

Estado da publicação: O preprint não foi publicado em outro meio.

Desenvolvimento Socioeconômico e Difusão da Micro e Minigeração Distribuída: Evidências da Transição Energética no Rio Grande do Sul

Rodrigo Foresta Wolffenbüttel, Sandro Ruduit Garcia, Victor dos Reis Wolffenbüttel

<https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.17799>

Submetido em: 2026-09-01

Postado em: 2026-09-02 (versão 1)

(AAAA-MM-DD)

DESENVOLVIMENTO SOCIOECONÔMICO E DIFUSÃO DA MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA: EVIDÊNCIAS DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO RIO GRANDE DO SUL

Rodrigo Foresta Wolffenbüttel.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3417-563X>

<rforest@unicamp.br>

DPCT-UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

Sandro Ruduit Garcia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7060-2678>.

<sandro.ruduit@ufrgs.br>

PPGS-UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil.

Victor dos Reis Wolffenbüttel.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5235-3105>

<victorrwolff@gmail.com>

POSGEA-UFRGS. Porto Alegre, RS, Brasil..

RESUMO: Este trabalho analisa a associação entre fatores socioeconômicos municipais e a difusão da Micro e Minigeração Distribuída de Energia Elétrica (MMGD) no Rio Grande do Sul, buscando contribuir para a compreensão da transição energética como processo sociotécnico territorialmente situado e desigual. Argumenta-se que a expansão da geração distribuída não pode ser explicada apenas por atributos demográficos ou econômicos, pois depende também de condições locais de desenvolvimento, capacidades institucionais e recursos sociais que favorecem a adoção de inovações de baixo carbono. A partir de dados municipais da ANEEL, do IFDM e do IBGE, o estudo examina a relação entre potência instalada de MMGD, escala populacional, PIB per capita e desenvolvimento municipal. Os resultados indicam forte concentração da capacidade instalada em municípios mais populosos, evidenciando efeito de escala; contudo, o IFDM mantém associação positiva e estatisticamente significativa mesmo após os controles, enquanto o PIB per capita apresenta contribuição marginal. A principal contribuição teórica do artigo consiste em articular a perspectiva das transições sociotécnicas à dimensão territorial, mostrando que a difusão da MMGD envolve assimetrias locais e capacidades socialmente distribuídas. Ao destacar o papel das dimensões Educação e Emprego/Renda, o estudo reforça a necessidade de incorporar indicadores de desenvolvimento municipal às análises sobre transição energética, inovação e formação de mercados sustentáveis.

Palavras-chave: geração distribuída, transição energética, desenvolvimento socioeconômico, desigualdades territoriais, Rio Grande do Sul.

SOCIOECONOMIC DEVELOPMENT AND THE DIFFUSION OF MICRO AND MINI-DISTRIBUTED GENERATION: EVIDENCE OF THE ENERGY TRANSITION IN RIO GRANDE DO SUL

ABSTRACT: This paper analyzes the association between municipal socioeconomic factors and the diffusion of micro and mini-distributed electricity generation (MMGD) in Rio Grande do Sul, Brazil, contributing to the understanding of energy transition as a territorially situated and uneven sociotechnical process. It argues that the expansion of distributed generation cannot be explained

solely by demographic or economic attributes, since it also depends on local development conditions, institutional capacities, and social resources that foster the adoption of low-carbon innovations. Drawing on municipal data from ANEEL, the FIRJAN Municipal Development Index (IFDM), and the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), the study examines the relationship between installed MMGD capacity, population scale, GDP per capita, and municipal development. The results indicate a strong concentration of installed capacity in more populous municipalities, revealing an important scale effect; however, the IFDM remains positively and statistically associated with installed capacity even after controls are introduced, whereas GDP per capita shows only a marginal contribution. The paper's main theoretical contribution is to articulate the sociotechnical transitions perspective with a territorial approach, showing that MMGD diffusion involves local asymmetries and socially distributed capacities. By highlighting the role of Education and Employment/Income dimensions, the study reinforces the need to incorporate municipal development indicators into analyses of energy transition, innovation, and the formation of sustainable markets.

Keywords: distributed generation, energy transition, socioeconomic development, territorial inequalities, Rio Grande do Sul.

INTRODUÇÃO

A transição para sistemas energéticos menos intensivos em carbono constitui um dos principais desafios contemporâneos no enfrentamento das mudanças climáticas. Nesse contexto, destaca-se a expansão da geração de energia solar por meio da Micro e Minigeração Distribuída de Energia Elétrica (MMGD), modalidade que permite aos consumidores produzir energia a partir de fontes renováveis e injetar excedentes na rede de distribuição. Transições dessa natureza não decorrem apenas da introdução de novas tecnologias, mas da reconfiguração de sistemas compostos por infraestruturas, mercados, políticas públicas, práticas de consumo e significados socioculturais. Considerando a rápida expansão da MMGD no Rio Grande do Sul, esta pesquisa busca responder à seguinte questão: **em que medida fatores socioeconômicos estão associados à difusão e à consolidação da MMGD nos municípios gaúchos, contribuindo para a compreensão da transição do sistema sociotécnico de energia elétrica?**

A pesquisa analisa o processo de difusão da MMGD no Rio Grande do Sul, buscando compreender como características socioeconômicas municipais se associam à sua expansão. Para tanto, foram utilizados dados secundários provenientes de bases oficiais, especialmente o Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM). Inicialmente, realizou-se a caracterização da MMGD, considerando dados de 2013 a 2023, por meio de estatística descritiva. Em seguida, foram empregados testes de correlação e modelos de regressão, com os dados do ano mais recente, para

examinar a associação entre indicadores socioeconômicos e a capacidade instalada de geração distribuída nos municípios gaúchos. Entre as variáveis analisadas destacam-se a população, o PIB per capita, o IFDM e suas dimensões e a potência instalada em MMGD. O objetivo é identificar fatores estruturais que favorecem a adoção dessa inovação tecnológica em nível local.

