

Impacto das Variáveis Climáticas na Geração de Energia por Micro e Minigeração Distribuída

Gustavo Basílio Lima
ENACOM

Belo Horizonte, Brasil
gustavo.basilio@enacom.com.br

Lais Claudine Schiavo Gomes
ENACOM

Belo Horizonte, Brasil
lais.schiavo@enacom.com.br

Fernanda Nogueira de Assis
CEMIG

Belo Horizonte, Brasil
fernanda.nassis@cemig.com.br

Endi Daniel Coelho Silva
ENACOM

Belo Horizonte, Brasil
endi.silva@enacom.com.br

Douglas Alexandre Gomes Vieira
ENACOM

Belo Horizonte, Brasil
douglas.vieira@enacom.com.br

Fellipe Fernandes Goulart Santos
CEMIG

Belo Horizonte, Brasil
fellipe.santos@cemig.com.br

Gustavo Rodrigues Lacerda Silva
ENACOM

Belo Horizonte, Brasil
gustavo.lacerda@enacom.com.br

Daniilo de Deus Mota
CEMIG

Belo Horizonte, Brasil
daniilo.mota@cemig.com.br

Resumo—Este estudo investiga a relação entre variáveis climáticas e a geração de energia em sistemas de micro e minigeração distribuída (MMGD), na área de concessão da CEMIG D. O objetivo é avaliar a correlação entre variáveis climáticas e o desempenho das unidades de MMGD, considerando a dependência de fatores como radiação solar, temperatura e precipitação. A análise foi conduzida por meio do coeficiente de correlação de Pearson e modelos de regressão linear simples, com segmentação entre microgeração e minigeração. Os resultados dos modelos explicativos evidenciam que a radiação solar e a temperatura apresentam impacto positivo na energia injetada, enquanto a precipitação mostra efeito negativo, provavelmente por reduzir a incidência solar em dias chuvosos. Modelos baseados em precipitação e radiação obtiveram os maiores coeficientes de determinação (R^2 ajustado $> 0,38$), indicando um poder explicativo relevante. A minigeração se mostrou mais eficiente que a microgeração, sugerindo maior resiliência frente às variabilidades climáticas. Os resultados encontrados reforçam a importância de incorporar variáveis climáticas em modelos preditivos e no planejamento da expansão da MMGD, especialmente frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave—Análise de dados, Correlação, MMGD, Modelos explicativos, Pearson.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, devido à crise do petróleo que ocorreu na segunda metade da década de XX, os debates acerca da transição energética vêm crescendo, com o foco na diversificação das fontes de energia, substituindo combustíveis fósseis, como carvão e petróleo, por opções renováveis de menor impacto ambiental. No Brasil, uma modalidade de geração chama a atenção por corroborar na descarbonização da matriz elétrica, sendo de fontes majoritariamente renováveis, a micro e minigeração distribuída (MMGD), que tem apresentado aumento da potência instalada ao longo dos anos [1].

Nesse contexto, compreender as correlações entre variáveis climáticas e a geração de energia em sistemas de MMGD é fundamental para otimizar o desempenho dessas tecnologias, considerando sua alta dependência de condições climáticas específicas, como radiação solar, temperatura e precipitação [2].

A análise da correlação entre variáveis climáticas e o desempenho de sistemas de geração de energia é essencial para o planejamento e a otimização da geração renovável, especialmente no contexto de MMGD. A correlação é uma ferramenta estatística fundamental para identificar associações entre variáveis, permitindo compreender como mudanças nas condições climáticas afetam o perfil de geração energética. Estudos prévios destacam a importância dessa análise para prever impactos climáticos na eficiência dos sistemas [3].

As condições climáticas, como radiação solar, temperatura e precipitação, influenciam diretamente a geração em sistemas MMGD [4]. Para avaliar essa relação, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson. Resultados preliminares demonstram que a radiação solar e a temperatura têm forte correlação positiva com a geração, enquanto a precipitação apresenta impacto geralmente negativo.

