

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ECONOMIA**

JÚLIA LOPES ALVES

**ASSOCIAÇÃO CANÔNICA ENTRE INDICADORES DE MICRO E MINIGERAÇÃO
DISTRIBUÍDA E INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DOS MUNICÍPIOS
BRASILEIROS EM 2022**

**JUIZ DE FORA - MG
2026**

JÚLIA LOPES ALVES

ASSOCIAÇÃO CANÔNICA ENTRE INDICADORES DE MICRO E MINIGERAÇÃO
DISTRIBUÍDA E INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DOS MUNICÍPIOS
BRASILEIROS EM 2022

Monografia submetida ao curso de Ciências
Econômicas da Universidade Federal de Juiz de
Fora, como requisito parcial à obtenção do
título de bacharel em Ciências Econômicas.

Orientador: Prof. Dr. Weslem Rodrigues Faria
Coorientador: Ms. Filipe Santiago dos Reis

JUIZ DE FORA - MG
2026

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Lopes Alves, Júlia .

ASSOCIAÇÃO CANÔNICA ENTRE INDICADORES DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA E INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS EM 2022 /

Júlia Lopes Alves. -- 2026.

55 p. : il.

Orientadora: Weslem Rodrigues Faria

Coorientadora: Filipe Santiago dos Reis

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Economia, 2026.

1. Micro e Mini Geração Distribuída.. 2. Análise de Correlação Canônica.. 3. Indicadores Socioeconômicos.. 4. Energia Solar Fotovoltaica.. I. Rodrigues Faria , Weslem , orient. II. Santiago dos Reis, Filipe, coorient. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
REITORIA - FACECON - Depto. de Economia

FACULDADE DE ECONOMIA / UFJF

ATA DE APROVAÇÃO DE MONOGRAFIA II (MONO B)

Na data de 10/07/2026, a Banca Examinadora, composta pelos professores

- 1 - Weslem Rodrigues Faria - orientador;
- 2 - Filipe Santiago dos Reis - coorientador; e
- 3 - Admir Antonio Betarelli Junior.

reuniu-se para avaliar a monografia da acadêmica Júlia Lopes Alves, intitulada: ASSOCIAÇÃO CANÔNICA ENTRE INDICADORES DE MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA E INDICADORES SOCIOECONÔMICOS DOS MUNICÍPIOS BRASILEIROS EM 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Weslem Rodrigues Faria, Professor(a)**, em 10/07/2026, às 10:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Filipe Santiago dos Reis, Usuário Externo**, em 10/07/2026, às 10:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Admir Antonio Betarelli Junior, Professor(a)**, em 10/07/2026, às 13:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **3078854** e o código CRC **F224A83C**.

*Dedico esta monografia aos meus pais e a
minha irmã.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha irmã, Na, por ter sido a grande incentivadora para que eu iniciasse esta graduação. Quando recebi a notícia que havia sido aprovada, ela foi a primeira pessoa a saber, e choramos juntas de felicidade. Você foi fundamental em toda essa aventura universitária, estive ao meu lado desde o primeiro momento e tornou essa caminhada muito mais leve. Você é meu tudo.

Aos meus pais, dedico minha mais profunda gratidão por todo o amor, cuidado e paciência que sempre tiveram comigo. Obrigada por acreditarem nos meus sonhos, por me apoiarem em cada decisão e por me proporcionarem a oportunidade de estudar. Vocês são os melhores pais do mundo, e eu amo vocês mais do que as palavras conseguem expressar.

Agradeço também às irmãs que a vida me deu ao longo dessa jornada a Mari, Duda e a Lari, com quem dividi o apartamento e também momentos felizes, a correria das provas, as preocupações, as conquistas e os desafios. Em especial, Duda e Lari, que estiveram comigo durante a maior parte da graduação. Meu agradecimento também a Vanessa e Ana Júlia, que hoje dividem essa fase comigo. Agradeço também pela generosidade e a paciência de vocês ao receberem minha família em nosso apartamento durante o período em que minha mãe esteve hospitalizada fizeram toda a diferença.

Ao professor Thiago Almeida, minha sincera gratidão por ter marcado profundamente minha trajetória. Obrigada por todas as oportunidades, pelos ensinamentos, pela confiança e por abrir tantas portas ao longo desses anos. Você é uma grande referência para mim.

Agradeço também aos meus amigos Tânia, LC e Braga, compartilhamos horas de estudo, dificuldades, preocupações, conquistas e muitos momentos inesquecíveis. Obrigada pelo apoio, pela amizade. Espero levar a amizade de vocês para toda a vida.

De maneira muito especial, agradeço ao Filipe por toda ajuda, paciência e generosidade ao longo da elaboração da pesquisa, você foi essencial em todo esse processo. Agradeço também ao professor Weslem pelo apoio, pelas orientações e pelos conhecimentos compartilhados ao longo desta jornada.

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

RESUMO

A expansão da micro e minigeração distribuída (MMGD) representa uma das principais transformações recentes do Sistema Elétrico Brasileiro, impulsionando a descentralização da geração de energia e ampliando a participação de fontes renováveis, especialmente a solar fotovoltaica. Diante da heterogeneidade espacial observada entre os municípios brasileiros, este estudo teve como objetivo investigar as associações multivariadas entre indicadores de MMGD e indicadores socioeconômicos por meio da Análise de Correlação Canônica (ACC). A análise foi realizada para 2.169 municípios brasileiros com potência instalada positiva de MMGD em 2022. Foram considerados indicadores relacionados à intensidade e ao perfil da geração distribuída, bem como variáveis representativas das condições econômicas, financeiras, produtivas, educacionais, urbanas e sociais dos municípios. A aplicação da ACC evidenciou uma correlação canônica estatisticamente significativa na primeira função ($\rho = 0,538$), concentrando a maior parcela da variância compartilhada entre os dois conjuntos de variáveis. Os resultados mostraram que municípios com maior escolaridade, melhor infraestrutura de saneamento, maior renda, maior acesso ao crédito e maior dinamismo produtivo tendem a apresentar maior difusão da MMGD, enquanto níveis mais elevados de vulnerabilidade social estiveram associados a menor inserção nesse mercado. Conclui-se que a expansão da MMGD ocorreu de forma mais intensa em municípios com melhores condições estruturais de desenvolvimento, indicando que a transição energética brasileira ainda reflete desigualdades socioeconômicas e territoriais preexistentes.

Palavras-chave: 1. Micro e Minigeração Distribuída. 2. Análise de Correlação Canônica. 3. Indicadores Socioeconômicos. 4. Energia Solar Fotovoltaica.

ABSTRACT

The expansion of distributed generation (DG) has been one of the most significant recent transformations in the Brazilian electricity sector, fostering the decentralization of electricity generation and increasing the share of renewable energy sources, particularly solar photovoltaic systems. Given the spatial heterogeneity observed across Brazilian municipalities, this study investigates the multivariate associations between DG indicators and socioeconomic characteristics using Canonical Correlation Analysis (CCA). The analysis was conducted for 2,169 Brazilian municipalities with positive installed DG capacity in 2022. The empirical model incorporates indicators related to the intensity and composition of distributed generation, together with variables representing municipalities' economic, financial, productive, educational, urban, and social conditions. The CCA identified a statistically significant first canonical function ($p = 0.538$), which accounted for the largest share of the variance jointly explained by the two sets of variables. The results indicate that municipalities with higher educational attainment, better sanitation infrastructure, higher income levels, greater access to credit, and stronger productive dynamism tend to exhibit greater diffusion of distributed generation, whereas higher levels of social vulnerability are associated with lower participation in this market. Overall, the findings suggest that the expansion of distributed generation has occurred more intensively in municipalities with more favorable structural development conditions, indicating that Brazil's energy transition continues to reflect pre-existing socioeconomic and territorial inequalities.

Keywords: 1. Distributed Generation. 2. Canonical Correlation Analysis. 3 Socioeconomic Indicators. 4. Solar Photovoltaic Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Potência Total Instalada em 2022	29
Figura 2 – Central Geradora Solar Fotovoltaica em 2022.....	29
Figura 3 – Matriz de Correlação dos Indicadores Seleccionados (2022).....	39
Figura 4 – Círculo de Correlações Canônicas — $FC1 \times FC2$	43
Figura 5 – Círculo de Correlações Canônicas — $FC1 \times FC3$	45
Figura 6 – Dispersão dos scores das variáveis canônicas $U1$ e $V1$	49
Figura 7 – Dispersão dos scores das variáveis canônicas $U2$ e $V2$	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Síntese de Estudos Empíricos	25
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Indicadores selecionados para municípios brasileiros (2022)	33
Tabela 2 – Estatísticas Descritivas Vetorizadas	38
Tabela 3 – Testes de significância das correlações canônicas.....	41
Tabela 4 – Coeficientes Canônicos Padronizados	42
Tabela 5 – Cargas Canônicas.....	43
Tabela 6 – Variância Extraída, Correlação Canônica e Índices de Redundância.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC – Análise de Correlação Canônica

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BCB – Banco Central do Brasil

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESTBAN – Estatísticas Bancárias por Município

GD – Geração Distribuída

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

MDS – Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social, Família e Combate à Fome

MMGD – Micro e Minigeração Distribuída

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PPML – *Poisson Pseudo Maximum Likelihood*

RAIS – Relação Anual de Informações Sociais

SAC – Spatial Autoregressive Combined Model

SDM – Spatial Durbin Model

SEB – Sistema Elétrico Brasileiro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Referencial Teórico	18
2.2	Referencial Empírico.....	20
3	MERCADO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL	26
4	ARCABOUÇO METODOLÓGICO E BASE DE DADOS	31
4.1	Descrição da Base de Dados	31
4.2	Procedimento Metodológico	34
5	RESULTADOS.....	38
5.1	Estatísticas Descritivas	38
5.2	Análise das Correlações Canônicas.....	39
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A transição energética caracteriza-se pela reconfiguração dos sistemas elétricos, substituindo o modelo tradicional de geração centralizada, baseado predominantemente em combustíveis fósseis, por uma matriz mais descentralizada, inteligente e de baixo carbono (Sermarini *et al.*, 2024). Nesse contexto, a geração distribuída (GD) destaca-se como uma das principais tecnologias impulsionadoras dessa transformação, ao permitir que consumidores também atuem como produtores de energia, assumindo o papel de "prosumidores" (de Freitas, 2022). Além de diversificar a oferta de eletricidade, esse modelo contribui para aumentar a segurança e a resiliência dos sistemas elétricos, ao mesmo tempo em que favorece a expansão de uma matriz energética mais sustentável (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023). Sob a perspectiva econômica, essa transformação também modifica os padrões de investimento, consumo e adoção tecnológica, ampliando a importância de compreender os fatores que condicionam a difusão da GD entre os diferentes territórios.

No Brasil, a expansão MMGD foi impulsionada pela Resolução Normativa nº 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que instituiu o sistema de compensação de energia elétrica e ampliou as possibilidades de conexão de pequenos geradores à rede de distribuição (Sermarini *et al.*, 2024). A partir desse marco regulatório, observou-se um crescimento expressivo da capacidade instalada no país, impulsionado principalmente pela rápida difusão da geração solar fotovoltaica (NETTO, 2025). Contudo, esse processo ocorreu de forma heterogênea entre os municípios brasileiros, sendo fortemente influenciado por padrões de assentamento urbano e características locais que favorecem a concentração de sistemas em regiões específicas (de Freitas, 2022). Essa distribuição desigual sugere que a adoção da MMGD não depende exclusivamente do potencial energético disponível, mas também de características socioeconômicas, financeiras e institucionais que condicionam a capacidade de investimento e a difusão tecnológica nos diferentes territórios.