Os resultados indicam que a capacidade instalada de MMGD no Rio Grande do Sul apresenta forte concentração em municípios de maior porte populacional, como Porto Alegre, Caxias do Sul e Novo Hamburgo, evidenciando um importante efeito de escala. Entretanto, ao controlar estatisticamente a população municipal, o IFDM manteve associação positiva e significativa com a potência instalada, sugerindo que o nível de desenvolvimento local exerce influência própria sobre a difusão da geração distribuída. Esses achados indicam que a expansão da MMGD não pode ser explicada apenas por fatores demográficos ou econômicos, mas também por condições estruturais relacionadas à capacidade institucional, ao acesso a recursos, à qualificação da população e à articulação de atores locais. A pesquisa reforça, assim, a importância de compreender a transição energética como um processo sociotécnico territorialmente desigual, cuja difusão depende de condições sociais e institucionais específicas (Rogers, 1995).

Ao analisar a transição energética como um processo socialmente estruturado, no qual mercados, tecnologias, instituições e atores econômicos se constituem de forma interdependente, a pesquisa dialoga diretamente com a perspectiva das transições sociotécnicas para a sustentabilidade (Köhler, et al., 2019) e com contribuições da Sociologia Econômica (Pinch; Swedberg, 2008). Nestes termos, o estudo busca investigar condições socioeconômicas locais e sua relação com a difusão de MMGD no RS. Os resultados evidenciam que a expansão dessa inovação não depende apenas de atributos demográficos ou econômicos, mas também de recursos sociais, capacidades institucionais e características do desenvolvimento municipal. Nesse sentido, o trabalho contribui para a compreensão dos mecanismos sociais que condicionam a formação e a transformação de mercados associados à transição energética, aproximando debates sobre inovação, mudança institucional e sustentabilidade, temas centrais para a agenda contemporânea da Sociologia Econômica.

Para além dessa seção introdutória, o *paper* está dividido em outras 4 seções. A próxima seção destina-se a discussão sobre os principais conceitos associados à transição para a sustentabilidade, na perspectiva da *Multi Level Perspective*, e suas limitações para a compreensão de realidades locais. A seção 2 é voltada para apresentação da metodologia proposta e dos métodos e técnicas empregados no estudo. A seção 3 discute os resultados das análises realizadas e suas implicações para a compreensão da difusão da MMGD nos municípios gaúchos. Por último, a seção das considerações finais recupera

a argumentação proposta, discute as limitações da investigação e aponta novos desdobramentos para a pesquisa.

1. REVISÃO DA LITERATURA

Partindo da constatação de que problemas ambientais contemporâneos, como as mudanças climáticas e o esgotamento de recursos naturais, demandam transformações profundas nos sistemas de produção, distribuição e consumo, o campo de estudos das Transições para Sustentabilidade vem adquirindo crescente relevância na produção acadêmica das últimas décadas (Köhler et al., 2019). Trata-se, contudo, de um campo plural, constituído por contribuições de diferentes disciplinas e tradições teóricas. Entre suas principais abordagens destacam-se a *Multi-Level Perspective* (MLP) (Geels, 2002), o *Technological Innovation System* (TIS) (Bergek et al., 2008), o *Strategic Niche Management* (SNM) (Rip; Kemp, 1998) e o *Transition Management* (TM) (Loorbach, 2010).

Não por acaso, muitas dessas abordagens têm origem nos Estudos de Inovação (Smith et al., 2010), uma vez que compartilham o interesse pela análise da emergência, difusão e estabilização de novidades em contextos estruturais marcados por tensões entre mudança e estabilidade. Nas Transições para Sustentabilidade, entretanto, o foco recai sobre inovações orientadas por uma direção normativa específica: a construção de formas mais sustentáveis de produzir, distribuir e consumir. Desse modo, a inovação não é tratada apenas como introdução de novas tecnologias, mas como parte de processos mais amplos de transformação social, institucional, econômica e cultural.

Para além desse ponto em comum, as pesquisas do campo compartilham pressupostos importantes sobre a natureza dos processos de transição. Como os sistemas sociotécnicos são compostos por múltiplos elementos interdependentes — tecnologias, mercados, práticas de usuários, significados culturais, infraestruturas, políticas públicas, estruturas industriais e cadeias de abastecimento e distribuição —, a implementação de novidades, como a MMGD, depende de mudanças articuladas em diferentes dimensões (Fagerberg, 2022). Assim, sua difusão não pode ser compreendida apenas pelo desenvolvimento técnico da tecnologia, pois envolve também alterações econômicas, políticas, sociais, institucionais e culturais que condicionam sua adoção e consolidação.

