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Nota Técnica N° 0056/2017–SRD/ANEEL–Processo n°: 48500.004924/2010-51. Brasília, 2017. Cadernos Temáticos ANEEL: Micro e Mini geração Distribuída–Sistema de Compensação de Energia Elétrica, 2ª Ed. Brasília, 2016a.

ANSELIN, L. *Spatial econometrics*, Ch. 14, in: H. Badi Baltagi (Ed.), *A Companion to Theoretical Econometrics*, Blackwell Publishers Ltd., Massachusetts, 2001.

ANSELIN, L. *Spatial econometrics methods and models* Dordrecht: 1988.

ANSELIN, L. *Spatial Econometrics*. Bruton Center 1999.

ANTONELLI, MARCO & DESIDERI, UMBERTO. (2014). The doping effect of Italian feed-in tariffs on the PV market. *Energy Policy*. 67. 583-594. 10.1016/j.enpol.2013.12.025.

AVRIL, S. MANSILLA, C & BUSSON, M & LEMAIRE, T. (2012). Photovoltaic energy policy: Financial estimation and performance comparison of the public support in five representative countries. *Energy Policy*. 51. 244–258. 10.1016/j.enpol.2012.07.050.

BALCOMBE, P.; RIGBY, D.; AZAPAGIC, A. Motivations and barriers associated with adopting micro generation energy technologies in the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 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 Econ.* 51 (2015) 417–429.

BAZILIAN, M., ONYEJI, I., LIEBREICH, M., MACGILL, I., CHASE, J., SHAH, J., ZHENGRONG, S., 2013. Re-considering the Economics of Photovoltaic Power. *Renew. Energy* 53,329–338.

BERGMAN, N ET AL. UK microgeneration. Part I: policy and behavioural aspects. *Proc Inst Civ Eng: Energy* 2009;162(1):23–36.

BERGMAN, NOAM & EYRE, NICK. (2011). What role for microgeneration in a shift to a low carbon domestic energy sector in the UK? *Energy Efficiency*. 4. 335-353. 10.1007/s12053-011-9107-9.

- BOLLINGER, B.; GILLINGHAM, K. Peer Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Panels. *Marketing Science*, v. 31, n. 6, p. 900–912, 2012.
- BOUTASSETA, N; RAMDANI, M; MEKHILEF, S (2018): Fault-tolerant power extraction strategy for photovoltaic energy systems. In *Solar Energy* 169, pp. 594–606. DOI: 10.1016/j.solener.2018.05.031.
- BRUM ROSA, C; MAIRESSE SILUK, J; MICHELS, L (2016): Proposal of the Instrument for Measuring Innovation in the Generation Photovoltaics. In *IEEE Latin Am. Trans.* 14 (11), pp. 4534–4539. DOI: 10.1109/TLA.2016.7795825.
- CAIRD S, ROY R. Adoption and use of household micro generation heat technologies. *Low Carbon Econ* 2010;1(2):61–70.
- CHANG, K.-C., LEE, T.-S., ET AL., 2008. Outlook for solar water heaters in Taiwan. *Energy Policy* 36 (1), 66–72.
- CHERRINGTON, R., GOODSHIP, V., LONGFIELD, A., KIRWAN, K., 2013. The feed-in tariff in the UK: A case study focus on domestic photovoltaic systems
- CLAUDY, M., & PETERSON, M., & O'DRISCOLL, A. (2013). Understanding the Attitude-Behavior Gap for Renewable Energy Systems Using Behavioral Reasoning Theory. *Journal of Macro marketing*, 33. 273. 10.1177/0276146713481605.
- CLAUDY, M., MICHELSEN, C., O'DRISCOLL, A. AND MULLEN, M.: Consumer Awareness in the Adoption of Microgeneration Technologies: an Empirical Investigation in the Republic of Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, (7), 2010 pp.2154–2160.
- CLAUDY, M.; MICHELSEN, C.; O'DRISCOLL, A. The diffusion of micro generation technologies - assessing the influence of perceived product characteristics on homeowner's willingness to pay. *Energy Policy*, v. 39, n. 3, p. 1459–1469, 2011.
- COHEN, W. M.. Innovation and Learning: The Two Faces of R&D. *Economic Journal*, v. 99, n. 397, p. 569-96, 1988.
- CUCCHIELLA, F. AND IDIANO, D'ADAMO,, (2012), Estimation of the energetic and environmental impacts of a roof-mounted building-integrated photovoltaic systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, issue 7, p. 5245-5259.
- DASTRUP, S.R.; ZIVIN, J.G.; COSTA, D.L.; KAHN, M.E. Understanding the Solar Home price premium: electricity generation and Green social status, *Eur. Econ. Rev.* 56 (5) (2012) 961–973
- DHARSHING, S. & STEFANIE LENA HILLE, 2017. "The Energy Paradox Revisited: Analyzing the Role of Individual Differences and Framing Effects in Information Perception," *Journal of Consumer Policy*, Springer, vol. 40(4), pages 485-508, December.
- DORVLO, A.S.S., AMPRATWUM, D.B., 1998. Summary climatic data for solar technology development in Oman. *Renewable Energy* 14 (1–4), 255–262.