Diferenças significativas foram observadas entre microgeração e minigeração, sendo a última com fator de geração maior, o que pode ser explicado pelas características das instalações, já que, de acordo com [5], sistemas mais robustos são mais resilientes às mudanças climáticas. Já [6] mostra que uma prática utilizada é o sobredimensionamento dos painéis, para assim manter uma produção de eletricidade mais estável.

Portanto, o desempenho da MMGD pode ser aprimorado através de análises detalhadas das variáveis climáticas, promovendo maior eficiência e resiliência dos sistemas

renováveis. Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a correlação entre variáveis climáticas e o desempenho de unidades de MMGD na área de concessão da CEMIG D, para melhorar a confiabilidade e a previsibilidade na geração de energia distribuída, especialmente em cenários de mudança climática.

II. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho envolve uma abordagem estruturada, conforme ilustrado no fluxograma da Fig. 1, para o processamento e análise de dados climáticos e de geração de energia, utilizando a linguagem de programação Python, que se destaca por ser de alto nível e de código aberto [7]. Inicialmente, os dados são coletados, seguidos pelo tratamento e processamento necessários para garantir a sua integridade e qualidade. Posteriormente, são realizadas análises de correlação estatística e modelos explicativos, permitindo identificar relações relevantes entre variáveis climáticas e de geração de energia. Essas etapas foram possíveis devido ao auxílio da biblioteca Pandas [8].

Por fim, os resultados são organizados e apresentados por meio de visualizações gráficas interativas, facilitando a interpretação, com o uso da biblioteca Plotly [9]. A análise também considera segmentações por diferentes tipos de geração de energia, ampliando a compreensão dos padrões subjacentes aos dados.

A. Coleta e Preparação dos Dados

Os dados utilizados neste trabalho incluem medições mensais de geração por MMGD, podendo avaliar a geração por MiniGD – instalações com potência maior que 75 kWp e menor que 3 MWp – disponibilizados para a área de concessão da CEMIG D. Caso as instalações tenham potência inferior a 75 kWp, a instalação é enquadrada como MicroGD. Além da utilização de dados climáticos relevantes, como radiação solar, temperatura e precipitação, obtidas de bases confiáveis, como o repositório ERA5 do Climate Data Store [10]. Os dados de geração foram ajustados para eliminar a tendência de crescimento da potência instalada por meio do cálculo do fator de geração, que considera a energia injetada, a potência instalada e o número total de horas mensais.

Os dados de geração por MMGD analisados neste estudo abrangem o período de janeiro de 2020 a agosto de 2024, com frequência mensal. Cabe destacar que, devido à natureza dos registros, o mês de geração informado nem sempre corresponde ao mês cronológico.

Os dados climáticos com frequência mensal foram processados utilizando dois métodos principais: (i) cálculo da média móvel, incorporando os valores do mês atual e do anterior, e (ii) deslocamento temporal das variáveis climáticas, ajustando-as para corrigir atrasos nas medições e melhorar a consistência da análise, conforme ilustrado na Fig. 2.

B. Análise de correlação

A relação entre as variáveis climáticas e o desempenho dos sistemas de MMGD foi investigada por meio do coeficiente

de correlação de Pearson, método estatístico amplamente utilizado para medir a força e a direção de associações lineares entre variáveis.

Foram consideradas duas variáveis dependentes principais: a energia injetada e o fator de geração. A energia injetada reflete diretamente a produção dos sistemas, enquanto o fator de geração, calculado como a razão entre a energia injetada, a potência instalada e o número de horas do dia, permite uma análise normalizada ao longo do tempo. Essa segmentação tem por objetivo isolar o efeito da expansão do número de unidades consumidoras com geração própria, fator esse que pode mascarar tendências relacionadas às condições climáticas.

Para cada uma dessas variáveis, as correlações foram avaliadas considerando três formas distintas de tratamento das séries climáticas, conforme citadas anteriormente.