Dessa forma, as transições são compreendidas como processos coevolutivos, não lineares e de longa duração, conduzidos por diversos atores e grupos sociais dotados de recursos, capacidades, crenças, estratégias e interesses distintos. Esses processos se desenvolvem em contextos mais ou menos favoráveis à mudança, nos quais interagem, de maneira multidimensional, impulsos voltados a transformações radicais e forças associadas à estabilidade, à resistência institucional e à dependência

de trajetória (Köhler et al., 2019). É justamente essa tensão entre continuidade e transformação que torna necessária uma abordagem analítica capaz de captar a complexidade dos sistemas sociotécnicos.

Assim, para compreender a relação dialética entre mudança e estabilidade nas diferentes dimensões dos sistemas sociotécnicos, torna-se necessário adotar uma perspectiva sistêmica, capaz de apreender a complexidade e o caráter coevolutivo dos processos de transição. É nesse sentido que Geels (2002), a partir da *Multi-Level Perspective* (MLP), propõe a análise das transições por meio de três níveis interdependentes: os nichos de inovação, entendidos como espaços relativamente protegidos de experimentação e desenvolvimento de inovações radicais; os regimes sociotécnicos, que correspondem às estruturas institucionais, tecnológicas, econômicas, culturais e políticas que sustentam os sistemas existentes e, em razão de diferentes mecanismos de *lock-in*, tendem a produzir mudanças incrementais e dependentes da trajetória (*path-dependent*); e o panorama sociotécnico, referente ao contexto exógeno mais amplo, marcado por mudanças lentas, estruturais e externas aos regimes.

De acordo com essa abordagem, as transições para a sustentabilidade resultam da interação dinâmica entre processos situados nesses três níveis analíticos. Embora não sigam uma trajetória linear, em geral as inovações radicais emergem em nichos protegidos, nos quais novos entrantes — como pioneiros, empreendedores e demais atores inovadores — fomentam, experimentam e testam alternativas em condições parcialmente isoladas das pressões seletivas dos regimes estabelecidos (Rip; Kemp, 1998). Nesse estágio, o regime sociotécnico vigente encontra-se estabilizado por mecanismos de bloqueio de diferentes naturezas: tecnoeconômicos, associados a custos de produção mais elevados e desempenho inicialmente inferior das novas tecnologias frente às tecnologias incumbentes, beneficiadas por décadas de economias de escala e melhorias incrementais; sociais e cognitivos, relacionados a rotinas, mentalidades compartilhadas, capital social, práticas de usuários e estilos de vida vinculados a tecnologias específicas; e político-institucionais, expressos em leis, normas, regulamentos, padrões técnicos e coalizões de interesse que favorecem os atores estabelecidos (Geels, 2019).

Desse modo, o êxito de uma tecnologia nova e radical não depende apenas de seu desempenho técnico em sentido estrito. Para que ela se consolide como alternativa viável, é necessário que se abram brechas e janelas de oportunidade no regime sociotécnico dominante. Essas oportunidades são produzidas tanto por processos internos aos nichos — especialmente aprendizagem, aperfeiçoamento técnico, redução de custos, construção de expectativas compartilhadas e fortalecimento de redes de apoio — quanto por transformações no panorama externo, que pressionam o sistema vigente e

ampliam as possibilidades de difusão da inovação. À medida que a nova tecnologia ganha impulso, ela passa a provocar perturbações no regime existente, apoiada por melhorias na relação preço/desempenho, pelo engajamento de atores influentes e pela formação de visões comuns sobre seu potencial transformador (Geels, 2019). Nessas condições, a inovação radical pode romper mecanismos de bloqueio, aproveitar as janelas de oportunidade abertas e induzir mudanças em múltiplas dimensões — tecnologia, mercados, práticas de consumo, significados culturais e requisitos de infraestrutura. Esse processo é conduzido por atores que interpretam contextos, disputam recursos, negociam interesses, aprendem coletivamente e constroem coalizões enquanto navegam pelas transições e contribuem para a transformação dos sistemas sociotécnicos (Köhler et al., 2019).

A partir dessa leitura, a MLP oferece uma chave analítica especialmente útil para compreender como tecnologias emergentes, inicialmente desenvolvidas em nichos, podem ganhar legitimidade, ampliar sua difusão e, eventualmente, tensionar os regimes sociotécnicos estabelecidos. No caso da MMGD solar fotovoltaica, essa dinâmica pode ser observada na articulação entre pressões do panorama externo, como acordos internacionais, preocupações climáticas e novos entendimentos sobre os limites de grandes usinas e megaprojetos; mudanças no regime do setor elétrico, expressas nas disputas em torno do marco legal da geração distribuída e nos crescentes ganhos de produtividade, competitividade e legitimidade da energia fotovoltaica; e processos de experimentação e aprendizagem em nichos de inovação, vinculados a universidades, institutos de pesquisa, empresas instaladoras e redes de usuários. Ao mesmo tempo, a trajetória da MMGD revela dependências relevantes, sobretudo em relação à importação de tecnologias, equipamentos e componentes, o que indica que a difusão dessa inovação envolve não apenas oportunidades de mudança no regime, mas também novas formas de dependência de recursos externos para a transição energética.

Todavia, segundo Coenen et al. (2012), a abordagem da MLP apresenta importantes limitações em relação aos aspectos geográficos das transições, como sua insuficiente capacidade em captar a espacialidade e as variações territoriais nos processos de transição sociotécnica. Em parte, isso se deve a tendência focar na dimensão nacional, tratando as regiões de forma agregada, o que dificulta a compreensão das desigualdades no avanço das transições, como regiões mais ou menos avançadas na adoção de tecnologias limpas ou na criação de *lock-ins*.