DURHAM, C. A.; COLBY, B. G.; LONGSTRETH, M. The Impact of State Tax Credits and Energy Prices on Adoption of Solar Energy Systems. *Land Economics*, v. 64, n. 4, p. 347, Nov. 1988.

DÜŞTEGÖR, D; SULTANA, N; FELEMBAN, N; QAHTANI, D (2018): A smarter electricity grid for the Eastern Province of Saudi Arabia: Perceptions and policy implications. In *Utilities Policy* 50, pp. 26–39. DOI: 10.1016/j.jup.2017.09.009.

ELHORST, J.P. Specification and estimation of *spatial* panel data models, *Int. Reg.Sci. Rev.* 26 (3) (2003) 244–268.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. Inserção da Geração Fotovoltáica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos. Nota Técnica DEA 19/14. Revisada). pdf>. Acesso em: 08 dez. 2014. EPE, 2012. 58 p. Disponível em: <<http://www.>

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE]. Nota Técnica EPE: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira. Rio de Janeiro: MME – Ministério de Minas e Energia, 2012.[epe.gov.br/geracao/documents/estudos\\_23/nt\\_energiasolar\\_2012.pdf](http://epe.gov.br/geracao/documents/estudos_23/nt_energiasolar_2012.pdf)>. Acesso em: 08 dez. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGETICA. 2012 NOTA TÉCNICA DEA 26/14 Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023)

ENLUND, T., ERIKSSON, E., 2016. Förnybar energi för alla. Slutrapport Green Leap, KTH. KTH, Green Leap, Stockholm.

FAIERS, A., NEAME, C., 2006. Consumer attitudes towards domestic solar power systems. *Energy Policy* 34 (14), 1797–1806.

FARIA, H.; TRIGOSO, F.; CAVALCANTI, J.. (2017): Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, pp. 469–475. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.076.

FERON, D. (2016): Véhicule autonome, véhicule automatisé et interaction avec le conducteur. In *Planète Robots* 37, pp. 32–33.

FRANCISCO, E. R. Indicadores de Renda baseados em Consumo de Energia Elétrica: Abordagens Domiciliar e Regional na Perspectiva da Estatística Espacial. 381 p. Tese de Doutorado. Escola de Administração de Empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas. São Paulo, SP. 2010. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/8158/71060100728.pdf?sequence=1>

GALLEGOS, R., TAPIA, E., ROMERO, S., 2014. Impact of the subsidy on the electric rate in the use of renewable energy for net zero housing in Mexicali, Mexico. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 181, 291–300.

GANGODAGAMAGE C., ZHOU X., LIN H. (2008) Autocorrelation, *Spatial*. In: *Encyclopedia of GIS*. Springer, Boston, MA