A motivação desta pesquisa fundamenta-se na hipótese de que a adoção de tecnologias intensivas em capital, como a geração solar fotovoltaica, não ocorre de forma homogênea entre os municípios brasileiros. A literatura sugere que a difusão dessas tecnologias é condicionada por fatores econômicos e sociais, como renda, disponibilidade de crédito, capital humano e condições do mercado local, que influenciam tanto a capacidade de investimento quanto a velocidade de incorporação de novas tecnologias. Além disso, o elevado investimento inicial

necessário para implantação dos sistemas fotovoltaicos faz com que sua adoção dependa das condições socioeconômicas locais, sendo potencialmente limitada em municípios caracterizados por menores níveis de renda, escolaridade e acesso ao crédito (Salgueiro *et al.*, 2026). Apesar do avanço recente da literatura sobre GD, ainda são escassos os estudos que analisam, de forma integrada, as associações entre os indicadores de MMGD e as múltiplas dimensões do desenvolvimento socioeconômico em nível municipal. Nesse contexto, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão: *quais associações multivariadas existem entre os indicadores de micro e minigeração distribuída e os indicadores socioeconômicos dos municípios brasileiros?*

Com o intuito de responder a essa questão, esta monografia tem como objetivo investigar a associação multivariada entre indicadores de MMGD e indicadores socioeconômicos dos municípios brasileiros por meio da Análise de Correlação Canônica (ACC). Para tanto, são considerados dois conjuntos de variáveis: o primeiro reúne indicadores representativos da estrutura da MMGD, contemplando medidas de intensidade, difusão e perfil tecnológico da GD; o segundo compreende indicadores relacionados ao desenvolvimento socioeconômico municipal, abrangendo dimensões de atividade econômica, profundidade financeira, capital humano, infraestrutura urbana, estrutura produtiva e vulnerabilidade social. A utilização da ACC permite examinar simultaneamente as associações entre esses dois conjuntos de indicadores, possibilitando identificar padrões multivariados que dificilmente seriam captados por técnicas univariadas ou por modelos de regressão convencionais.

A principal contribuição desta pesquisa consiste em aplicar a ACC para investigar, de forma integrada, as associações entre indicadores de MMGD e indicadores socioeconômicos dos municípios brasileiros. Enquanto a maior parte dos estudos sobre difusão da GD concentra-se na estimação de modelos de regressão que analisam relações específicas entre variáveis, a ACC permite examinar simultaneamente dois conjuntos multidimensionais de indicadores, identificando combinações lineares que maximizam a associação entre eles (Chueca *et al.*, 2023). Dessa forma, o estudo amplia a compreensão dos padrões de associação entre a estrutura da MMGD e dimensões relacionadas à atividade econômica, profundidade financeira, capital humano, infraestrutura urbana, estrutura produtiva e vulnerabilidade social, oferecendo evidências empíricas que podem subsidiar a formulação de políticas públicas voltadas à expansão da GD e à redução das desigualdades territoriais na transição energética.

Além desta introdução, a monografia está estruturada em quatro seções. A segunda apresenta a revisão da literatura, abordando os principais fundamentos teóricos e as evidências empíricas relacionadas à difusão de inovações e à micro e minigeração distribuída. A terceira descreve a base de dados utilizada, as variáveis selecionadas e os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. A quarta apresenta e discute os resultados obtidos por meio da ACC. Por fim, a quinta seção reúne as considerações finais, destacando as principais conclusões do estudo, suas limitações e possibilidades para pesquisas futuras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, apresenta-se a revisão da literatura que fundamenta a presente pesquisa. Inicialmente, são discutidos os principais referenciais teóricos relacionados à MMGD e aos fatores econômicos que influenciam a difusão de tecnologias de GD. Em seguida, são sintetizadas as evidências empíricas nacionais e internacionais acerca dos determinantes socioeconômicos, financeiros e espaciais da adoção da geração distribuída fotovoltaica. Essa revisão permite situar o problema de pesquisa no contexto da literatura especializada, além de fornecer o embasamento conceitual necessário para a definição das variáveis e da estratégia empírica adotada neste estudo.

2.1 Referencial Teórico

O acesso à energia elétrica constitui um elemento fundamental para o desenvolvimento econômico e social, uma vez que condiciona a expansão da atividade produtiva, a oferta de serviços públicos essenciais e a melhoria das condições de vida da população (Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019). Historicamente, a geração e a distribuição de eletricidade foram estruturadas sob um modelo centralizado, caracterizado por elevados custos de implantação, economias de escala e longo período de maturação dos investimentos, fatores que justificaram a predominância do Estado e de grandes concessionárias na expansão da infraestrutura elétrica (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023).

A difusão da GD, por sua vez, reconfigura a organização tradicional do setor elétrico ao permitir que consumidores residenciais, empresas e demais unidades consumidoras também atuem como produtores de energia elétrica, promovendo uma estrutura mais descentralizada de geração (Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019). Nesse contexto, a expansão a MMGD deixa de depender exclusivamente de fatores tecnológicos e regulatórios, passando a ser influenciada também pelas decisões econômicas dos agentes responsáveis pelo investimento. Aspectos como disponibilidade de crédito, nível de renda, expectativa de retorno financeiro e capacidade de absorção tecnológica passam a desempenhar papel relevante na adoção desses sistemas, contribuindo para explicar as diferenças observadas entre os municípios brasileiros (Salgueiro *et al.*, 2026).

Sob a perspectiva da teoria microeconômica, a decisão de investir em uma nova tecnologia resulta da comparação entre os custos incorridos no presente e os benefícios

econômicos esperados ao longo do tempo. No caso da MMGD, consumidores e firmas tendem a adotar sistemas de geração própria quando o retorno esperado do investimento supera seus custos de implantação e operação, considerando ainda aspectos como disponibilidade de recursos financeiros, horizonte de retorno e incertezas associadas ao investimento (Cosme; Vieira, 2004). Dessa forma, a adoção da GD pode ser compreendida como uma decisão econômica de investimento, condicionada tanto às características da tecnologia quanto às condições financeiras e socioeconômicas dos agentes responsáveis por sua implementação (Hall; Khan, 2003).

O elevado custo de investimento inicial e à forte dependência de mecanismos de financiamento necessário para a adoção da tecnologia fotovoltaica constituem as principais barreiras econômicas à disseminação da tecnologia fotovoltaica, o que torna sua adoção sensível ao perfil econômico da região (Garlet *et al.*, 2019). Nesse sentido, a viabilidade financeira e o acesso ao capital são apontados como fatores determinantes para medir a velocidade de expansão desse mercado no Brasil (do Nascimento *et al.*, 2020).

A adoção de tecnologias de GD também pode ser analisada sob a perspectiva das falhas de mercado, especialmente da assimetria de informação e das imperfeições existentes nos mercados de crédito. Mesmo quando os investimentos apresentam viabilidade econômica no longo prazo, a limitação de informações, as dificuldades de financiamento e a incerteza quanto aos retornos esperados podem retardar ou impedir sua difusão entre os agentes econômicos (Hall; Khan, 2003).

Sob essa perspectiva Rogers (1995) argumenta que o processo de difusão de inovações depende da capacidade dos indivíduos de acessar, compreender e avaliar informações relativas aos benefícios, riscos e características das novas tecnologias. No caso da MMGD, a complexidade técnica dos sistemas, a incerteza em relação ao retorno do investimento e a dificuldade de comparação entre diferentes alternativas podem elevar os custos de obtenção e processamento da informação, reduzindo a probabilidade de adoção por consumidores com menor acesso à informação e menor nível de escolaridade (Salgueiro *et al.*, 2026). Esse argumento fornece suporte teórico para a inclusão de indicadores de capital humano entre os fatores potencialmente associados à difusão da MMGD em nível municipal.

As evidências disponíveis para o contexto brasileiro sugerem que a adoção da MMGD tem se concentrado em consumidores com maior nível de renda, escolaridade e capacidade de investimento, especialmente nos segmentos residencial e comercial com maior consumo de energia elétrica (Salgueiro *et al.*, 2026). A difusão dessas tecnologias está condicionada a um conjunto de requisitos econômicos e estruturais, como capacidade de investimento, disponibilidade de financiamento e características do imóvel, destacando-se a posse de telhado próprio como condição frequentemente necessária para a instalação de sistemas fotovoltaicos (EPE, 2025). Esses fatores tendem a restringir a adoção da MMGD entre consumidores em situação de maior vulnerabilidade socioeconômica ou residentes em imóveis alugados, contribuindo para a concentração espacial e social da geração distribuída no Brasil.

Segundo (Sermarini *et al.*, 2024), a concentração dos investimentos em tecnologias de GD entre consumidores com maior capacidade econômica pode resultar em uma distribuição desigual dos benefícios associados à transição energética. Enquanto esses consumidores internalizam ganhos decorrentes da redução dos gastos com eletricidade, parte dos custos de expansão, operação e manutenção da infraestrutura da rede elétrica continua sendo compartilhada entre os usuários do sistema. Nesse contexto, a persistência de barreiras econômicas, financeiras e informacionais à adoção da MMGD tende a restringir o acesso de grupos socialmente mais vulneráveis à tecnologia, limitando a difusão de seus benefícios econômicos e ambientais e contribuindo para a manutenção das desigualdades socioeconômicas existentes.

2.2 Referencial Empírico

A literatura internacional evidencia que os fatores associados à adoção da GD variam de acordo com as características econômicas, sociais e institucionais de cada país (Chueca *et al.*, 2023). Ao analisarem os primeiros adotantes de sistemas fotovoltaicos residenciais no Brasil, Chile e México, os autores verificaram que, no contexto brasileiro, a adoção inicial foi influenciada principalmente pelo potencial de geração solar e pela localização em áreas urbanas. No Chile, os fatores socioeconômicos dos domicílios apresentaram maior importância, enquanto, no México, os chamados efeitos de demonstração, decorrentes da observação de sistemas fotovoltaicos já instalados na vizinhança, exerceram maior influência sobre a probabilidade de adoção da tecnologia. Esses resultados sugerem que a difusão da MMGD

depende de um conjunto de condicionantes econômicos, sociais e territoriais, reforçando a necessidade de análises que considerem simultaneamente múltiplas dimensões explicativas.

As evidências empíricas também indicam que fatores econômicos desempenham papel central na difusão da geração distribuída fotovoltaica (do Nascimento *et al.*, 2020). Ao investigarem os principais determinantes da adoção dessa tecnologia sob a perspectiva das distribuidoras de energia elétrica, os autores identificaram que o custo da eletricidade, o custo de implantação dos sistemas fotovoltaicos e o potencial de geração de energia constituem os fatores mais relevantes para explicar sua expansão. Esses resultados reforçam que a decisão de investir em sistemas de GD depende da relação entre custos, benefícios econômicos esperados e condições locais de geração, corroborando a hipótese de que fatores econômicos exercem influência significativa sobre a difusão da MMGD.

Além dos fatores econômicos e tecnológicos, a literatura aponta que a estrutura espacial das cidades e os padrões de ocupação urbana também influenciam a difusão da geração distribuída fotovoltaica (de Freitas, 2022). Evidências para o Brasil indicam que a adoção residencial de sistemas fotovoltaicos varia de acordo com o grau de urbanização, sendo mais intensa em áreas periféricas e municípios situados no entorno de grandes centros urbanos. Esses resultados sugerem que a configuração espacial do território afeta os incentivos econômicos e as condições necessárias para a adoção da tecnologia, reforçando a importância de considerar fatores territoriais na análise da difusão da MMGD.

A literatura também evidencia que os incentivos econômicos exercem influência significativa sobre a adoção da MMGD (de Freitas, 2026). Evidências para os municípios brasileiros indicam que aumentos nas tarifas de energia elétrica elevam a probabilidade de instalação de sistemas fotovoltaicos residenciais, sugerindo que consumidores respondem aos sinais de preço ao buscar alternativas capazes de reduzir seus gastos futuros com eletricidade. Os resultados mostram que um acréscimo de um centavo de real por kWh na tarifa final está associado a um crescimento entre 6% e 8% no número de novas instalações fotovoltaicas residenciais. Esses achados reforçam que a decisão de investir em GD está diretamente relacionada aos incentivos econômicos percebidos pelos consumidores, embora a capacidade de responder a esses incentivos dependa das condições financeiras e socioeconômicas de cada localidade.