Neste sentido, se faz necessário atentar para múltiplas escalas a fim de analisar variáveis específicas de contexto local ou regional, como recursos naturais, capacidades institucionais, redes de atores locais, ou as influências de diferentes políticas regionais. Pois, os processos de inovação ou de criação de *lock-ins* muitas vezes acontecem em escalas menores (cidades, regiões) que podem ter

dinâmicas distintas das de nível nacional ou global, uma nuance que a MLP nem sempre captura com clareza.

Em estudo recente, Delcayre e Bourdin (2025) ressaltam a influência de características territoriais na aceitabilidade social de projetos de energia renovável na França. Segundo os autores, aceitabilidade social refere-se às condições prévias que favorecem a percepção positiva dos projetos, diferenciando-se da aceitação observada após a implementação. Essas condições envolveriam tanto características do projeto, quanto o contexto territorial, incluindo propriedades históricas, socioeconômicas e culturais. De acordo com a investigação, regiões com histórico de confrontos socioambientais registram forte resistência baseada em memórias coletivas de conflitos passados, naquilo que os autores chamam de “feridas territoriais”, gerando mecanismos de bloqueio aos projetos. Ao passo que regiões com cultura de diálogo e consulta à população mostram maior disposição para negociação e aceitação.

Logo, para além dos aprisionamentos produzidos por características locais, outros fatores como recursos naturais (condições de vento e incidência solar), apoio da governança local e posicionamento em redes de conhecimento podem afetar a trajetória de implementação de novas tecnologias, como os painéis fotovoltaicos usados na MMGD (Geels, 2025). Isto é, os processos sociotécnicos de desenvolvimento e difusão inovações são socialmente imersos em espaços territorialmente específicos (Pinch; Swedberg, 2008) e podem apresentar diferentes trajetórias para a transição.

Outro aspecto fundamental para a teoria é a compreensão de que as transições sociotécnicas ocorrem ao longo de várias décadas e podem ser divididas em quatro fases com diferentes atividades centrais e disputas (Geels; Raven, 2006): 1) experimentação, caracterizada pelo alto grau de incerteza em processos de aprendizado que acontecem à margem do sistema existente, pela tentativa e erro, e pela entrada e saída de novos atores; 2) estabilização, momento em que a inovação se estabiliza em um “design dominante” e estabelece uma posição em um ou mais nichos de mercado, proporcionando um fluxo de recursos mais confiável; 3) difusão/disrupção, fase em que a inovação se aproveita das brechas abertas no sistema pelas pressões externas e se difunde nos mercados convencionais com o apoio no desenvolvimento de processos internos, como melhorias de preço/desempenho e entrada de novos atores poderosos; 4) institucionalização/ancoragem, estabelecimento e cristalização do novo sistema sociotécnico em diversos âmbitos, programas regulatórios, hábitos do usuário, visões de compartilhadas, padrões profissionais, e capacidades técnicas (Geels, 2019).

Esta distinção entre fases é importante, não para determinar uma linearidade ao processo, mas, pelo contrário, para estabelecer a contingência e o grau de incerteza muitas vezes vinculado às transições. Isso, porque as tensões nos regimes existentes podem ser contidas, de modo que as “janelas de oportunidade” para inovações não se materializem conforme o esperado, o impulso interno criado pode não ser suficiente para competir com as vantagens consolidadas, ou os atores estabelecidos podem se mobilizar e frustrar expectativas de mudança com sucesso (Fligstein. 2025).

No caso da trajetória da MMGD, no contexto nacional, há uma aparente passagem da (3) estabilização para a (4) difusão/disrupção, com as crescentes melhorias de preço/desempenho, economias de escala, desenvolvimento de tecnologias complementares e a incorporação da tecnologia nas rotinas e expectativas de usuários. Todavia, diferentes entes da federação têm apresentado distintos ritmos de adesão à tecnologia, o que autoriza uma investigação sobre fatores socioeconômicos locais e sua associação com a difusão da MMGD.

2. METODOLOGIA

A estratégia analítica utilizada para avaliar a influência de fatores socioeconômicos na difusão da MMGD nos municípios gaúchos foi dividida em 3 (três) etapas principais. A primeira etapa consistiu na construção da base analítica a partir de dados fornecidos pelo Painel de Dados de Micro e Minigeração Distribuída da ANEEL e do Índice FIRJAN de Desenvolvimento Municipal (IFDM¹). Para isso, foram agregados os dados de potência da ANEEL por município; eliminados os registros duplicados; padronizados os códigos IBGE das unidades de análise; e juntados (merge) os dados da ANEEL e do IFDM utilizando o código do município. O banco final continha uma observação para cada um dos 497 municípios do Rio Grande do Sul, no ano de 2023.