C. Modelos explicativos

Para avaliar o impacto das variáveis climáticas sobre a energia injetada por MMGD na rede, foi adotada uma metodologia em duas etapas: (i) decomposição de cada série temporal em componentes de tendência, sazonalidade e resíduo; e (ii) análise de regressão entre os resíduos da energia injetada e os resíduos das variáveis climáticas (temperatura, radiação e precipitação).

Para cada série temporal foi aplicado o método STL (Seasonal and Trend decomposition using Loess) [11], que permite separar as séries nas seguintes componentes:

- Tendência (T): componente de longo prazo, capturando o comportamento geral da série;
- Sazonalidade (S): flutuações periódicas;
- Resíduo (R): variação remanescente, interpretada como “anomalias” ou eventos pontuais não explicados pelos padrões anteriores.

Matematicamente, para uma série temporal Y no momento t denominada Y_t assume-se a equação exposta em (1).

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \quad (1)$$

Para avaliar o efeito de cada variável climática isoladamente sobre as anomalias da energia injetada ($R_t^{(E)}$), treinamos um modelo de regressão linear por Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) para cada série de resíduos climáticos. Ou seja, estimaram-se três modelos distintos, um para cada variável climática: resíduo da temperatura ($R_t^{(T)}$, em (3.1)), radiação ($R_t^{(R)}$, em (3.2)) e precipitação ($R_t^{(P)}$, em (3.3)).

$$R_t^{(E)} = \beta_0^{(T)} + \beta_1^{(T)} R_t^{(T)} + \varepsilon_t^{(T)} \quad (3.1)$$

$$R_t^{(E)} = \beta_0^{(R)} + \beta_1^{(R)} R_t^{(R)} + \varepsilon_t^{(R)} \quad (3.2)$$

$$R_t^{(E)} = \beta_0^{(P)} + \beta_1^{(P)} R_t^{(P)} + \varepsilon_t^{(P)} \quad (3.3)$$

Em cada modelo de regressão, usamos três componentes principais, onde:

- $\beta_0^{(X)}$ é um valor constante associado à variável X ;

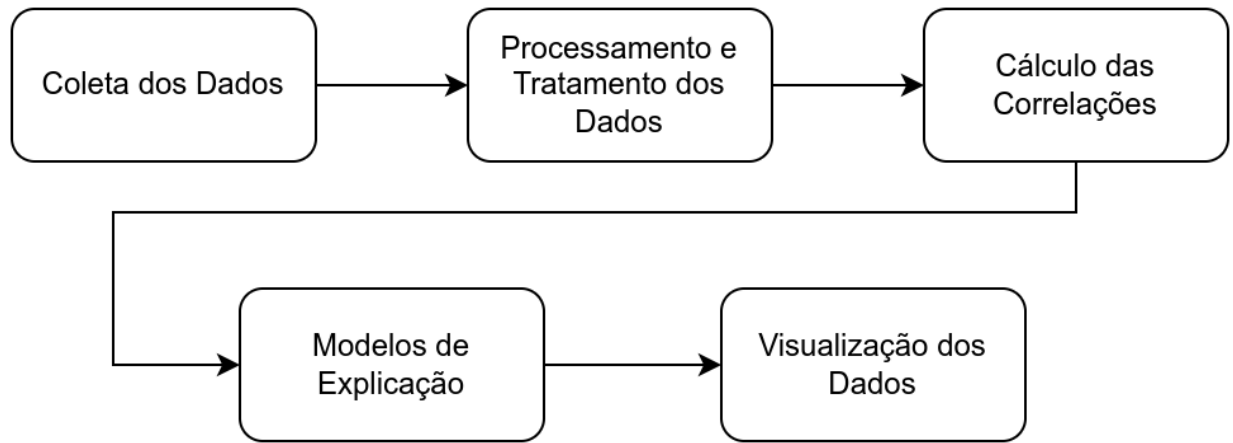


Fig. 1. Fluxograma da metodologia abordada nesse estudo.