- GARLET, T., B; RIBEIRO, J., L.D.; SAVIAN, F.; SILUK, J., C (2019): Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 111, pp. 157–169. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.013.
- GRAU, THILO, HUO, MOLIN AND NEUHOFF, KARSTEN, (2012), Survey of photovoltaic industry and policy in Germany and China, *Energy Policy*, 51, issue C, p. 20-37.
- GRAZIANO, D.J., OZIK, J., 2014. Modeling Solar PV Adoption: A Social-Behavioral Agent-Based Framework. *Energy Market Prediction: Papers from the 2014 AAAI Fall Symposium*
- GRIFFITH, D. A.; PERES-NETO, P. R. *Spatial Modeling in Ecology: The Flexibility of Eigen function Spatial Analyses*. *Ecology*, v. 87, n. 10, p. 2603-2613, 2006.
- GUAGNANO, G. et al. Innovation Perception and Adoption of Solar Heating Technology. *The Journal of Consumer Affairs*, v. 20, n. 1, p. 48–64, 1986.
- GUIDOLIN, M. MORTARINO, C. Cross-country diffusion of photovoltaic systems: Modeling choices and forecasts for national adoption rates. *Technological Forecasting & Social Change*, v.77, p.279-296, 2010.
- GUJARATI, D.N. (2004) *Basic Econometrics*. 4th Edition, McGraw-Hill Companies.
- HAAS, R., ORNETZEDER, M., ET AL., 1999. Socio-economic aspects of the Austrian 200 kWp-photovoltaic-rooftop programme. *Solar Energy* 66 (3), 183–191.
- HAAS, R., PANZER, C., RESCH, G., RAGWITZ, M., REECE, G., HELD, A., 2011. A historical review of promotion strategies for electricity from renewable energy sources in EU countries *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011,
- HACK S. International experiences with the promotion of solar water heaters (SWH) at household-level, deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Editor 2006: Mexico, City; 2006. .
- HANG, Q. et al. Prospect of concentrating solar power in China-the sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 12, n. 9, p. 2498–2507, 2008.
- HARSHING, S. Energy Research & Social Science Household dynamics of technology adoption : A *spatial* econometric analysis of residential solar photovoltaic (PV) systems in Germany. *Chemical Physics Letters*, v. 23, p. 113–124, 2017.
- HEDRÉN, J. 2009. Shaping sustainability: is there an unreleased potential in utopian thought? *Futures* 41(4):220–225.
- IEA – INTERNATIONAL AGENCY ENERGY. PVPS annual report 2014: Photovoltaic Power Systems Programme. [S.l.], 2010.

IEA – INTERNATIONAL AGENCY ENERGY. Renewable Energy Policy recommendations 2018: Photovoltaic Power Systems Programme.

INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética), O que é Geração Distribuída, 2014. Available: <[www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Access: 20/03/2017. TRIGOSO F.M., QUAGLIA R.B., DE MORAES A.M., DE OLIVEIRA S.H.F.

IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.

ISLAM, T. Household level innovation diffusion model of photovoltaic (PV) solar cells from stated preference data. *Energy Policy*, v. 65, p. 340–350, 2014.

ISLAM, T.; MEADE, N. (2013): The impact of attribute preferences on adoption timing: The case of photo-voltaic (PV) solar cells for household electricity generation. In *Energy Policy* 55, pp. 521–530. DOI: 10.1016/j.enpol.2012.12.041.

JACOBSSON, S., LAUBER, V., 2006. The politics and policy of energy system transformation—explaining the German diffusion of renewable energy technology. *Energy Policy* 34 (3), 256–276.

JAGER, W., 2006. Stimulating the diffusion of photovoltaic systems: a behavioral perspective. *Energy Policy* 34, 1935–1943.

JENNER, S., GROBA, F., INDVIK, J., 2013. Assessing the strength and effectiveness of renewable electricity feed-in-tariffs in European Union countries. *Energy Policy* 52, 385–401.

JIANG, A., ZHU, Y., 2012. Impact of incentives and system efficiency on the life cycle cost of photovoltaic systems. *Int. J. Constr. Educ. Res.* 8, 204–222.

KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. (2015): Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49, pp. 60–66. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.058.

KEIRSTEAD, JAMES, (2007), Behavioural responses to photovoltaic systems in the UK domestic sector, *Energy Policy*, 35, issue 8, p. 4128-4141.

KELLSTEDT, P. M.; ZAHRAN, S.; VEDLITZ, A. Personal efficacy, the information environment, and attitudes toward global warming and climate change in the United States. *Risk Analysis*, v. 28, n. 1, p. 113–126, 2008.

KONZEN, G. Difusão de sistemas fotovoltaicos residenciais conectados à rede no Brasil :uma simulação via modelo de Bass. 108 p. Dissertação de Mestrado. Programa de PósGraduação em Energia, USP. São Paulo, SP., 2014. Disponível em: [http://lsf.iee.usp.br/lsf/images/Mestrado/Dissertacao\\_Gabriel\\_Konzen.pdf](http://lsf.iee.usp.br/lsf/images/Mestrado/Dissertacao_Gabriel_Konzen.pdf)

KWAN, C. L., 2012. "Influence of local environmental, social, economic and political variables on the *spatial* distribution of residential solar PV arrays across the United States," *Energy Policy*, Elsevier, vol. 47(C), pages 332-344.

LABAY, D. G.; KINNEAR, T. C. Exploring the Consumer Decision Process in the Adoption of Solar Energy Systems. *Journal of Consumer Research*, v. 8, n. 3, p. 271–278, 1981.

LAM, J.C., WAN, K.K.W., ET AL., 2008. Climatic influences on solar modelling in China. *Renewable Energy* 33 (7), 1591–1604.