Para a segunda etapa, de caracterização dos municípios com base em análise estatística descritiva, foram selecionadas as variáveis de interesse (Quadro 1) e estimadas suas médias, os desvios-padrão, mínimo, máximo e sua distribuição. Essa organização permite análises comparativas entre

¹ O Índice Firjan de Desenvolvimento Municipal (IFDM) é um indicador sintético que varia de 0 a 1 e procura mensurar o nível de desenvolvimento socioeconômico dos municípios brasileiros por meio de três dimensões: Emprego e Renda, Saúde e Educação. A dimensão Emprego e Renda contempla indicadores relacionados à absorção da mão de obra formal, diversidade econômica, dinamismo do mercado de trabalho, geração e distribuição da renda e incidência da pobreza. A dimensão Saúde incorpora indicadores de cobertura e qualidade dos serviços de saúde, incluindo mortalidade infantil evitável, cobertura vacinal, pré-natal, disponibilidade de médicos, gravidez na adolescência e internações evitáveis. Já a dimensão Educação reúne indicadores referentes à oferta e qualidade da educação básica, abrangendo matrículas em creches, adequação da formação docente, distorção idade-série, abandono escolar, educação integral e desempenho no IDEB. Para mais detalhes, conferir: <https://www.firjan.com.br/ifdm/>.

municípios, viabilizando a investigação de padrões de adesão à tecnologia, desigualdades regionais e possíveis associações entre geração distribuída e indicadores de bem-estar e desempenho institucional, configurando uma base robusta e multidimensional para estudos quantitativos em nível local.

Quadro 1- Definição das Variáveis

Categoria	Variável	Descrição	Fonte
Dependente	Potência MMGD	Potência instalada acumulada até 2023	ANEEL
Tratamento	IFDM	Indicador sintético de desenvolvimento socioeconômico dos municípios (2023)	FIRJAN
Tratamento	IFDM Educação	Indicador sintético de desempenho educacional	FIRJAN
Tratamento	IFDM Saúde	Indicador sintético de desempenho sanitário	FIRJAN
Tratamento	IFDM Emprego e Renda	Indicador sintético de desempenho econômico	FIRJAN
Controle	População residente	População residente no município em 2022	IBGE
Controle	PIB per capita	Produto interno bruto per capita em 2023	IBGE

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, foram empregados testes de correlação e modelos de regressão para examinar a associação entre indicadores socioeconômicos e a capacidade instalada de geração distribuída nos municípios gaúchos. Após os testes de correlações bivariadas, foi utilizada regressão linear múltipla hierárquica, com a entrada das variáveis em blocos teoricamente definidos. O primeiro bloco incorporou o logaritmo da população, o segundo acrescentou o IFDM e o terceiro incorporou o PIB per capita. A ordem dos blocos foi estabelecida para avaliar a contribuição incremental do desenvolvimento municipal após o controle pela escala populacional e, posteriormente, da condição econômica após o controle simultâneo pela escala e pelo desenvolvimento.

3. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao observar os indicadores socioeconômicos dos municípios, a pesquisa buscou identificar as condições territoriais que tenderiam a favorecer a difusão da inovação, representada pela potência instalada de MMGD. Em outras palavras, a investigação teve como hipótese a associação entre as condições socioeconômicas municipais e uma maior capacidade de adoção da MMGD, expressando um avanço da transição do sistema sociotécnico de energia elétrica.

Todavia, ao analisar descritivamente os dados das variáveis selecionadas (Tabela 1) constata-se uma forte concentração territorial da Potência instalada de MMGD. Enquanto a média foi de 5,43 MW, a mediana alcançou apenas 2,28 MW, indicando forte assimetria positiva na distribuição. Os valores variaram de 0,14 MW a 94,57 MW, evidenciando a concentração da capacidade instalada em um número relativamente reduzido de municípios, como Porto Alegre, Caxias do Sul e Novo Hamburgo. Dado que revela uma importante diferença local em termos de difusão da tecnologia e sugere um olhar mais atento sobre a dimensão regional.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas sobre potência instalada de MMGD e indicadores socioeconômicos dos municípios do Rio Grande do Sul em 2023.

Variável	N	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo
Potência instalada de MMGD (MW)	496	5,426	2,283	9,568	0,140	94,568
População residente (mil hab.)	497	21,897	5,378	73,744	1,135	1.332,845
PIB per capita (R\$ mil)	497	54,199	47,185	29,296	19,950	330,080
IFDM	485	0,675	0,677	0,088	0,375	0,868
IFDM – Educação	485	0,641	0,653	0,095	0,307	0,852
IFDM – Saúde	497	0,668	0,674	0,094	0,332	0,869
IFDM – Emprego e Renda	497	0,716	0,706	0,155	0,357	1,000

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ANEEL, IBGE e FIRJAN.

Nota: O número de observações varia em função da disponibilidade de dados nas bases utilizadas. A potência instalada apresenta uma observação missing, enquanto o IFDM geral e o IFDM Educação apresentam 12 observações missing.

Um comportamento semelhante é observado na variável população, em que a média é mais de quatro vezes a mediana. A grande maioria dos municípios gaúchos é de pequeno porte populacional, enquanto poucos municípios concentram populações muito elevadas. Isso indica um possível efeito de escala, em que municípios com mais unidades consumidoras, tenham um número maior de potenciais adotantes de MMGD. Já o PIB per capita, apresenta uma assimetria positiva muito menos intensa do que a observada na população e na potência, apontando para a existência de alguns municípios com PIB per capita muito elevado. Esses resultados justificam o controle dos efeitos do tamanho populacional e da condição econômica na análise.

Por outro lado, as variáveis de desenvolvimento (IFDM e suas dimensões) apresentaram uma distribuição muito mais equilibrada. Em todas elas, a média e a mediana são praticamente iguais. A única exceção fica por conta do IFDM - Emprego e Renda, em que há uma diferença um pouco maior, expressando uma maior heterogeneidade municipal. Aspecto que será retomado quando observarmos as dimensões do IFDM individualmente.