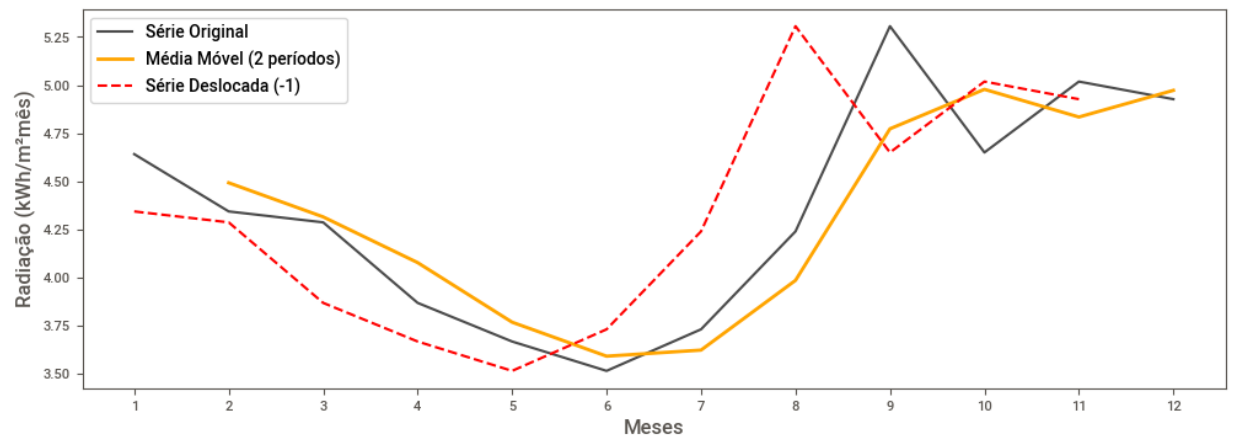


Fig. 2. Comparação entre a série original da radiação, média móvel e deslocamento.

- $\beta_1^{(X)}$ quantifica quanto as anomalias da variável X afetam as anomalias da energia injetada;
- $\varepsilon_t^{(X)}$ é o termo de erro, que representa as variações não explicadas pelo modelo.

Após o treinamento dos modelos, o objetivo é avaliar os coeficientes que medem o impacto das anomalias climáticas sobre a energia injetada por MMGD, verificando se esses coeficientes são estatisticamente significativos.

III. RESULTADOS

A. MMGD

Como pode ser visto na Tabela I, os valores dos índices de Pearson são maiores para o fator de geração do que para a energia injetada, demonstrando a importância da retirada do efeito de crescimento da potência instalada para a análise.

A correlação das variáveis se difere quando utilizadas metodologias diferentes, com exceção da precipitação, cujos valores são bem similares.

As variáveis como média móvel da radiação e média móvel da temperatura mostram uma alta correlação positiva com o fator de geração (0,62 e 0,49, respectivamente), sugerindo que

TABELA I
CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS COM O FATOR DE GERAÇÃO E ENERGIA INJETADA PARA MMGD.

Variável Climática	Fator de Geração	Energia Injetada
Temperatura	0,45	0,30
Temperatura (Média Móvel)	0,49	0,35
Temperatura (Deslocada)	0,08	0,24
Precipitação	0,35	-0,09
Precipitação (Média Móvel)	0,37	-0,09
Precipitação (Deslocada)	0,38	-0,05
Radiação	0,50	-0,01
Radiação (Média Móvel)	0,62	0,09
Radiação (Deslocada)	0,26	-0,01

variações na radiação solar e na média móvel de temperatura estão fortemente associadas ao aumento na capacidade de geração. Esse padrão indica que condições de maior radiação e temperaturas médias mais elevadas tendem a potencializar o fator de geração.

A fim de expressar visualmente essas correlações, foram ilustradas as séries temporais das médias móveis das variáveis climáticas (temperatura, radiação e precipitação) e fator de

geração. Na Fig. 3 é apresentada a relação entre o fator de geração de energia e a média móvel da temperatura ao longo do tempo, destacando que, para cada grau de temperatura, o fator de geração é afetado em 0,8 pontos percentuais.