LANGE, W. Metodologia de mapeamento da área potencial de telhados de edificações residenciais no Brasil para fins de aproveitamento energético fotovoltaico. Empresa De Pesquisa Energética/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, estudo interno elaborado por meio da TerraGIS. Rio de Janeiro EPE/GIZ, 2012.

LANGNIß, O.; DIEKMANN, J.; LEHR, U. Advanced mechanisms for the promotion of renewable energy—models for the future evolution of the German Renewable Energy Act, *Energy Policy* 37 (4) (2009) 1289–1297.

LEE, E.-J.; LEE, J.; EASTWOOD, D. A Two-Step Estimation of Consumer Adoption of Technology-Based Service Innovations. *The Journal of Consumer Affairs*, v. 37, n. 2, p. 256–282, 2003.

LEENHEER J, DE NOOIJ M, SHEIKH O. Own power: motives of having electricity HM Government. Micro generation strategy, DECC, Editor 2011.

LESAGE, J.; DOMINGUEZ, M. The importance of modeling *spatial* spillovers in public choice analysis. *Public Choice*, v. 150, n. 3, p. 525-545, 2012. ISSN 0048- 5829.

LIPP, J. Lessons for effective renewable electricity policy from Denmark, Germany and the United Kingdom, *Energy Policy* 35 (11) (2007) 5481–5495.

MAHAPATRA K ET AL. Business models for full service energy renovation of singlefamily houses in Nordic countries. *Applied Energy*, Vol. 112, 2013, p. 1558-1565.

MANJU, S.; SAGAR, NETRAMANI (2017): Progressing towards the development of sustainable energy: A critical review on the current status, applications, developmental barriers and prospects of solar photovoltaic systems in India. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, pp. 298–313. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.226.

MANSKI, C.F. Identification of endogenous social effects: the reflection problem, *Rev. Econ. Stud.* 60 (3) (1993) 531–542.

MARTINS, R. A. Abordagens quantitativa e qualitativa. In: MIGUEL, P. A. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. p. 47-63.

MARTINS, R. A. Sistemas de medição de desempenho: um modelo para estruturação do uso. Tese. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

MILLS, B.F., SCHLEICH, J., 2009. Profits or preferences? Assessing the adoption of residential solar thermal technologies, *Energy Policy*, 37, issue 10, p. 4145-4154

- MORRIS, M. G.; VENKATESH, V. Age Differences in Technology Adoption Decisions: Implications for A Changing Work Force. *Personnel Psychology*, v. 53, p. 375–403, 2000.
- MÜLLER, S.; RODE, J. The adoption of photovoltaic systems in Wiesbaden, Germany. *Economics of Innovation and New Technology*, v. 22, n. 5, p. 519–535, 2013.
- NOLL, D., C., RAI, V., 2014. Solar community organizations and active peer effects in the adoption of residential PV. *Energy Policy* 67,330–343. Openshaw, S., 1984
- OBEIDAT, F. (2018): A comprehensive review of future photovoltaic systems. In *Solar Energy* 163, pp. 545–551. DOI: 10.1016/j.solener.2018.01.050.
- PALM, J. (2018): Household installation of solar panels – Motives and barriers in a 10-year perspective. In *Energy Policy* 113, pp. 1–8. DOI: 10.1016/j.enpol.2017.10.047.
- PALM, J., TENGVARD, M., 2011. Motives for and barriers to household adoption of small-scale production of electricity: examples from Sweden. *Sustain.: Sci. Pract. Policy* 7, 6–15.
- PEDERSEN, L. 2000. The dynamics of green consumption: a matter of visibility? *Journal of Environmental Policy and Planning* 2(3):193–210.
- PRAETORIUS, B ET AL. Technological innovation systems for micro generation in the UK and Germany – a functional analysis. *Techno Anal Strategy Manage* 2010;22(6):745–64..
- REN21. 2018. *Renewables 2018 Global Status Report* (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9818911-3-3
- REN21.2015. *Renewable Energy Policy Network For The 21st Century. Renewables 2015: global status report*. Paris, 2015.
- RICHTER, L.-L., *Social Effects in the Diffusion of Solar Photovoltaic Technology in the UK*. Faculty of Economics, University of Cambridge, 2013
- ROBINSON, S.A.; RAI, V. Determinants of *spatial*-temporal patterns of energy technology adoption: an agent-based modeling approach, *Appl. Energy* 151(2015) 273–284.
- 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*, v. 78, p. 38–48, 2016.
- RODRIGUES. S; TORABIKALAKI, R; XIAOJU CHEN; RAMEZANI IVAKI ET AL. (2016): Economic feasibility analysis of small scale PV systems in different countries. In *Solar Energy* 131, pp. 81–95. DOI: 10.1016/j.solener.2016.02.019.
- ROGERS, E. M. *Diffusion of Innovations*. 4th Ed. New York: The Free Press, 1995.
- SARDIANOU, E.; GENOUDI, P. Which factors affect the willingness of consumers to adopt renewable energies? *Renewable Energy*, v. 57, p. 1–4, 2013.