Tabela 2 - Matriz de Correlação de Spearman entre Potência Instala de MMGD e Variáveis Socioeconômicas

Variável	1	2	3	4
1. Potência (ln)	—			
2. População (ln)	0,828**	—		
3. IFDM	0,518**	0,280**	—	
4. PIB per capita	0,288**	0,083 (n.s.)	0,488**	—

Fonte: Elaborada pelos autores.

Nota: Os valores representam o coeficiente (ρ) de Spearman.

A Tabela 2 apresenta as correlações de Spearman (ρ) entre a potência instalada de MMGD e as variáveis socioeconômicas analisadas. Conforme esperado, observa-se uma forte correlação positiva e estatisticamente significativa entre a potência instalada e o tamanho da população ($\rho = 0,828^{**}$ $p < 0,01$). O nível de desenvolvimento regional, medido pelo IFDM, também apresentou associação

moderada e positiva com a potência instalada ($p = 0,518^{**}$ $p < 0,01$). Por sua vez, o PIB per capita demonstrou uma correlação positiva fraca, porém significativa com a potência ($p = 0,288^{**}$ $p < 0,01$). É importante destacar, apesar de não ser objeto de estudo, que a relação entre população e PIB per capita não atingiu significância estatística ao nível de 5% ($p = 0,083$; $p = 0,064$).

Constatada a associação entre população, IFDM e PIB per capita com a potência instalada de MMGD nos municípios, buscou-se avaliar a contribuição incremental dos diferentes fatores socioeconômicos por meio de regressão linear múltipla hierárquica. Foram estimados três modelos hierárquicos para avaliar o seu grau de associação com a potência de MMGD instalada. O Modelo 1 incorpora exclusivamente o tamanho populacional, como medida da escala municipal. O Modelo 2 acrescenta o IFDM, permitindo avaliar se o nível de desenvolvimento municipal contribui para explicar a potência instalada para além da escala. Por fim, o Modelo 3 adiciona o PIB per capita, como medida da condição econômica municipal.

Tabela 3 - Modelos de regressão hierárquica da potência instalada de MMGD nos municípios do Rio Grande do Sul

Variáveis	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
População	0,617***	0,562***	0,564***
	(-0,014)	(-0,012)	(-0,012)
IFDM 2023	—	2,512***	2,386***
	—	(-0,169)	(-0,177)
PIB per capita	—	—	0,001*
	—	—	(-0,001)
Constante	-4,104***	-5,315***	-5,305***
	(-0,126)	(-0,132)	(-0,132)
R ²	0,803	0,865	0,867
R ² ajustado	0,803	0,864	0,866
ΔR^2	—	0,062	0,002
F Change	—	220,978***	5,401*
N	484	484	484

Nota: Coeficientes não padronizados; erros-padrão entre parênteses. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$. Variável dependente: $\ln(\text{Potência instalada de MMGD})$. O Modelo 1 inclui a variável de escala populacional; o Modelo 2 adiciona o IFDM; o Modelo 3 adiciona o PIB per capita.

Os resultados evidenciam forte associação entre escala populacional e potência instalada de MMGD (Modelo 1). O valor de Beta ($B = 0,617$) demonstra que um aumento de 1% na população municipal está associado, em média, a um aumento de aproximadamente 0,61% na potência instalada de MMGD. Porém, trata-se de uma relação inelástica, municípios maiores tendem a possuir mais MMGD, mas o crescimento da capacidade instalada não acompanha proporcionalmente o crescimento populacional.

O Modelo 2 incorpora o desenvolvimento municipal à análise, fazendo com que a associação entre população e potência diminua um pouco ($0,617 \rightarrow 0,562$). Por sua vez, a inclusão do IFDM produz incremento expressivo no poder explicativo do modelo, elevando o R^2 de 0,803 para 0,865 ($\Delta R^2 = 0,062$; $p < 0,001$). Isto é, o modelo baseado exclusivamente na escala populacional explica 80,3% da variação do logaritmo da potência instalada. A inclusão do IFDM eleva o poder explicativo para 86,5%, representando um incremento de 6,2 pontos percentuais no R^2 . No Modelo 3, o IFDM permanece positivo e estatisticamente significativo, após a inclusão do PIB per capita ($B = 2,386$; $p < 0,001$), enquanto o PIB acrescenta apenas 0,2 ponto percentual ao R^2 ($\Delta R^2 = 0,002$; $p = 0,021$).

Ou seja, a regressão linear múltipla hierárquica demonstra que a associação entre desenvolvimento municipal e potência instalada de MMGD permanece positiva e estatisticamente significativa mesmo após o controle simultâneo pelo tamanho populacional e pelo PIB per capita. Isso sugere que o desenvolvimento local, expresso pelo IFDM, possui uma contribuição incremental muito mais importante para a explicação da potência instalada do que a condição econômica do município, expressa pelo PIB per capita.

Uma vez verificada essa relação, buscou-se investigar qual dimensão do IFDM (Emprego e Renda; Saúde; Educação) apresenta associação mais forte com a potência instalada de MMGD. Para tanto, foram desagregadas as dimensões do IFDM e rodado novamente o modelo de regressão hierárquico. As dimensões do IFDM, Educação e Emprego e Renda apresentaram associações positivas e estatisticamente significativas com a potência instalada de MMGD, enquanto Saúde não apresentou associação estatisticamente significativa ao nível de 5%. Embora a dimensão Emprego e Renda tenha apresentado o maior coeficiente padronizado ($\beta = 0,143$), a contribuição única estimada

pela correlação semiparcial ao quadrado foi ligeiramente maior para Educação (aproximadamente 1,37% do R^2 , contra 1,02% para Emprego e Renda).