A expansão da MMGD também produz efeitos econômicos relevantes sobre o funcionamento do setor elétrico, ampliando o debate para além dos determinantes individuais da adoção da tecnologia (Martins; Branco; Hallack, 2022). Evidências para o Brasil indicam que o crescimento da MMGD, sob o atual sistema de compensação de energia, pode aumentar os custos suportados pelos consumidores que não possuem sistemas fotovoltaicos, em decorrência da existência de subsídios cruzados e da redistribuição dos custos de utilização da rede elétrica. Os autores argumentam que o aperfeiçoamento dos mecanismos de remuneração pelo uso da infraestrutura de distribuição é fundamental para assegurar a sustentabilidade econômica do setor diante da contínua expansão da GD. Esses resultados evidenciam que a difusão da MMGD possui implicações que ultrapassam a decisão individual de investimento, produzindo efeitos sobre a eficiência econômica e o desenho regulatório do mercado de energia elétrica.

Evidências recentes também apontam que a expansão da MMGD produz impactos econômicos relevantes sobre o setor elétrico brasileiro no longo prazo (NETTO, 2025). As projeções indicam que o crescimento contínuo da GD pode reduzir significativamente as receitas das distribuidoras de energia elétrica e ampliar os custos associados ao atual modelo de compensação, produzindo efeitos tarifários expressivos para os consumidores conectados à rede. Esses resultados reforçam que a expansão da MMGD envolve desafios econômicos e regulatórios que extrapolam a decisão individual de investimento, evidenciando a necessidade de aperfeiçoamentos no desenho regulatório para assegurar a sustentabilidade financeira do SEB.

Apesar da atratividade econômica associada à MMGD, sua difusão ainda enfrenta importantes restrições de natureza econômica, financeira, institucional e informacional (Garlet *et al.*, 2019). Evidências para a Região Sul do Brasil indicam que o elevado investimento inicial, a dependência de financiamento, o limitado conhecimento sobre a tecnologia e a insuficiência de políticas de incentivo figuram entre as principais barreiras à expansão da geração distribuída fotovoltaica. Esses resultados sugerem que a adoção da MMGD depende não apenas da viabilidade econômica do investimento, mas também das condições socioeconômicas e institucionais que possibilitam o acesso à tecnologia, contribuindo para explicar as diferenças observadas em sua difusão entre os municípios brasileiros.

Evidências recentes para Minas Gerais reforçam que a difusão da geração distribuída fotovoltaica está fortemente associada às características socioeconômicas e territoriais dos municípios (Salgueiro *et al.*, 2026). Os resultados indicam que maiores níveis de renda, escolaridade e urbanização estão associados a uma maior adoção de sistemas fotovoltaicos residenciais, evidenciando que a capacidade econômica e o capital humano exercem papel central no processo de difusão tecnológica. O estudo também identifica a existência de um *gap* de eficiência em municípios com elevado potencial de geração solar, mas baixa adoção da tecnologia em decorrência de limitações socioeconômicas. Essas evidências sugerem que a disponibilidade do recurso natural, embora necessária, não é suficiente para explicar a expansão da MMGD, reforçando a importância de fatores econômicos e sociais na compreensão da heterogeneidade observada entre os municípios.

Evidências internacionais corroboram a importância dos fatores econômicos e territoriais na difusão da geração distribuída fotovoltaica (Pronti; Zoboli, 2024). Para o caso italiano, os resultados indicam que maiores níveis de renda, consumo de eletricidade e dinamismo do mercado imobiliário estão associados a uma maior adoção de sistemas fotovoltaicos. Além disso, o estudo evidencia a existência de dependência espacial, indicando que a expansão da tecnologia em determinada localidade tende a influenciar sua difusão em áreas vizinhas. Esses resultados reforçam que a adoção da MMGD resulta da interação entre condições econômicas locais e efeitos territoriais, padrão semelhante ao observado em estudos realizados para o contexto brasileiro.

Além da identificação dos fatores associados à adoção da MMGD, a literatura recente também passou a investigar políticas capazes de ampliar o acesso à tecnologia entre grupos socialmente mais vulneráveis (Sermarini *et al.*, 2024). As evidências indicam que sistemas fotovoltaicos instalados diretamente nas unidades consumidoras podem proporcionar benefícios econômicos superiores aos observados em modelos centralizados de geração, especialmente para famílias de baixa renda. Os autores argumentam que políticas públicas de financiamento, subsídios e inclusão energética possuem potencial para ampliar o acesso à MMGD, reduzir desigualdades socioeconômicas e promover uma transição energética mais inclusiva. Esses resultados reforçam que a expansão da GD depende não apenas de incentivos econômicos, mas também da implementação de instrumentos capazes de reduzir as barreiras financeiras e sociais que limitam a adoção da tecnologia.

Em conjunto, as evidências empíricas revisadas indicam que a difusão da MMGD está associada a um conjunto de fatores econômicos, financeiros, socioeconômicos, territoriais e institucionais. Variáveis como renda, acesso ao crédito, escolaridade, urbanização, consumo de energia elétrica e características do mercado local aparecem de forma recorrente como fatores associados à adoção da tecnologia, enquanto restrições financeiras, assimetrias de informação e desigualdades socioeconômicas tendem a limitar sua expansão.

Embora a literatura tenha avançado significativamente na identificação desses condicionantes, predominam estudos que analisam relações específicas entre variáveis por meio de modelos econométricos tradicionais. Permanecem relativamente escassas as pesquisas que investigam, de forma integrada, a estrutura de associação entre múltiplas dimensões da MMGD e do desenvolvimento socioeconômico municipal.

Nesse contexto, a presente pesquisa busca contribuir para essa literatura ao empregar a ACC, técnica que permite examinar simultaneamente as associações entre dois conjuntos multidimensionais de indicadores, oferecendo uma perspectiva complementar às abordagens tradicionalmente utilizadas na literatura.

Quadro 1 – Síntese de Estudos Empíricos

Referência	Nível Geográfico	Método	Período de Análise	Objeto da Pesquisa
(Chueca <i>et al.</i> , 2023)	Internacional (Brasil, Chile e México)	Regressão linear multinível (hierárquica)	2012 a 2022	Perfil dos primeiros adotantes e efeito demonstração
(do Nascimento <i>et al.</i> , 2020)	Nacional (Brasil)	Revisão sistemática e entrevistas estruturadas com 20 especialistas.	2012 a 2019	Identificação e avaliação dos fatores que influenciam a adoção de sistemas fotovoltaicos distribuídos sob a perspectiva das distribuidoras de energia
(de Freitas, 2022)	Nacional (Brasil - setores censitários)	Modelos econométricos de contagem PPML	2012 a 2019	Influência dos padrões de urbanização, renda, escolaridade e potencial solar sobre a adoção residencial de sistemas fotovoltaicos
(de Freitas, 2026)	Nacional (Municípios brasileiros)	Dados em painel municipal e modelos PPML com efeitos fixos	2012 a 2021	Impacto dos sinais de preço na adoção de sistemas de telhado
(Martins; Branco; Hallack, 2022)	Nacional (Brasil)	Modelo financeiro-regulatório e análise de cenários	2020 a projeções até 2030	Impactos econômicos da MMDG na sustentabilidade das distribuidoras e subsídios cruzados
(NETTO, 2025)	Nacional (Brasil)	Modelo de Bass	2018 a 2030	Modelagem da difusão da GDFV e impactos financeiros em concessionárias e tarifas dos consumidores
(Garlet <i>et al.</i> , 2019)	Regional (Sul do Brasil)	Pesquisa qualitativa com entrevistas semiestruturadas e revisão bibliográfica	2008 a 2021	Identificar as principais barreiras técnicas, econômicas, sociais, gerenciais e políticas que limitam a difusão da geração distribuída fotovoltaica.
(Salgueiro <i>et al.</i> , 2026)	Estadual (Minas Gerais)	Econometria Espacial (SDM)	<i>Cross-sectional</i> (acumulado até setembro de 2023)	Determinantes socioeconômicos e os efeitos espaciais da difusão da geração fotovoltaica distribuída residencial
(Pronti; Zoboli, 2024)	Provincial (Itália)	Modelos SAC e Testes de Moran	2014 a 2021	Determinantes econômicos, energéticos e espaciais da adoção de sistemas fotovoltaicos na Itália
(Sermarini <i>et al.</i> , 2024)	Nacional (Municípios brasileiros)	Análise de viabilidade econômico-financeira	2013 a 2020	Avaliar políticas de inclusão energética voltadas à população de baixa renda por meio da geração distribuída fotovoltaica

Fonte: Elaboração própria da autora.

3 MERCADO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

A energia elétrica constitui um insumo estratégico para o funcionamento das economias modernas, na medida em que as atividades produtivas, sociais e econômicas dependem de seu fornecimento contínuo, seguro e confiável. Além de sustentar o processo produtivo e o bem-estar da população, o acesso à eletricidade é amplamente reconhecido como um importante indicador do nível de desenvolvimento socioeconômico das regiões (Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019). Nesse contexto, as transformações observadas no setor elétrico brasileiro, especialmente a expansão da MMGD, têm alterado a forma como a energia é produzida e consumida, conferindo maior protagonismo aos consumidores e ampliando a participação das fontes renováveis na matriz elétrica nacional.

A trajetória do SEB pode ser dividida em três fases: a de interesse local e privado, a de federalização e estatização e a atual fase mista ou concorrencial. Em sua fase inicial, a oferta de energia elétrica era predominantemente conduzida pela iniciativa privada e direcionada ao atendimento de demandas urbanas, como iluminação pública e transporte coletivo (Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019). A partir das décadas de 1940 e 1950, o Estado passou a desempenhar papel central na expansão da infraestrutura elétrica, considerando o setor energético estratégico para o processo de industrialização do país (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023). Nesse contexto, priorizou-se a implantação de grandes usinas hidrelétricas e a expansão das redes de transmissão, consolidando um modelo centralizado de geração e distribuição de energia, no qual a eletricidade passou a ser tratada como um serviço público essencial (Campigotto Soethe; Alberto Blanchet, 2019).

A partir da década de 1980, o setor elétrico brasileiro passou a enfrentar sucessivas dificuldades econômicas e institucionais, agravadas pelo ambiente de elevada inflação observado no período (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023). Em resposta a esse cenário, foi conduzido um processo de reestruturação do SEB, baseado na separação das atividades de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, bem como na criação de novas instituições responsáveis pela regulação, operação e comercialização do setor. Nesse contexto, foram instituídas a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 1996, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 1998, e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), em 2004 (Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019).

A GD no Brasil possui antecedentes associados à figura do autoprodutor de energia elétrica, cuja regulamentação remonta ao Decreto nº 41.019/1957. Esse normativo permitia a produção de energia para consumo próprio em situações específicas, como vilas operárias e instalações industriais (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023). Entretanto, a expansão da GD em sua configuração contemporânea ocorreu apenas após a crise energética de 2001 e as reformas institucionais promovidas pela Lei nº 10.483/2002 e pela Lei nº 10.848/2004, que fortaleceram o arcabouço regulatório do setor elétrico e criaram condições para o desenvolvimento desse segmento no país (Campigotto Soethe; Alberto Blanchet, 2019).

Nesse contexto de transformação do SEB, Resolução Normativa nº 482/2012 representou um marco para a expansão da MMGD ao instituir o sistema de compensação de energia elétrica, permitindo que consumidores passassem a injetar a energia excedente produzida em suas unidades consumidoras na rede de distribuição e recebessem créditos para compensação do consumo futuro (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023). Posteriormente, a Lei nº 14.300/2022, conhecida como Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída, consolidou em âmbito legal as principais diretrizes regulatórias da modalidade, conferindo maior segurança jurídica aos investimentos e estabelecendo regras para a transição do sistema de compensação de energia (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023).

A expansão da GD no Brasil ocorreu de forma estreitamente associada ao avanço da tecnologia solar fotovoltaica. Segundo Benedito (2009), a primeira experiência relevante de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica ocorreu em 1995, com a instalação de um sistema de 11 kW_p pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), em Recife. Em 2009, o país contava com apenas 35 sistemas fotovoltaicos conectados à rede, totalizando 161 kW_p de capacidade instalada, concentrados predominantemente em universidades. A partir da década seguinte, entretanto, observou-se um crescimento acelerado da tecnologia, impulsionado pelos avanços regulatórios e pela redução dos custos de implantação. De acordo com PEREIRA (2019), a fonte solar respondia por aproximadamente 81,46% da potência instalada da GD em 2018. Posteriormente, até junho de 2022, a capacidade instalada alcançou 15.852 MW, com mais de um milhão de sistemas conectados à rede, evidenciando a rápida expansão da MMGD no país (Felice Falivene Baptista; Pereira da Silva; Celeste Fonseca, 2023).