- SCARPA, R. WILLIS, K. Willingness-to-pay for renewable energy: primary and discretionary choice of British households' for micro-generation technologies, *Energy Econ.* 32 (1) (2010) 129–136.
- SCHAFFER, A.J. BRUN, S. Beyond the sun—socioeconomic drivers of the adoption of small-scale photovoltaic installations in Germany, *Energy Res. Soc. Sci.* 10(2015) 220–227.
- SCOTT, J.; CARRINGTON, P.J. *The SAGE Handbook of Social Network Analysis*, SAGE Publications, 2011.
- SHI, L., ZHOU, W., KRISTRÖM, B., 2013. Residential demand for green electricity. *Environ. Econ.* 4, 1.
- SHWOM, R. & A. LORENZEN, J. (2012). *Changing Household Consumption to Address Climate Change: Social Scientific Insights and Challenges*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. 3. 10.1002/wcc.182.
- SIGRIN, B. & PLESS, J. & DRURY, E.. (2015). Diffusion into new markets: Evolving customer segments in the solar photovoltaics market. *Environmental Research Letters*. 10. 10.1088/1748-9326/10/8/084001.
- SKILL, K. 2008. (Re)creating Ecological Action Space: Householders' Activities for Sustainable Development in Sweden. Published Doctoral Dissertation. Department of Thematic Studies: Technology and Social Change. Linköping University, Linköping, Sweden.
- SOLANGI, K.H., ISLAM, M.R., SAIDUR, R., RAHIM, N.A., FAYAZ, H., 2011. A review on global solar energy policy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2149–2163.
- TIMILSINA, G. & KURDGELASHVILI, L. & NARBEL, P. (2011). A Review of Solar Energy: Markets, Economics and Policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 16. 10.1016/j.rser.2011.08.009.
- TSOUTSOS, T., GEKAS, V., ET AL., 2003. Technical and economical evaluation of solar thermal power generation. *Renewable Energy* 28 (6), 873–886.
- WALTERS ,R.; WALSH, P.R. Examining the financial performance of micro-generation wind projects and the subsidy effect of feed-in tariffs for urban locations in the United Kingdom, *Energy Policy*, Volume 39, Issue 9, 2011,
- WEE H-M ET AL. Renewable energy supply chains, performance, application barriers, and strategies for further development. *Renew Sustain Energy Rev* 2012; 16(8):5451–65
- WELSCH, H., KÜHLING, J., 2009. Determinants of pro environmental consumption: the role of reference groups and routine behavior. *Ecol.Econ.* 69, 166–176.
- WILLIS, K., SCARPA, R., GILROY, R., HAMZA, N., 2011. Renewable energy adoption in an ageing population: heterogeneity in preferences for micro-generation technology adoption. *Energy Policy* 39, 6021–6029.

WIMBERLY J. Banking the green: customer incentives for EE and renewable. In: EcoAlign; 2008. .

WORLD HEALTH ASSOCIATION. Division of Mental Health. Qualitative Research for Health Programmes. Geneva: WHA, 994.

WÜSTENHAGEN, R. BILHARZ, M. Green energy market development in Germany: effective public policy and emerging customer demand, *Energy Policy* 34 (13) (2006) 1681–1696.

YAMAGUCHI Y ET AL. Prediction of photovoltaic and solar water heater diffusion and evaluation of promotion policies on the basis of consumers' choices. *Appl Energy* 2013; 102:1148–59.

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

ZHANG, S. & HE, Y.. (2013). Analysis on the development and policy of solar PV power in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21. 393-401. 10.1016/j.rser.2013.01.002.

ZHANG, Y.; SONG, J.; HAMORI, S. Impact of subsidy policies on diffusion of photovoltaic power generation. *Energy Policy*, v. 39, n. 4, p. 1958–1964, 2011.

ZILLES, R. et al. *Sistemas Fotovoltáicos Conectados à Rede Elétrica*. Oficina de Textos, São Paulo, 2012.