Logo, a difusão municipal da MMGD parece estar associada não apenas ao tamanho dos municípios, mas também a dimensões específicas do desenvolvimento socioeconômico — particularmente Educação e Emprego/Renda — enquanto a condição econômica isoladamente medida pelo PIB per capita acrescenta relativamente pouco ao poder explicativo do modelo. A luz da MLP esses dados revelam dois aspectos fundamentais: a importância de escalas menores para avaliar a difusão de novas tecnologias, tendo em vista a expressiva assimetria da variável potência instalada de MMGD; e o papel desempenhado por fatores socioeconômicos, expressos pelos indicadores de desenvolvimento municipal, em especial pelas dimensões de Educação e Emprego/Renda.

No caso do Emprego/Renda especula-se que níveis elevados de inserção da população no mercado de trabalho e apropriação da riqueza local, bem como de diversidade econômica - para além do PIB per capita - contribuam materialmente para a realização de investimentos iniciais, necessários para implementação da tecnologia. Uma vez que a instalação de painéis fotovoltaicos pode ser considerada um investimento de longo prazo, a dependência do aporte de recursos e a estabilidade financeira tornam-se questões relevantes.

A associação com a dimensão da Educação, por outro lado, é ainda mais interessante, pois sugere que a oferta e a qualidade da educação básica oferecida em escolas públicas e privadas dos municípios é relevante para a compreensão da difusão de tecnologias de baixo carbono, como MMGD. Nesse caso, a hipótese estaria ligada a um certo capital cultural, importante tanto para o caso de um pensamento matemático prospectivo, capaz de avaliar os custos e retornos no longo prazo, quanto em termos de acesso a informações sobre novas tecnologias e seus impactos sociais, econômicos e ambientais.

Com essas observações não se espera fornecer explicações causais para a adesão à geração distribuída. De forma diversa, buscou-se problematizar a associação exclusiva com a questão demográfica e econômica, a fim de possibilitar a investigação de outros fatores locais importantes para a difusão da MMGD. Entre esses fatores, identificou-se as dimensões de desenvolvimento municipal de Educação e Emprego/Renda como relevantes e estatisticamente significativos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao investigar a associação de fatores socioeconômicos à difusão e à consolidação da MMGD nos municípios gaúchos, a pesquisa buscou contribuir para a compreensão da transição do sistema

sociotécnico de energia elétrica. Para além da simples associação com a dimensão demográfica e econômica, o estudo buscou explorar outros fatores que poderiam estar relacionados com a MMGD. Para isso, foram empregadas análises de estatística descritiva e estimados modelos de regressão hierárquica linear.

Os resultados das análises realizadas demonstraram não apenas a relevância da escala local para compreender as diferenças regionais em termos de transição e trajetórias, mais avançadas ou atrasadas, mas revelaram também a importância incremental de fatores socioeconômicos para a difusão de MMGD nos municípios investigados.

Constatou-se, dessa forma, que a distribuição da potência instalada de MMGD entre os municípios gaúchos é fortemente associada à escala populacional, mas essa variável não esgota a explicação. A inclusão do IFDM produziu um incremento expressivo no poder explicativo do modelo, enquanto o PIB per capita acrescentou apenas uma parcela marginal da variância explicada. Além disso, o coeficiente do IFDM permaneceu positivo e altamente significativo após a introdução do PIB per capita, sugerindo que sua associação com a difusão da MMGD não se reduz simplesmente à condição econômica medida pelo produto municipal por habitante.

Para além disso, a desagregação do IFDM em suas dimensões apontou um caminho inicial para as investigações futuras. Com base nesses resultados sabe-se que as dimensões Educação e Emprego/Renda do desenvolvimento municipal são associadas à difusão de MMGD, expressa na potência instalada. Porém, trata-se de uma conclusão parcial, baseada em indicadores sintéticos de desenvolvimento, caberiam investigações complementares, voltadas para escala municipal, e casos específicos, a fim de buscar qualificar esses resultados e compreender melhor a relação com esses fatores.

REFERÊNCIAS

BERGEK, Anna, Jacobsson, Staffan, Carlsson, Bo, Lindmark, Sven, Rickne, Annika. Analyzing the functional dynamics of technological innovation systems. A scheme of analysis. *Research Policy* 37 (3), 407–429, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2007.12.003>.

COENEN, Lars; BENNEWORTH, Paul; TRUFFER, Bernhard. Toward a spatial perspective on sustainability transitions. *Research Policy*, v. 41, n. 6, p. 968-979, 2012. DOI: 10.1016/j.respol.2012.02.014.

DELCAIRE, Hugo; BOURDIN, Sébastien. In search of “fertile ground”: how territorial characteristics influence the social acceptability of renewable energy projects. *Environmental Management*, v. 75, p. 867–882, 2025. DOI: 10.1007/s00267-025-02113-5.

FAGERBERG, Jan. Missão (im)possível? O papel da inovação (e das políticas de inovação) no suporte a mudanças estruturais e transições sustentáveis. *Em Tese*, Florianópolis, 19 (02), 108-155, 2022. <https://doi.org/10.5007/1806-5023.2022.e90067>.

FLIGSTEIN, Neil. Political Economy and Climate Change. *Regulation & Governance*, v.19, p.511–514, 2025.