A expansão da GD tem promovido transformações significativas nos mercados de energia elétrica, tanto no Brasil quanto em outros países, ao modificar a relação tradicional entre geradores, consumidores e distribuidoras de energia (Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019). Esse processo também tem sido observado em economias como China, Estados Unidos, Japão e Alemanha, que vêm ampliando a participação das fontes renováveis em suas matrizes elétricas por meio de políticas de incentivo ao investimento e de mecanismos regulatórios voltados à difusão dessas tecnologias (Xavier Pereira, 2019).

(Bizawu; Gibran; Vieira De Souza Barbosa, 2019) destacam que a expansão da GD impõe desafios ao modelo tradicional de negócios das distribuidoras de energia elétrica, uma vez que a geração própria pelos consumidores reduz o volume de energia faturada, enquanto os custos associados à operação e à manutenção da infraestrutura de distribuição permanecem elevados. Os autores também ressaltam que o sistema elétrico brasileiro foi originalmente concebido para um fluxo unidirecional de energia, de grandes usinas para os consumidores finais. Nesse contexto, a crescente injeção de energia excedente na rede pode aumentar a complexidade da operação do sistema, exigindo adaptações para lidar com variações de tensão, fluxos reversos de potência e menor previsibilidade da geração.

A distribuição espacial da potência instalada *per capita* de MMGD entre os estados brasileiros é apresentada na Figura 1. Observa-se que a expansão da MMGD alcançou todas as regiões do país, embora com intensidades bastante distintas entre as unidades da federação. Minas Gerais destaca-se por apresentar a maior potência instalada *per capita*, enquanto estados como Goiás, Bahia e Paraná também registram níveis relativamente elevados desse indicador. Em contrapartida, grande parte dos estados apresenta valores substancialmente inferiores, evidenciando que a difusão da GD ocorreu de forma heterogênea no território nacional. Essa configuração espacial sugere que fatores econômicos, sociais e institucionais podem ter influenciado a velocidade e a intensidade de adoção da tecnologia entre os estados brasileiros.

Figura 1 – Potência Total Instalada em 2022



Fonte: Elaboração própria da autora.

A predominância da fonte solar fotovoltaica na composição da MMGD brasileira pode ser observada na Figura 2, que apresenta a distribuição espacial da potência instalada *per capita* proveniente de centrais geradoras solares fotovoltaicas. Verifica-se que a distribuição espacial dessa fonte reproduz, em grande medida, o padrão observado para a potência instalada *per capita* da MMGD apresentado na Figura 1, confirmando a predominância da geração fotovoltaica na expansão da GD no país. Esse resultado é consistente com os avanços tecnológicos registrados nas últimas décadas, a redução dos custos de implantação dos sistemas fotovoltaicos e os incentivos regulatórios implementados no SEB, fatores que favoreceram a rápida difusão dessa tecnologia (Salgueiro *et al.*, 2026).

Figura 2 – Central Geradora Solar Fotovoltaica em 2022



Fonte: Elaboração própria da autora.

As Figuras 1 e 2 evidenciam que a geração solar fotovoltaica constitui o principal vetor da expansão da MMGD no Brasil, uma vez que ambas apresentam padrões espaciais bastante semelhantes. Esse resultado reforça a predominância da tecnologia fotovoltaica na composição da MMGD brasileira, tecnologia que concentrou mais de 99% da potência instalada no mercado de GD no ano de 2024, continuando o comportamento identificado em 2022 (NETTO, 2025). Embora a adoção da GD em outros países da América Latina possa ser impulsionada por políticas de inclusão energética ou pela escala dos projetos, no Brasil a renda *per capita* e o nível educacional figuram entre os principais determinantes da expansão da geração solar fotovoltaica (Chueca *et al.*, 2023).

Essa influência dos indicadores econômicos e educacionais contribui para a formação do denominado *gap* de eficiência, conceito que se refere a regiões com elevado potencial de geração solar, mas com baixa adoção da tecnologia fotovoltaica em razão de restrições financeiras e limitações no acesso e processamento de informações pelos potenciais consumidores (Salgueiro *et al.*, 2026). Assim, a disponibilidade do recurso solar, por si só, não garante a difusão da MMGD, uma vez que sua expansão também depende das condições socioeconômicas da população.

Com o objetivo de ampliar o acesso à GD e promover maior justiça energética, o governo brasileiro tem implementado instrumentos voltados à inclusão de grupos tradicionalmente excluídos desse mercado. Entre essas iniciativas é possível destacar o Programa de Energia Renovável Social (PERS), focado no investimento em sistemas para unidades consumidoras de baixa renda instituído pelo Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída, destinado ao financiamento de sistemas fotovoltaicos para consumidores de baixa renda (Sermarini *et al.*, 2024). Em conjunto, essas iniciativas buscam ampliar o acesso à MMGD, permitindo que a economia proporcionada pela autoprodução de energia aumente a renda disponível das famílias e contribua para a redução das desigualdades socioeconômicas.

4 ARCABOUÇO METODOLÓGICO E BASE DE DADOS

4.1 Descrição da Base de Dados

A base de dados utilizada nesta pesquisa possui abrangência municipal e contempla informações referentes aos municípios brasileiros para o ano de 2022. Inicialmente, foram consideradas as 5.570 unidades municipais existentes no país. Entretanto, para fins de aplicação da ACC, a amostra foi restrita aos municípios que registravam potência instalada positiva de MMGD, uma vez que a inexistência de empreendimentos ou de capacidade instalada inviabiliza a análise das relações entre a difusão dessa tecnologia e as características socioeconômicas locais. Após esse procedimento de filtragem, a amostra final passou a ser composta por 2.169 municípios.

A base analítica foi construída a partir da integração de informações provenientes de diferentes bases administrativas e estatísticas oficiais. Os dados foram obtidos junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023), por meio do Painel de MMGD; ao IBGE, com informações do Produto Interno Bruto dos Municípios do o Sistema de Contas Regionais (IBGE, 2023) e do Censo Demográfico (IBGE, 2022); ao Banco Central do Brasil (BCB, 2023), por intermédio das Estatísticas Bancárias por Município (ESTBAN); ao Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome (MDS, 2023), para os dados do Programa Bolsa Família; e à RAIS (Ministério do Trabalho e Emprego, 2023), utilizada na construção de indicadores associados à estrutura produtiva e ao mercado local.

A estratégia empírica fundamenta-se na aplicação da ACC, técnica estatística multivariada que permite investigar simultaneamente o grau de associação entre dois conjuntos de variáveis. Diferentemente das análises de regressão tradicionais, a ACC busca identificar combinações lineares de cada grupo de variáveis que maximizam a correlação entre si, possibilitando avaliar de forma integrada como características da expansão da MMGD se relacionam com atributos socioeconômicos dos municípios brasileiros.

Para esse propósito, as variáveis foram organizadas em dois blocos conceitualmente distintos. O primeiro reúne indicadores relacionados à estrutura da MMGD (Grupo X), enquanto o segundo contempla indicadores representativos das condições socioeconômicas e da dinâmica econômica local (Grupo Y). A seleção das variáveis foi orientada pela literatura sobre transição energética, desenvolvimento regional e difusão tecnológica, buscando captar

diferentes mecanismos pelos quais a expansão da GD pode estar associada ao desenvolvimento econômico e social.

O Grupo X (MMGD) é composto por cinco indicadores. O primeiro corresponde à potência total instalada de MMGD *per capita*, que representa a intensidade da adoção dessa tecnologia em relação ao contingente populacional do município. O segundo indicador corresponde ao número de empreendimentos de MMGD por mil habitantes, obtido pela razão entre o total de empreendimentos registrados no município e sua população residente, multiplicada por 1.000. Essa padronização busca tornar comparáveis municípios com diferentes escalas populacionais, captando a intensidade relativa da difusão da GD no território. O terceiro e o quarto indicadores referem-se, respectivamente, à participação das unidades consumidoras das classes residencial e comercial na potência instalada total, permitindo caracterizar o perfil de utilização da GD. Por fim, considera-se a participação da fonte solar fotovoltaica no conjunto da potência instalada, variável que representa o grau de especialização municipal na principal tecnologia de geração distribuída atualmente difundida no país.

O Grupo Y (Indicadores Socioeconômicos Municipais) reúne sete variáveis destinadas a representar diferentes dimensões do desenvolvimento local. O Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* é utilizado como medida sintética do nível de atividade econômica e da capacidade produtiva municipal. O saldo das operações de crédito *per capita*, obtido a partir das Estatísticas Bancárias por Município do Banco Central, atua como proxy da profundidade financeira e da disponibilidade de recursos para investimento. O percentual da população com ensino superior completo representa o estoque local de capital humano, elemento frequentemente associado à capacidade de absorção e difusão de novas tecnologias.

A dimensão da infraestrutura urbana é representada pela cobertura de esgotamento sanitário, indicador relacionado às condições de qualidade de vida e ao estágio de desenvolvimento urbano. Adicionalmente, foram incorporadas duas proxies construídas a partir dos microdados da RAIS, inspiradas em (Pereira, 2002), (Pereira; Lemos, 2003), (Betarelli Junior; Simões, 2011) (Faria *et al.*, 2018). A primeira, denominada grau de industrialização (GINDUST), corresponde à razão entre o pessoal ocupado na indústria e a população ocupada urbana, captando a relevância relativa do setor industrial e os potenciais efeitos de economias de urbanização e de encadeamentos produtivos. A segunda, denominada mercado (MERCADO), é obtida pela razão entre a massa salarial urbana e a população ocupada urbana,

funcionando como uma aproximação do poder de compra local e da densidade econômica do mercado consumidor.

Por fim, incorpora-se a variável de beneficiários do Programa Bolsa Família *per capita*, que representa a intensidade das transferências de renda e atua como indicador indireto de vulnerabilidade socioeconômica. A inclusão desse conjunto de variáveis permite explorar, de maneira abrangente, as interações entre a difusão da MMGD e diferentes dimensões do desenvolvimento municipal, abrangendo aspectos econômicos, financeiros, produtivos, educacionais, urbanos e sociais.

A Tabela 1 apresenta a relação das variáveis utilizadas na análise, suas respectivas descrições e as fontes de obtenção dos dados.

Tabela 1. Indicadores selecionados para municípios brasileiros (2022)

Micro e Minigeração Distribuída (Grupo X)				
Variáveis		Sigla	Descrição	Fonte
Potência instalada <i>per capita</i>		POT	Potência total instalada de MMGD por habitante (kW/hab)	ANEEL
Empreendimentos por mil habitantes		EMP	Número de empreendimentos de MMGD dividido pela população municipal e multiplicado por 1.000	ANEEL/ Elaboração própria
Participação residencial		RESID	Participação da classe residencial na potência instalada (%)	ANEEL
Participação comercial		COM	Participação da classe comercial na potência instalada (%)	ANEEL
Participação solar fotovoltaica		UFV	Participação da fonte solar fotovoltaica na potência instalada (%)	ANEEL
Condições Socioeconômicas e da Dinâmica Econômica Local (Grupo Y)				
Variáveis		Sigla	Descrição	Fonte
PIB per capita		PIB	Produto Interno Bruto municipal <i>per capita</i> (R\$)	IBGE
Crédito per capita		CRÉDITO	Saldo das operações de crédito por habitante (R\$)	Banco Central do Brasil
Ensino superior		SUPERIOR	Percentual da população com ensino superior completo (%)	IBGE/Censo
Esgotamento sanitário		ESGOTO	Percentual da população atendida por rede de esgoto (%)	IBGE/Censo
Mercado local		MERCADO	Massa salarial urbana por trabalhador urbano	RAIS/Elaboração própria
Grau de industrialização		GINDUST	Razão entre emprego industrial e emprego urbano	RAIS/Elaboração própria
Bolsa Família <i>per capita</i>		PBF	Beneficiários do Programa Bolsa Família por habitante	MDS

Fonte: Elaboração própria da autora.