A Fig. 4 ilustra a comparação entre o fator de geração e a média móvel da radiação solar, onde se observa que os picos de radiação tendem a acompanhar o aumento no fator de geração, sugerindo uma relação direta entre essas variáveis. Salienta-se que para cada kWh/m²mês, o fator de geração é afetado em 2,21 pontos percentuais.

Já a Fig. 5 mostra a relação entre o fator de geração e a média móvel da precipitação acumulada, em que períodos de alta precipitação acumulada não apresentam correlação direta evidente com o fator de geração, indicando uma possível menor influência dessa variável. Ressalta-se que, para cada mm, o fator de geração é afetado em 0,01 pontos percentuais.

B. Microgeração

Conforme ilustrado na Tabela II, os valores da correlação, quando considerados apenas as instalações de microgeração, atingem patamares maiores do que toda a modalidade MMGD, com a média móvel da radiação (0,72), a média móvel da temperatura (0,63) e a média móvel da precipitação (0,47).

TABELA II

CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS COM O FATOR DE GERAÇÃO E ENERGIA INJETADA PARA MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA.

Variável Climática	Fator de Geração	Energia Injetada
Temperatura	0,57	0,31
Temperatura (Média Móvel)	0,63	0,35
Temperatura (Deslocada)	0,16	0,29
Precipitação	0,42	-0,08
Precipitação (Média Móvel)	0,47	-0,08
Precipitação (Deslocada)	0,41	-0,05
Radiação	0,53	0,02
Radiação (Média Móvel)	0,72	0,12
Radiação (Deslocada)	0,21	-0,01

C. Minigeração

Já para a minigeração, como é mostrado na Tabela III, a correlação com as variáveis referentes à temperatura apresenta maiores valores para a energia injetada ao invés do fator de geração. Ademais, quando comparados com os dados de microgeração, as correlações possuem patamares bem menores, com a média móvel da radiação atingindo 0,39. Outro ponto a ser considerado é que, de maneira similar à MMGD como um todo, a precipitação possui maior correlação ao invés da média móvel.

D. Relação entre Mini e Micro

A partir da Fig. 6, é possível observar uma diferença significativa no fator de geração entre mini e microgeração distribuída ao longo do período analisado. O fator de geração das instalações de minigeração tende a ser consistentemente superior ao das instalações de microgeração, o que pode estar associado à maior capacidade instalada e eficiência operacional dessas unidades.

TABELA III

CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS COM O FATOR DE GERAÇÃO E ENERGIA INJETADA PARA MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA.

Variável Climática	Fator de Geração	Energia Injetada
Temperatura	0,33	0,26
Temperatura (Média Móvel)	0,39	0,32
Temperatura (Deslocada)	0,04	0,17
Precipitação	0,21	-0,10
Precipitação (Média Móvel)	0,23	-0,09
Precipitação (Deslocada)	0,23	-0,07
Radiação	0,29	-0,06
Radiação (Média Móvel)	0,39	0,04
Radiação (Deslocada)	0,14	-0,08

E. Modelos explicativos

A seguir serão apresentados os resultados da aplicação dos modelos explicativos que relacionam as variáveis climáticas com a energia injetada por MMGD.

A Tabela IV apresenta os resultados das regressões lineares realizadas entre as variáveis climáticas e a energia injetada. Observa-se que a temperatura apresenta um coeficiente positivo de 11,24, com R^2 ajustado de 0,417 e p -valor $< 0,001$, indicando que o aumento de 1 °C na temperatura está associado a um crescimento médio de 11,24 GWh na energia injetada. A radiação solar também se mostra positivamente correlacionada, com um coeficiente de 29,63, R^2 ajustado de 0,386 e p -valor $< 0,001$, indicando um crescimento de 29 GWh em média para um aumento de cada kWh/m²mês de radiação. No entanto, a precipitação tem efeito contrário, com coeficiente de -0,23, R^2 ajustado de 0,339 e p -valor $< 0,001$, sugerindo que o aumento de 1 mm de chuva resulta em uma redução média de 0,23 GWh, possivelmente pela diminuição da geração solar em dias chuvosos.