GEELS, Frank W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes. A multi-level perspective and a case-study. *Research Policy* 31 (8-9), 1257–1274, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8).

GEELS, Frank. W. Socio-technical transitions to sustainability: a review of criticisms and elaborations of the Multi-Level Perspective. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Open Issue 2019. v. 39, p. 187–201, 2019.

GEELS, Frank W. Escaping and creating lock-ins in accelerating low-carbon transitions: conceptual reflections and empirical insights from electricity and auto-mobility transitions in Europe, the USA and China. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, v. 19, n. 1, p. 1-23, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/cjres/rsaf011>.

GEELS F.W.; RAVEN R.P.J.M. Non-linearity and expectations in niche-development trajectories: ups and downs in Dutch biogas development (1973-2003). *Technol Anal Strateg*, 18:375-392, 2006.

KÖHLER, J. et al. An agenda for sustainability transitions research: state of the art and future directions. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, Amsterdam, v. 31, p. 1-32, 2019.

LOORBACH, Derk. Transition Management for Sustainable Development. A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework. *Governance* 23 (1), 161–183, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0491.2009.01471.x>.

PINCH, Trevor; SWEDBERG, Richard. Introduction. In: PINCH, Trevor; SWEDBERG, Richard (Eds.). *Living in a Material World: Economic Sociology Meets Science and Technology Studies*. Cambridge: The MIT Press, 2008. p.1-28.

RIP, A., KEMP, R., Technological change. In: Rayner, S., Malone, E.L. (Eds.), *Human Choice and Climate Change* 2. Battelle Press, Columbus, Ohio, pp. 327–399, 1998.

ROGERS, E. *Diffusion of Innovations*. New York: The Free Press, 1995.

SMITH A, STIRLING A, BERKHOUT F. The governance of sustainable socio-technical transitions. *Research Policy*, 34:1491-1510, 2005.

DECLARAÇÃO DE DISPONIBILIDADE DE DADOS DA PESQUISA

O conjunto de dados de apoio aos resultados deste estudo não está disponível ao público.

FINANCIAMENTO:

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), por meio do Edital 8/2023 AUXÍLIO RECÉM-DOCTOR ou RECÉM-CONTRATADO – ARD/ARC, protocolo nº 80254.810.25262.08032024.

CONTRIBUIÇÃO DAS/DOS AUTORES/AS:

Rodrigo Foresta Wolffenbüttel: Conceptualization, Methodology, Investigation, Data Curation, Formal Analysis, Writing – Original Draft. / Sandro Ruduit garcia: Writing – Review & Editing, Supervision. /Victor dos Reis Wolffenbüttel – Review & Editing.

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSE: As/os autoras/es declaram que não há conflito de interesses a mencionar.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: A ferramenta de inteligência artificial ChatGPT foi utilizada para sugerir novos testes e rodar comandos no software de análise de dados estatísticos SPSS.

MINIBIOGRAFIAS DOS/DAS AUTORAS DO PAPER

Rodrigo Foresta Wolffenbüttel é Pesquisador Visitante Convidado do DPCT-Unicamp; Professor Conveniado na UAB/UFRGS e Pesquisador do Grupo de Estudos da Inovação (GEI-CNPq).

Sandro Ruduit Garcia é Doutor em Sociologia pela UFRGS, Professor Permanente no PPG Sociologia da UFRGS, Coordenador do Grupo de Estudos da Inovação (GEI-CNPq) e Pesquisador do CNPq – Nível C

Victor dos Reis Wolffenbüttel é bacharel em Administração pela Universidade do Vale dos Sinos e mestre em Geografia pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Este preprint foi submetido sob as seguintes condições:

- Os autores declaram que os necessários Termos de Consentimento Livre e Esclarecido de participantes ou pacientes na pesquisa foram obtidos e estão descritos no manuscrito, quando aplicável.
- Os autores declaram que a elaboração do manuscrito seguiu as normas éticas de comunicação científica.
- Os autores declaram que estão cientes que são os únicos responsáveis pelo conteúdo do preprint e que o depósito no SciELO Preprints não significa nenhum compromisso de parte do SciELO, exceto sua preservação e disseminação.
- Os autores declaram que os dados, aplicativos e outros conteúdos subjacentes ao manuscrito estão referenciados.
- O manuscrito depositado está no formato PDF.
- Os autores declaram que a pesquisa que deu origem ao manuscrito seguiu as boas práticas éticas e que as necessárias aprovações de comitês de ética de pesquisa, quando aplicável, estão descritas no manuscrito.
- Os autores declaram que uma vez que um manuscrito é postado no servidor SciELO Preprints, o mesmo só poderá ser retirado mediante pedido à Secretaria Editorial do SciELO Preprints, que afixará um aviso de retratação no seu lugar.
- Os autores concordam que o manuscrito aprovado será disponibilizado sob licença [Creative Commons CC-BY](#).
- O autor submissor declara que as contribuições de todos os autores e declaração de conflito de interesses estão incluídas de maneira explícita e em seções específicas do manuscrito.
- Os autores declaram que o manuscrito não foi depositado e/ou disponibilizado previamente em outro servidor de preprints ou publicado em um periódico.
- Caso o manuscrito esteja em processo de avaliação ou sendo preparado para publicação mas ainda não publicado por um periódico, os autores declaram que receberam autorização do periódico para realizar este depósito.
- O autor submissor declara que todos os autores do manuscrito concordam com a submissão ao SciELO Preprints.