Além dos indicadores citados, foram desenvolvidas variáveis *proxies* com base nos dados de emprego da RAIS (2025), sob referência dos trabalhos de (Pereira, 2002), (Pereira; Lemos, 2003) (Pereira; Lemos, 2003), (Betarelli Junior; Simões, 2011) (Faria *et al.*, 2018). As variáveis *proxies* foram definidas conforme segue:

- a) *GINDUST*, que representa o grau de industrialização obtido pela razão entre o pessoal ocupado na indústria, conforme classificação dos 6 grandes setores do IBGE (*POind*) e o pessoal ocupado urbano (*Purb* = *PO total* – *PO agropecuária*), buscando captar efeitos de economia de urbanização e encadeamentos industriais:

$$gindust = \frac{PO\ Indust}{PO\ Urbana} = \frac{População\ Ocupada\ na\ Indústria}{População\ Ocupada\ Urbana} \quad (1)$$

- b) *MERCADO*, que representa a razão entre a massa salarial urbana (*SOurb* = *massa salarial total* – *massa salarial da agropecuária*) e a população urbana:

$$mercado = \frac{Massa\ Salarial\ Urbana}{População\ Ocupada\ Urbana} \quad (2)$$

Esta variável é considerada um fator de aglomeração urbana, indicando tanto o poder de compra local quanto o custo relativo da força de trabalho.

4.2 Procedimento Metodológico

A ACC foi empregada com o objetivo de investigar a associação linear entre dois conjuntos de variáveis observadas nos municípios brasileiros: um conjunto composto por indicadores da micro e minigeração distribuída (MMGD) e outro formado por indicadores socioeconômicos. A apresentação da fundamentação matemática da técnica segue C. Rencher; William F. (1996).

A ACC constitui uma extensão da análise de correlação múltipla e permite mensurar simultaneamente o grau de associação entre dois grupos de variáveis. Diferentemente das técnicas que analisam relações entre variáveis isoladas, esse método busca identificar combinações lineares de cada conjunto de variáveis, denominadas variáveis canônicas, de forma que a correlação entre essas combinações seja maximizada.

Formalmente, sejam $X = X_1, X_2, \dots, X_n)'$ e $Y = Y_1, Y_2, \dots, Y_n)'$ dois vetores de variáveis aleatórias, representando, respectivamente, os indicadores de micro e minigeração distribuída

e os indicadores socioeconômicos. A ACC busca determinar combinações lineares desses vetores, denominadas variáveis canônicas, de forma que a correlação entre elas seja máxima. Assim, as variáveis canônicas podem ser expressas por:

$$U = a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (3)$$

$$V = b_1Y_1 + b_2Y_2 + \dots + b_nY_n \quad (4)$$

Tal que correlação $Corr(U, V)$ seja maximizada.

Sendo X descrito por uma matriz $n \times p$ e Y por uma matriz $n \times q$.

$$C = cov(X, Y) \quad (5)$$

As matrizes de variância e de covariância do modelo serão dadas por:

$$C = \begin{bmatrix} \Sigma_{XX} & \Sigma_{XY} \\ \Sigma_{YX} & \Sigma_{YY} \end{bmatrix} \quad (6)$$

As covariâncias entre variáveis de diferentes conjuntos, isto é, variáveis do vetor X e do vetor Y , estão representadas pelas matrizes Σ_{XY} e Σ_{YX} . Quanto maior forem p e q , mais complexa se torna a análise das covariâncias entre as variáveis. Dessa forma, a análise de correlação canônica busca resumir a estrutura de associação entre dois conjuntos de variáveis por meio de pares sucessivos de variáveis canônicas, reduzindo a complexidade da interpretação das múltiplas correlações existentes entre os conjuntos

De forma resumida, as variáveis canônicas podem ser representadas por:

$$U = a'X, V = b'Y \quad (7)$$

As variâncias e a covariância de U e V serão definidas por:

$$Var(U) = a' Cov(X) a = a' \Sigma_{xx} a \quad (8)$$

$$Var(V) = b' Cov(Y) b = b' \Sigma_{yy} b$$

$$Cov(U, V) = a' Cov(X, Y) B = a' \Sigma_{xy} b$$

A ACC tem por objetivo determinar os vetores a e b de forma que a correlação entre U e V seja máxima, onde ρ^* é a correlação canônica.

$$\rho_{U,V}^* = Corr(U, V) = \frac{a' \Sigma_{xy} b}{\sqrt{a' \Sigma_{xx} a} \sqrt{b' \Sigma_{yy} b}} \quad (9)$$

Onde o máximo,

$$\max_{a,b} Corr(U_i, V_i) = \rho_i \quad (10)$$

é obtido pelas combinações lineares (primeiro par de variáveis canônicas):

$$U_1 = e_1' \Sigma_{xx}^{-\frac{1}{2}} X \quad (11)$$

$$V_1 = f_1' \Sigma_{yy}^{-\frac{1}{2}} Y$$

Existirão até $\min(q, p)$ pares de variáveis canônicas mutuamente ortogonais, ordenados de acordo com a magnitude de suas correlações canônicas. Dessa forma, temos k pares de canônicas, $k = 1, 2, \dots, p$,

$$U_k = e_k' \Sigma_{xx}^{-\frac{1}{2}} X \quad (12)$$

$$V_k = f_k' \Sigma_{yy}^{-\frac{1}{2}} Y$$

que maximizam a equação:

$$Corr(U_k, V_k) = \rho_k \quad (13)$$

entre as combinações lineares não correlacionadas com as precedentes $k = 1, 2, \dots, k - 1$ variáveis canônicas.

As correlações canônicas são obtidas sucessivamente. O primeiro par representa a maior correlação linear possível entre os conjuntos de variáveis, enquanto os pares subsequentes explicam relações adicionais não capturadas pelos pares anteriores. Na aplicação empírica deste estudo, a interpretação concentrou-se apenas nas funções estatisticamente significativas, sendo analisadas as correlações canônicas, as cargas canônicas, as cargas canônicas cruzadas e os índices de redundância. Esses indicadores permitem identificar quais variáveis da MMGD apresentam maior associação com os indicadores socioeconômicos dos municípios brasileiros.

5 RESULTADOS

5.1 Estatísticas Descritivas

Para a maior compreensão das características dos dados utilizados nas análises, a Tabela 2 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis de MMGD e das variáveis socioeconômicas. Essas estatísticas permitem identificar o comportamento das variáveis analisadas antes da estimação do modelo multivariado.

Tabela 2 – Estatísticas Descritivas Vetorizadas

Variável	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
CREDITO	1709.37	3317.15	0.00	40238.59
ESGOTO	51.17	29.21	0.32	100.00
GINDUST	12.16	14.11	0.00	79.14
MERCADO	2328.86	539.20	66.01	7211.32
PBF	15.53	7.50	1.32	46.42
PIB	12285.01	15234.94	2905.43	281530.47
POTENCIA_TOTAL_KW	0.10	0.15	0.00	2.17
PROP_FONTE_UFV	98.75	7.82	8.61	100.00
PROP_GD_COMERCIAL	28.19	19.39	0.00	100.00
PROP_GD_RESIDENCIAL	43.07	21.50	0.00	100.00
SUPERIOR	6.74	3.08	1.25	30.48
TOTAL_EMPREENDIMENTOS	7.67	9.78	0.02	276.90

Fonte: Elaboração própria da autora.

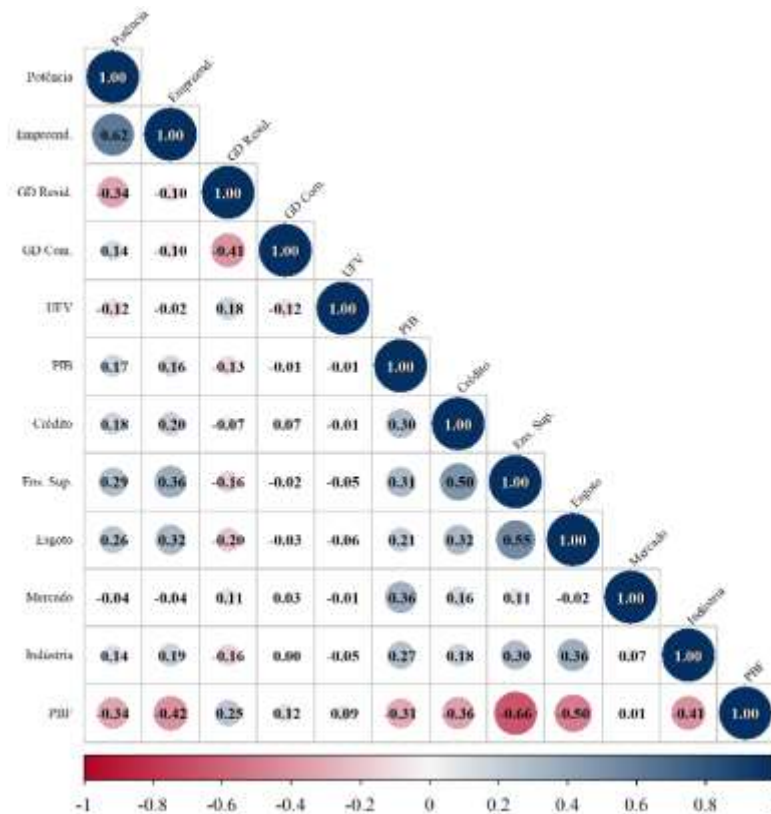
A partir das estatísticas descritivas é possível observar significativa dispersão em indicadores como potência instalada *per capita* e número de empreendimentos, evidenciada por elevados desvios-padrão e pela ampla diferença entre os valores mínimos e máximos. Entre as variáveis socioeconômicas, também se verifica significativa heterogeneidade, com foco em indicadores relacionados ao crédito, PIB *per capita* e grau de industrialização, refletindo as desigualdades estruturais existentes entre os municípios brasileiros.

É importante ressaltar que a fonte solar fotovoltaica representa uma média de 98,75% da potência instalada, reafirmando sua relevância na expansão da MMGD. Além disso, as participações médias das classes residencial e comercial também são relevantes, com destaque para a classe de consumo residencial como a principal da difusão da GD municipal. Essa variabilidade observada em ambos os conjuntos de variáveis reforça a adequação da utilização da ACC, uma vez que a difusão da MMGD constitui um fenômeno multidimensional associado simultaneamente a diferentes características socioeconômicas.

5.2 Análise das Correlações Canônicas

A análise dos resultados inicia-se pela investigação das associações lineares entre os indicadores de MMGD e os indicadores socioeconômicos selecionados para os municípios brasileiros em 2022. A Figura 3 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis utilizadas na ACC, permitindo uma avaliação exploratória da intensidade e do sentido das associações bivariadas entre os dois conjuntos de indicadores. Nessa representação gráfica, os círculos em azul indicam correlações positivas, enquanto os círculos em vermelho representam correlações negativas, sendo a intensidade das cores e o tamanho dos círculos proporcionais à magnitude dos coeficientes de correlação.

Figura 3 – Matriz de Correlação dos Indicadores Seleccionados (2022)



Fonte: Elaboração própria da autora.

De maneira geral, observa-se que os indicadores de intensidade da MMGD, representados pela potência instalada *per capita* e pelo número de empreendimentos por mil habitantes, apresentam associações positivas com os principais indicadores de desenvolvimento socioeconômico. Essas duas variáveis também exibem correlação positiva entre si (0,62), indicando que captam uma dimensão comum da difusão da geração distribuída nos municípios

brasileiros. Em particular, ambas apresentam correlações positivas com o PIB *per capita*, o crédito bancário, a proporção da população com ensino superior completo e a cobertura de esgotamento sanitário, ainda que de magnitudes moderadas. Em contrapartida, verificam-se correlações negativas com a participação de beneficiários do Programa Bolsa Família, sugerindo menor difusão da MMGD em municípios com maior vulnerabilidade socioeconômica.