TABELA IV

PARÂMETROS DA REGRESSÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E A ENERGIA INJETADA POR MMGD

Variável Independente	Coefficiente	R^2 Ajustado	P-valor
Temperatura	11,24	0,417	0,000
Radiação	29,63	0,386	0,000
Precipitação	-0,23	0,339	0,000

F. Modelos explicativos Micro e Minigeração distribuída

A seguir, serão ressaltados os resultados da aplicação dos modelos explicativos que relacionam as variáveis climáticas com a energia injetada por micro e minigeração distribuída.

A Tabela V apresenta os resultados das regressões lineares entre as variáveis climáticas e a energia injetada por minigeração distribuída. A temperatura apresentou um coeficiente positivo de 2,25, com R^2 ajustado de 0,049 e p -valor de 0,063, indicando uma tendência de aumento da energia injetada com o aumento da temperatura, embora com significância estatística marginal. A radiação solar demonstrou maior impacto, com coeficiente de 8,36, R^2 ajustado de 0,108 e p -valor significativo de 0,010. Por outro lado, a precipitação apresentou relação negativa com a energia injetada, com



Fig. 3. Fator de geração versus a média móvel da temperatura.

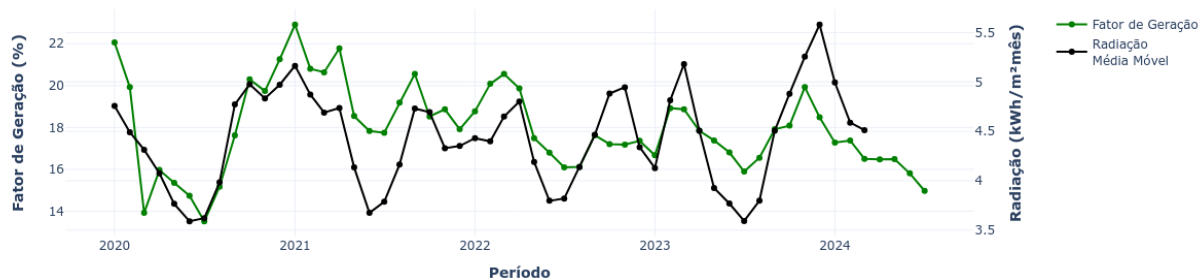


Fig. 4. Fator de geração versus a média móvel da radiação.

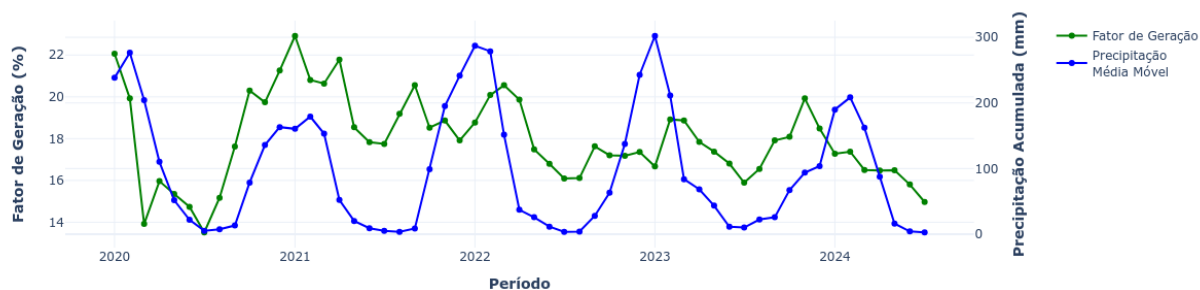


Fig. 5. Fator de geração versus a média móvel da precipitação.