No conjunto das variáveis socioeconômicas, observa-se ainda que PIB per capita, crédito, escolaridade e esgotamento sanitário apresentam correlações positivas entre si, enquanto o Programa Bolsa Família exibe correlações negativas relativamente elevadas com esses indicadores, especialmente com ensino superior (-0,66), cobertura de esgotamento sanitário (-0,50) e grau de industrialização (-0,41), evidenciando um padrão coerente com a literatura sobre desenvolvimento regional. Embora essas evidências possuam caráter exploratório e reflitam apenas associações bivariadas, elas indicam a existência de relações entre os dois conjuntos de variáveis, cuja estrutura conjunta será investigada, na sequência, por meio da Análise de Correlação Canônica.

Embora a matriz de correlação forneça evidências preliminares acerca das associações bivariadas entre os indicadores de MMGD e as variáveis socioeconômicas, ela não permite avaliar a estrutura conjunta de relacionamento entre os dois conjuntos de variáveis. Para esse propósito, foi estimada a ACC, cuja primeira etapa consiste em verificar se as funções canônicas obtidas são estatisticamente significativas. Assim, antes da interpretação das funções canônicas, foram realizados testes multivariados para avaliar a existência de associação entre os dois conjuntos de variáveis.

A Tabela 3 apresenta os testes multivariados de significância empregados para avaliar a existência de associação entre o conjunto de indicadores de MMGD e o conjunto de indicadores socioeconômicos. Foram utilizados o Lambda de Wilks, o Traço de Pillai, o Traço de Hotelling-Lawley e a Maior Raiz de Roy, cujas hipóteses nulas são avaliadas de forma sequencial, testando a significância conjunta das funções canônicas remanescentes.

Tabela 3 – Testes de significância das correlações canônicas

Indicador	Lambda de Wilks	P-Valor	Traço de Pillai	P-Valor	Traço de Hotelling	P-Valor	Maior Raiz de Roy	P-Valor
FC1 a FC5	0,666	<0,001	0,353	<0,001	0,473	<0,001	0,290	<0,001
FC2 a FC5	0,938	<0,001	0,063	<0,001	0,064	<0,001	–	–
FC3 a FC5	0,975	<0,001	0,025	<0,001	0,025	<0,001	–	–
FC4 a FC5	0,991	0,013	0,009	0,013	0,009	0,013	–	–
FC5	0,999	0,575	0,001	0,573	0,001	0,574	–	–

Fonte: Elaboração própria da autora.

Os resultados indicam que os testes baseados no Lambda de Wilks, no Traço de Pillai e no Traço de Hotelling-Lawley rejeitam a hipótese nula de ausência de correlação canônica até a quarta função, ao nível de significância de 5%. Para a quinta função canônica, entretanto, os p-valores foram superiores ao nível de significância adotado, não sendo possível rejeitar a hipótese nula de ausência de associação entre os dois conjuntos de variáveis. O teste da Maior Raiz de Roy apresentou significância apenas para a primeira função canônica ($p < 0,001$), indicando que a principal dimensão canônica concentra a maior parcela da associação linear entre os vetores analisados.

Em conjunto, esses resultados evidenciam a existência de associação estatisticamente significativa entre os indicadores de MMGD e os indicadores socioeconômicos dos municípios brasileiros. Entretanto, considerando a magnitude das correlações canônicas e a concentração da variância explicada na primeira dimensão, a interpretação dos resultados concentra-se principalmente na primeira função canônica, complementada pelas demais funções estatisticamente significativas.

Uma vez estabelecida a significância estatística das funções canônicas, os coeficientes canônicos padronizados apresentados na Tabela 4 evidenciam os pesos atribuídos a cada variável original na construção das combinações lineares que definem as variáveis canônicas dos vetores de MMGD e indicadores socioeconômicos.

Observando a primeira função canônica, verifica-se que os maiores coeficientes, em módulo, foram atribuídos às variáveis empreendimentos por mil habitantes (-0,617) e participação residencial (0,578) no vetor de MMGD, enquanto, no vetor socioeconômico, destacou-se o indicador de beneficiários do Programa Bolsa Família *per capita* (0,728). Esses

coeficientes refletem a contribuição matemática dessas variáveis para a formação das combinações lineares.

Tabela 4 – Coeficientes Canônicos Padronizados

Grupo 1 (Vetor X): Geração Distribuída (ANEEL)						
Variável	Descrição da Variável	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
Potência instalada <i>per capita</i>	Potência total instalada de MMGD por habitante (kW/hab)	-0,139	-0,054	0,252	-1,234	0,556
Empreendimentos por mil habitantes	Nº de empreendimentos de MMGD dividido pela população municipal multiplicado por 1.000	-0,617	-0,628	-0,422	0,727	-0,524
Participação residencial	Participação da classe residencial na potência instalada (%)	0,578	-0,640	-0,614	-0,468	0,070
Participação comercial	Participação da classe comercial na potência instalada (%)	0,406	-0,913	0,356	0,317	0,171
Participação solar fotovoltaica	Participação da fonte solar fotovoltaica na potência instalada (%)	0,068	-0,075	0,541	-0,340	-0,790
Grupo 2 (Vetor Y): Indicadores Socioeconômicos						
Variável	Descrição da Variável	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
PIB per capita	Produto Interno Bruto municipal <i>per capita</i> (R\$)	-0,187	-0,273	0,751	-0,617	0,089
Crédito <i>per capita</i>	Saldo das operações de crédito por habitante (R\$)	0,097	-0,651	0,307	-0,134	0,575
Ensino superior	Percentual da população com ensino superior completo (%)	-0,078	-0,715	-0,093	0,004	-1,182
Esgotamento sanitário	Percentual da população atendida por rede de esgoto (%)	-0,263	-0,020	0,148	0,154	0,227
Mercado local	Massa salarial urbana por trabalhador urbano	0,241	-0,261	-0,773	0,017	0,493
Grau de industrialização	Razão entre emprego industrial e emprego urbano	0,003	-0,079	0,295	0,945	0,194
Bolsa Família <i>per capita</i>	Beneficiários do Programa Bolsa Família por habitante	0,728	-0,622	0,737	0,257	-0,485

Fonte: Elaboração própria da autora.

Após a verificação dos coeficientes canônicos, a etapa seguinte consiste em identificar quais variáveis apresentam maior contribuição para cada dimensão estimada. Para esse propósito, analisam-se as cargas canônicas, que representam a correlação entre as variáveis originais e as respectivas variáveis canônicas, permitindo identificar os indicadores mais fortemente associados a cada função.

A Tabela 5 apresenta as cargas canônicas associadas às funções estimadas pela Análise de Correlação Canônica. Considerando a predominância da primeira função canônica (FC1), evidenciada pelos testes de significância e pela magnitude do coeficiente de correlação associado à primeira função canônica, a interpretação concentra-se principalmente nessa dimensão.

Tabela 5 – Cargas Canônicas

Grupo 1 (Vetor X): Geração Distribuída (ANEEL)						
Variável	Descrição da Variável	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
Potência instalada <i>per capita</i>	Potência total instalada de MMGD por habitante (kW/hab)	-0,671	-0,353	0,179	-0,534	0,328
Empreendimentos por mil habitantes	Nº de empreendimentos de MMGD dividido pela população municipal multiplicado por 1.000	-0,810	-0,499	-0,249	-0,020	-0,184
Participação residencial	Participação da classe residencial na potência instalada (%)	0,538	-0,198	-0,701	-0,321	-0,277
Participação comercial	Participação da classe comercial na potência instalada (%)	0,207	-0,587	0,622	0,297	0,372
Participação solar fotovoltaica	Participação da fonte solar fotovoltaica na potência instalada (%)	0,157	-0,062	0,363	-0,327	-0,856
Grupo 2 (Vetor Y): Indicadores Socioeconômicos						
Variável	Descrição da Variável	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
PIB per capita	Produto Interno Bruto municipal <i>per capita</i> (R\$)	-0,378	-0,067	0,420	-0,441	0,325
Crédito <i>per capita</i>	Saldo das operações de crédito por habitante (R\$)	-0,304	-0,764	0,197	-0,187	0,374
Ensino superior	Percentual da população com ensino superior completo (%)	-0,683	-0,611	-0,106	-0,048	-0,313
Esgotamento sanitário	Percentual da população atendida por rede de esgoto (%)	-0,681	-0,276	0,104	0,200	0,083
Mercado local	Massa salarial urbana por trabalhador urbano	0,190	-0,354	-0,444	-0,161	0,497
Grau de industrialização	Razão entre emprego industrial e emprego urbano	-0,433	-0,108	0,225	0,706	0,282
Bolsa Família <i>per capita</i>	Beneficiários do Programa Bolsa Família por habitante	0,935	0,036	0,255	0,028	-0,136

Fonte: Elaboração própria da autora.

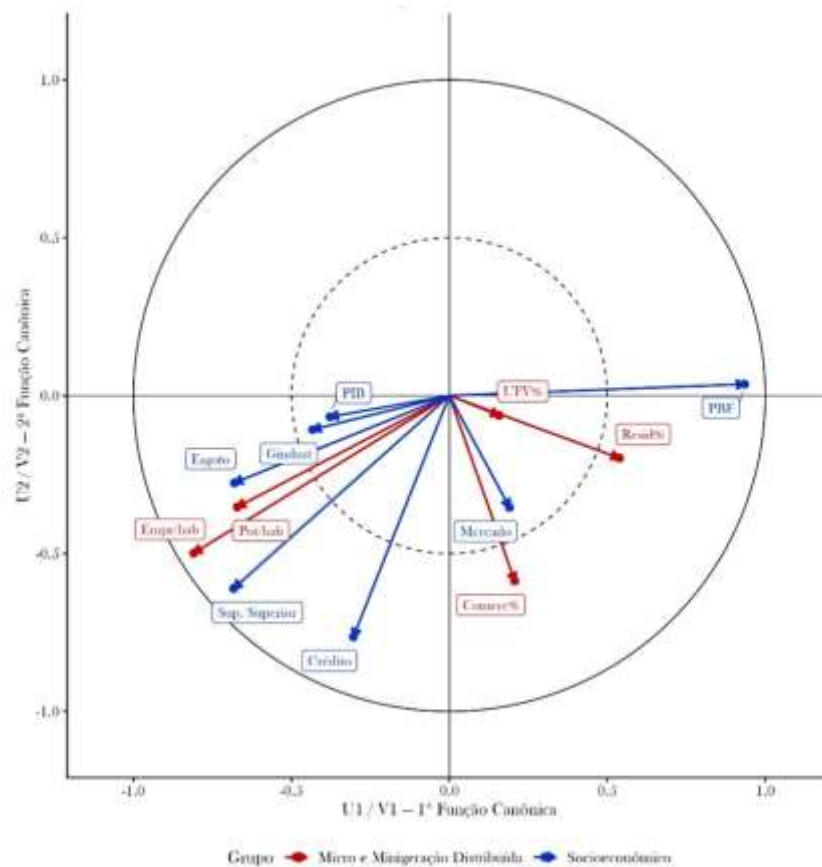
No vetor da MMGD (Grupo X), as maiores cargas canônicas da FC1 foram observadas para o número de empreendimentos por mil habitantes (-0,810) e para a potência instalada *per capita* (-0,671), indicando que essa dimensão está fortemente associada à intensidade de difusão da MMGD entre os municípios brasileiros. A participação da geração residencial também apresentou carga relevante (0,538), sugerindo que a expansão da MMGD não se manifesta apenas pelo aumento da capacidade instalada, mas também pela ampliação da participação das unidades consumidoras residenciais no processo de difusão da tecnologia.

No vetor socioeconômico (Grupo Y), a variável com maior carga canônica em módulo foi o número de beneficiários do Programa Bolsa Família *per capita* (0,935), seguido pelo percentual da população com ensino superior completo (-0,683), pela cobertura de esgotamento sanitário (-0,681), pelo grau de industrialização (-0,433), pelo PIB *per capita* (-0,378) e pelo crédito bancário *per capita* (-0,304). Observa-se que o Programa Bolsa Família apresenta sinal oposto aos principais indicadores de desenvolvimento econômico e social, indicando que

municípios com maior intensidade de MMGD tendem a apresentar menor vulnerabilidade socioeconômica, maior escolaridade, melhores condições de infraestrutura urbana, maior dinamismo econômico e maior acesso ao sistema financeiro. Esses resultados são consistentes com a literatura revisada, que identifica a renda, o capital humano e o acesso ao crédito como fatores que favorecem a adoção de tecnologias intensivas em capital, como a MMGD.

Após a identificação das variáveis que mais contribuíram para a formação das funções canônicas, a etapa seguinte consiste em analisar sua representação gráfica por meio dos círculos de correlação canônica. Esses diagramas permitem visualizar simultaneamente a direção, a intensidade e a proximidade das associações entre as variáveis originais e as funções canônicas estimadas. De modo geral, vetores mais distantes da origem apresentam maior correlação com as funções canônicas, enquanto vetores com orientações semelhantes indicam associações positivas entre as variáveis, e vetores posicionados em direções opostas sugerem associações negativas.

A Figura 4 apresenta o círculo de correlações canônicas entre a primeira e a segunda funções canônicas ($FC1 \times FC2$), permitindo visualizar simultaneamente a direção, a intensidade e a proximidade entre as variáveis originais e as dimensões canônicas estimadas. Observa-se que os vetores correspondentes à potência instalada *per capita* e ao número de empreendimentos por mil habitantes apresentam orientação semelhante às variáveis relacionadas ao desenvolvimento socioeconômico, especialmente escolaridade, crédito bancário, cobertura de esgotamento sanitário, grau de industrialização e PIB *per capita*. Essa configuração indica que municípios com maior intensidade de difusão da MMGD tendem a apresentar melhores condições econômicas, produtivas e de infraestrutura.

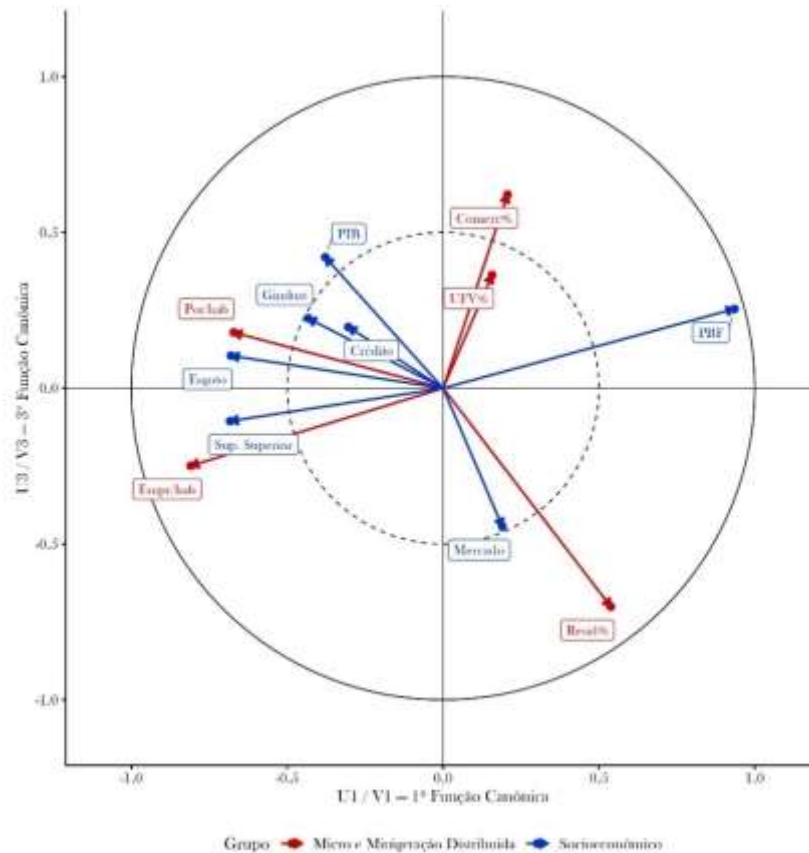
Figura 4 – Círculo de Correlações Canônicas — FC1 × FC2

Fonte: Elaboração própria da autora.

Em sentido oposto, a variável Bolsa Família *per capita* apresenta orientação inversa em relação à maior parte dos indicadores de desenvolvimento, evidenciando que municípios com maior dependência de programas de transferência de renda tendem a registrar menor intensidade de difusão da MMGD. Além disso, observa-se a formação de dois agrupamentos bem definidos: um composto pelas variáveis associadas ao desenvolvimento socioeconômico e à intensidade da geração distribuída, e outro representado pela vulnerabilidade socioeconômica, sintetizada pela variável Bolsa Família *per capita*. Essa configuração gráfica reforça os resultados anteriormente observados nas cargas canônicas da primeira função.

Por sua vez, a Figura 5 apresenta o círculo de correlações entre a primeira e a terceira funções canônicas (FC1 × FC3). Enquanto a primeira função continua representando o eixo principal de associação entre a intensidade da MMGD e o desenvolvimento socioeconômico municipal, a terceira função evidencia diferenças na composição dos dois conjuntos de variáveis

Figura 5 – Círculo de Correlações Canônicas — FC1 × FC3



Fonte: Elaboração própria da autora.

No conjunto da MMDG, observa-se uma separação entre a participação da geração residencial e as variáveis associadas à geração comercial e à predominância da fonte solar fotovoltaica, sugerindo que essa dimensão capta diferenças no perfil de utilização da geração distribuída entre os municípios. No conjunto socioeconômico, o PIB *per capita* apresenta comportamento relativamente distinto das demais variáveis, enquanto crédito, escolaridade, esgotamento sanitário e grau de industrialização permanecem relativamente agrupados. Esses resultados indicam que a terceira função canônica representa uma dimensão complementar da associação entre os conjuntos de variáveis, relacionada mais à composição da MMDG e às características específicas da estrutura econômica municipal do que ao nível geral de desenvolvimento captado pela primeira função.

Embora as cargas canônicas e os círculos de correlação permitam identificar quais variáveis estão mais fortemente associadas às funções canônicas, essas medidas não informam a capacidade explicativa de cada função em relação aos conjuntos originais de variáveis. Para

complementar essa análise, avaliam-se a variância extraída, o coeficiente de determinação (R^2 canônico) e os índices de redundância, que permitem mensurar o percentual de variância compartilhada entre os dois conjuntos de indicadores e, conseqüentemente, a relevância prática de cada função canônica.

A Tabela 6 apresenta a variância extraída, o coeficiente de determinação (R^2 canônico) e os índices de redundância associados às funções canônicas estimadas. Os resultados indicam que a primeira função canônica (FC1) concentra a maior parte da associação entre os dois conjuntos de variáveis, apresentando correlação canônica de 0,538 ($R^2 = 0,290$). Essa função extrai 29,27% da variância do conjunto de indicadores de MMGD e 32,32% da variância do conjunto de indicadores socioeconômicos. Como consequência, os índices de redundância indicam que a FC1 recupera 8,48% da variância do conjunto de MMGD a partir das variáveis socioeconômicas e 9,37% da variância do conjunto socioeconômico a partir das variáveis de MMGD.

Tabela 6 – Variância Extraída, Correlação Canônica e Índices de Redundância

Função	Variância Extraída (%) ¹		R^2 canônico	Redundância (%) ²	
	MMGD (X)	Socioeconômico (Y)		MMGD (X)	Socioeconômico (Y)
FC1	29,27	32,32	0,290	8,48	9,37
FC2	15,20	16,79	0,038	0,58	0,64
FC3	22,08	7,86	0,016	0,35	0,12
FC4	11,66	11,38	0,008	0,09	0,09
FC5	21,78	9,93	0,001	0,02	0,009

Fonte: Elaboração própria da autora.

Embora as funções canônicas FC2, FC3 e FC4 tenham apresentado significância estatística nos testes multivariados, seus coeficientes de determinação e índices de redundância foram substancialmente inferiores aos observados para a FC1. A segunda função, por exemplo, apresentou R^2 canônico de apenas 0,038 e índices de redundância inferiores a 1%, enquanto as funções subsequentes exibiram valores ainda menores. A quinta função canônica, por sua vez, não apresentou significância estatística. Esses resultados evidenciam que a maior parte da informação compartilhada entre os dois conjuntos de variáveis encontra-se concentrada na

¹ A variância extraída representa a proporção da variância interna capturada por cada função canônica.

² O índice de redundância corresponde ao produto entre a variância extraída e o coeficiente de determinação canônico (R^2), indicando a proporção da variância de um grupo explicada pelo outro.

primeira dimensão canônica, justificando que a interpretação econômica da ACC seja direcionada prioritariamente à FC1.

A predominância da primeira função canônica sugere que a difusão da MMGD está fortemente associada ao nível de desenvolvimento socioeconômico dos municípios brasileiros. Em conjunto, os resultados indicam que localidades caracterizadas por maior renda, maior acesso ao crédito, maior estoque de capital humano, melhor infraestrutura urbana e maior dinamismo produtivo tendem a apresentar maior intensidade de adoção da geração distribuída. Em contrapartida, municípios com maior participação relativa de beneficiários do Programa Bolsa Família apresentam menor intensidade de difusão dessa tecnologia, indicando que restrições econômicas e sociais podem limitar o acesso aos investimentos necessários para sua adoção.

Essas evidências são consistentes com a literatura discutida ao longo deste trabalho, segundo a qual tecnologias intensivas em capital, como os sistemas fotovoltaicos, dependem não apenas de condições técnicas favoráveis, mas também da disponibilidade de recursos financeiros, da capacidade de acesso ao crédito e do capital humano necessário para a obtenção e o processamento das informações associadas ao investimento.

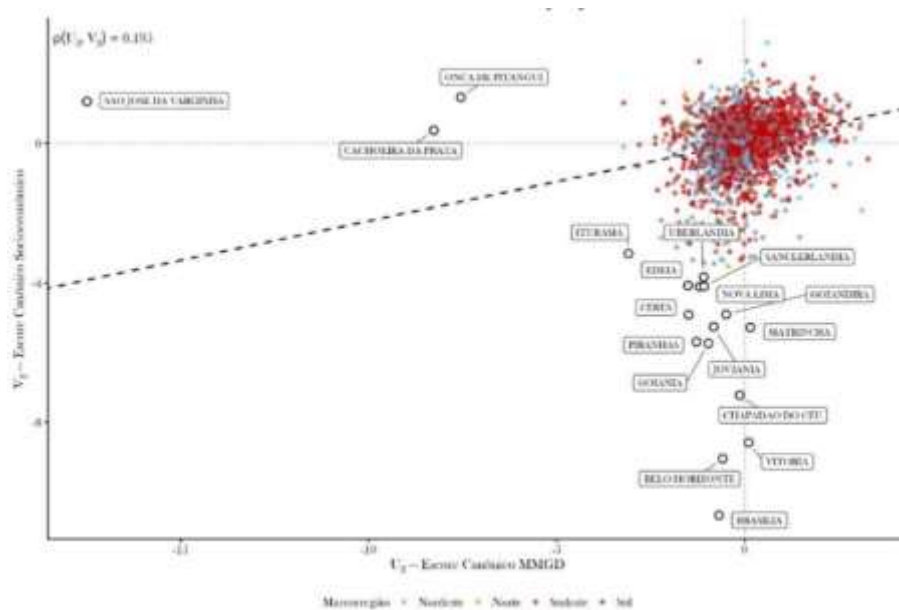
Dessa forma, os resultados sugerem que a expansão da MMGD no Brasil tem ocorrido de maneira desigual entre os municípios, refletindo diferenças preexistentes nas condições de desenvolvimento econômico e social. Sob a perspectiva das políticas públicas, esse resultado reforça a importância de instrumentos capazes de reduzir barreiras financeiras e informacionais à adoção da geração distribuída, ampliando o acesso à tecnologia em municípios com menor capacidade econômica e contribuindo para uma transição energética mais inclusiva.

Após a avaliação da importância relativa das funções canônicas por meio da variância extraída e dos índices de redundância, a etapa seguinte consiste em analisar os escores canônicos associados aos municípios. Diferentemente das cargas canônicas, que descrevem a contribuição das variáveis para a formação de cada função, os escores canônicos representam a posição de cada município nas dimensões estimadas pela ACC. Sua representação gráfica permite identificar padrões de dispersão, agrupamentos e observações atípicas, fornecendo uma visão complementar da estrutura de associação entre os indicadores de MMGD e as características socioeconômicas.

à MMGD, sugerindo níveis atípicos de difusão da GD em comparação aos demais municípios. Em sentido oposto, Serrano do Maranhão apresenta elevado escore socioeconômico, uma vez que está isolada na parte superior do gráfico.

A Figura 7 apresenta a dispersão dos escores associados à segunda função canônica ($U_2 \times V_2$). Em comparação com a primeira função, observa-se menor dispersão ao longo da direção predominante da associação, refletindo a reduzida capacidade explicativa da segunda dimensão canônica. Esse resultado é consistente com os indicadores apresentados na Tabela 6, segundo os quais a FC2 apresenta coeficiente de determinação de apenas 0,038 e índices de redundância inferiores a 1%, indicando contribuição limitada para a variância compartilhada entre os dois conjuntos de variáveis.

Figura 7 – Dispersão dos scores das variáveis canônicas U_2 e V_2



Fonte: Elaboração própria da autora.

Embora alguns municípios apresentem escores mais afastados da distribuição principal, a elevada concentração das observações próximas ao centro do gráfico indica que a segunda função canônica possui reduzido poder discriminatório. Dessa forma, a interpretação econômica dos resultados concentra-se na primeira função canônica, responsável pela maior parte da associação entre os indicadores de MMGD e as características socioeconômicas dos municípios brasileiros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desta pesquisa consistiu em investigar a associação multivariada entre indicadores de MMGD e indicadores socioeconômicos dos municípios brasileiros por meio da ACC. A pesquisa evidenciou a existência de associação estatisticamente significativa entre os dois conjuntos de variáveis. A primeira função canônica concentrou a maior parcela da variância compartilhada entre os grupos, apresentando correlação canônica de 0,538 e os maiores índices de redundância, caracterizando-se como a principal dimensão de relacionamento entre a difusão da MMGD e as condições socioeconômicas municipais. Embora estatisticamente significativa, a magnitude dessa associação foi moderada, indicando que os fatores socioeconômicos analisados explicam apenas parte da variabilidade observada na difusão da MMGD entre os municípios brasileiros.

A análise das cargas canônicas mostrou que a maior intensidade de difusão da MMGD esteve tenderam a estar associados a municípios com maior capacidade econômica, maior disponibilidade de crédito, maior estoque de capital humano, melhor infraestrutura urbana e maior dinamismo produtivo. Em contrapartida, municípios com maior participação relativa de beneficiários do Programa Bolsa Família apresentaram menor inserção no mercado de MMGD. Em conjunto, esses resultados sugerem que a expansão da MMGD ocorreu de forma mais intensa em localidades que já dispunham de condições econômicas e sociais mais favoráveis à adoção de tecnologias intensivas em capital.

Os resultados obtidos corroboraram a literatura sobre difusão de inovações e transição energética ao indicarem que a expansão da MMGD dependeu não apenas da existência de condições técnicas ou regulatórias favoráveis, mas também da disponibilidade de recursos financeiros, do acesso ao crédito, do capital humano e da infraestrutura urbana. Dessa forma, a pesquisa indicou que as desigualdades socioeconômicas entre os municípios brasileiros estiveram associadas à própria capacidade de inserção no processo de transição energética.

Sob a perspectiva das políticas públicas, a pesquisa evidenciou que o atual processo de expansão da MMGD, com base no ano de 2022 não ocorreu de forma homogênea entre os municípios brasileiros. Embora o marco regulatório tenha contribuído para a consolidação do mercado de GD, os resultados sugerem que seus benefícios tenderam a concentrar-se predominantemente em municípios com melhores condições estruturais de desenvolvimento.

Nesse contexto, instrumentos complementares, como linhas de crédito direcionadas, mecanismos de garantia para pequenos consumidores, programas de financiamento e ações voltadas à disseminação de informações sobre a tecnologia podem contribuir para reduzir barreiras econômicas e informacionais, ampliando o acesso à MMGD e promovendo uma transição energética mais inclusiva.

Além das evidências empíricas, esta pesquisa também apresentou uma contribuição metodológica ao empregar a ACC para investigar simultaneamente as relações entre dois conjuntos multidimensionais de variáveis. Diferentemente da abordagem predominante na literatura, baseada em modelos de regressão que analisam isoladamente os determinantes da adoção da GD, a ACC permitiu sintetizar a estrutura de associação entre indicadores de MMGD e diferentes dimensões do desenvolvimento socioeconômico municipal, oferecendo uma visão integrada das interações entre esses fenômenos.

Apesar das contribuições apresentadas, algumas limitações devem ser consideradas. A análise foi realizada a partir de dados em corte transversal referentes ao ano de 2022, impossibilitando acompanhar a evolução temporal da difusão da MMGD e das relações identificadas entre os conjuntos de variáveis. Além disso, a ACC permitiu identificar associações estatísticas entre os fenômenos analisados, mas não estabelecer relações de causalidade. Também não foram incorporados explicitamente os efeitos espaciais entre os municípios, aspecto potencialmente relevante em processos de difusão tecnológica, nos quais a proximidade geográfica e a circulação de informações podem favorecer a adoção de novas tecnologias. Dessa forma, pesquisas futuras podem ampliar esta análise por meio da utilização de dados em painel, da incorporação de modelos espaciais e da inclusão de novos fatores institucionais, regulatórios e territoriais, permitindo compreender de maneira mais abrangente os determinantes da difusão da MMGD no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. **Relação de empreendimentos de Mini e Micro Geração Distribuída**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empreendimentos-de-geracao-distribuida>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- BCB. **Portal de Dados Abertos do Banco Central do Brasil**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://dadosabertos.bcb.gov.br/>. Acesso em: 2 abr. 2026.
- BENEDITO, Ricardo da Silva. **Caracterização da Geração Distribuída de Eletricidade por meio de sistemas fotovoltaicos conectados à rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório**. [S. l.]: [s. d.], 2009.
- BETARELLI JUNIOR, Admir Antonio; SIMÕES, Rodrigo Ferreira. **A dinâmica setorial e os determinantes locais das microrregiões paulistas**. Economia Aplicada, [s. l.], vol. 15, nº 4, p. 641–670, 2011.
- BIZAWU, Kiwongui; GIBRAN, Sandro Mansur; VIEIRA DE SOUZA BARBOSA, Eduardo. **O futuro do setor de energia no Brasil sob a perspectiva de uma Sociedade do Custo Marginal Zero**. [S. l.]: [s. d.], 2019. Disponível em: <https://revista.unicuritiba.edu.br/index.php/RIMA/article/view/4005/371372326>. Acesso em: 26 abr. 2026.
- BRASIL. **Decreto nº 41.019, de 26 de fevereiro de 1957**. [S. l.], 1957. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/d41019.htm. Acesso em: 7 jul. 2026.
- BRASIL. **Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002**. Diário Oficial da União, [s. l.], vol. 12, 2002.
- BRASIL. **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004**. Diário Oficial da União, [s. l.], 2004.
- BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Diário Oficial da União, [s. l.], 2022.
- BRASIL. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Diário Oficial da União, [s. l.], 2012.
- C. RENCHER, Alvin; WILLIAM F., Christensen. **Methods of Multivariate Analysis**. [S. l.]: [s. d.], 1996-. ISSN 00401706.vol. 38
- CAMPIGOTTO SOETHE, Ghabriel; ALBERTO BLANCHET, Luiz. **Geração distribuída e desenvolvimento sustentável**. A&C-administrative & Constitutional Law Review, [s. l.], 2019. Disponível em: www.editoraforum.com.br.
- CHUECA, Enrique *et al.* **Early adopters of residential solar PV distributed generation: Evidence from Brazil, Chile and Mexico**. Energy for Sustainable Development, [s. l.], vol. 76, 2023.

- COSME, Pedro; VIEIRA, Costa. **Introdução à teoria do consumidor**. [S. l.]: [s. d.], 2004. Disponível em: <http://econwpa.wustl.edu/eprints/mic/papers/0501/0501003.abs>. .
- DE FREITAS, Bruno Moreno Rodrigo. **Price signals and distributed solar adoption under net metering: Evidence from Brazil**. Utilities Policy, [s. l.], vol. 101, 2026.
- DE FREITAS, Bruno Moreno Rodrigo. **What's driving solar energy adoption in Brazil? Exploring settlement patterns of place and space**. Energy Research and Social Science, [s. l.], vol. 89, 2022.
- DO NASCIMENTO, Felipe Moraes *et al.* **Factors for measuring photovoltaic adoption from the perspective of operators**. Sustainability (Switzerland), [s. l.], vol. 12, nº 8, p. 3184, 2020.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD): Base Metodológica**. [S. l.]: [s. d.], 2025.
- FARIA, Weslem Rodrigues *et al.* **Estrutura Socioeconômica, vantagens competitivas e padrão regional: avaliando as disparidades da Zona da Mata de Minas Gerais em 2010**. [s. l.], vol. 12, nº 1, p. 430–439, 2018.
- FELICE FALIVENE BAPTISTA, David; PEREIRA DA SILVA, Luiz Carlos; CELESTE FONSECA, Isabel. **A Natureza Jurídica da Geração Distribuída de Energia Elétrica no Brasil**. Direito Público, [s. l.], vol. 19, nº 104, 2023.
- GARLET, Taís Bisognin *et al.* **Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [s. l.], vol. 111, p. 157–169, 2019.
- HALL, Bronwyn H; KHAN, Beethika. **Adoption of New Technology**. [S. l.]: [s. d.], 2003. Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w9730>. .
- IBGE. **Censo Demográfico**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 16 set. 2025.
- IBGE. **SCN - Sistema de Contas Nacionais**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html>. .
- MARTINS, Vanderlei Affonso; BRANCO, David Alves Castelo; HALLACK, Michelle Carvalho Metanias. **Economic Effects of Micro-and Mini-Distributed Photovoltaic Generation for the Brazilian Distribution System**. Energies, [s. l.], vol. 15, nº 3, p. 1–25, 2022.
- MDS. **Ministério do Desenvolvimento Social e Combate à Fome - Portal de Dados Abertos**.

[S. l.], 2023. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/bolsa-familia>. Acesso em: 2 abr. 2026.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Relação anual de informações sociais**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.rais.gov.br/sitio/index.jsf>. Acesso em: 2 abr. 2026.

NETTO, ANGELO NERY DE QUEIROZ. **Geração distribuída fotovoltaica: modelagem da difusão e impactos econômicos para as distribuidoras e consumidores de energia no Brasil**. [S. l.]: [s. d.], 2025.

PEREIRA, F. M. **Cidades médias brasileiras: uma tipologia a partir de suas (des)economias de aglomeração**. Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], p. 1–107, 2002.

PEREIRA, Fm; LEMOS, Mauro Borges. **Cidades Médias Brasileiras : Características E Dinâmicas Urbano-Industriais**. Pesquisa e Planejamento Econômico, [s. l.], vol. 33, p. 127–165, 2003. Disponível em: <http://www.ppe.ipea.gov.br/index.php/ppe/article/view/88>.

PRONTI, A.; ZOBOLI, R. **Something new under the sun. A spatial econometric analysis of the adoption of photovoltaic systems in Italy**. Energy Economics, [s. l.], vol. 134, 2024.

RAIS. **Relação anual de informações sociais. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, MTE**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.rais.gov.br/sitio/index.jsf>. Acesso em: 30 nov. 2025.

ROGERS, Everett M.. **Diffusion of innovations**. [S. l.]: Free Press, 1995.

SALGUEIRO, Guilherme Perobelli *et al.* **Spatial and socioeconomic factors of distributed photovoltaic generation in Minas Gerais**. Energy Economics, [s. l.], vol. 154, 2026.

SERMARINI, Anna Carolina de Paula *et al.* **Distributed energy resources in low-income communities: A public policy proposal for Brazil**. Energy Policy, [s. l.], vol. 187, 2024.

XAVIER PEREIRA, Narlon. **Desafios e Perspectivas da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil: Geração Distribuída vs Geração Centralizada**. [S. l.]: [s. d.], 2019. Disponível em: <https://www.portaldeperiodicos.idp.edu.br/direitopublico/article/view/6956/2892>. Acesso em: 26 abr. 2026.