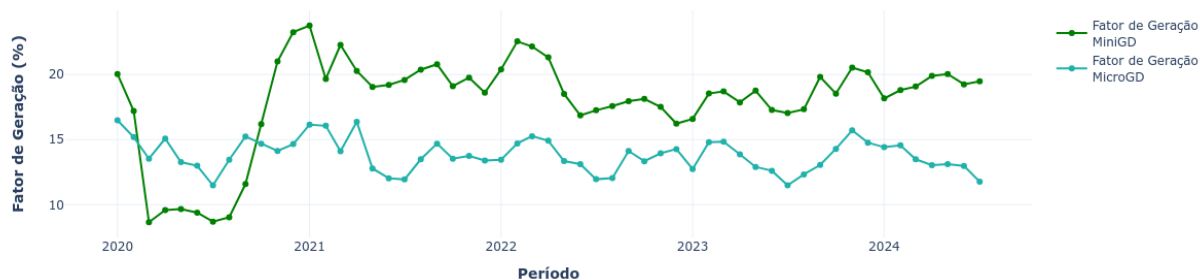


Fig. 6. Relação entre o fator de geração da mini e micro GD.

coeficiente de $-0,06$, R^2 ajustado de $0,069$ e p -valor de $0,033$, sugerindo que o aumento da chuva reduz a energia injetada, possivelmente devido à menor incidência solar em dias chuvosos. Em conjunto, os resultados evidenciam que, embora os modelos apresentem baixo poder explicativo isoladamente, há indícios de influência das variáveis climáticas sobre a energia injetada por minigeração distribuída.

TABELA V
PARÂMETROS DA REGRESSÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E A ENERGIA INJETADA POR MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Variável independente	Coefficiente	R ² Ajustado	P-valor
Temperatura	2,25	0,049	0,063
Radiação	8,36	0,108	0,010
Precipitação	-0,06	0,069	0,033

A Tabela VI apresenta os resultados de três modelos de regressão linear simples. O modelo que utiliza a precipitação como preditora apresenta o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,395$), indicando que aproximadamente 39,5% da variabilidade da energia injetada é explicada por essa variável. Além disso, o coeficiente negativo ($-0,147$) está de acordo com a expectativa de que o aumento da chuva reduz a geração de energia, provavelmente por interferir na incidência solar.

O modelo baseado na radiação obteve $R^2 = 0,384$, com um coeficiente positivo ($17,74$), indicando que essa variável possui impacto direto na energia injetada. Já o modelo com temperatura apresentou um R^2 mais baixo ($0,327$), embora ainda estatisticamente significativo. Esses resultados sugerem que as variáveis climáticas, especialmente precipitação e radiação, possuem poder explicativo relevante na previsão da energia injetada.

TABELA VI
PARÂMETROS DA REGRESSÃO ENTRE AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E A ENERGIA INJETADA POR MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Variável independente	Coefficiente	R ² Ajustado	P-valor
Temperatura	5,99	0,327	0,000
Radiação	17,74	0,384	0,000
Precipitação	-0,147	0,395	0,000

IV. CONCLUSÃO

É notório que a correlação entre as variáveis climáticas sofre alterações a depender da potência instalada. Por exemplo, a média móvel da radiação tem o valor de $0,62$ para a MMGD como todo, $0,72$ para a microgeração e $0,39$ para minigeração.

Há alguns fatores que resultam nesse fenômeno: em instalações mais robustas, existem equipamentos que asseguram uma melhor geração, como rastreadores solares, painéis com células bifaciais e inversores mais robustos. Isso ajuda a manter a estabilidade mesmo durante mudanças bruscas nas condições climáticas. Esse recurso é menos disponível em sistemas menores, o que reduz sua capacidade de resposta e resiliência diante de tais variações [5].

A realização de estudos de viabilidade mais detalhados, aliada ao sobredimensionamento de painéis fotovoltaicos,

apresenta-se como uma estratégia relevante para a otimização de sistemas de geração de energia. Inversores de grande capacidade, projetados para acomodar uma maior quantidade de módulos fotovoltaicos, demonstram um impacto significativo na eficiência operacional do sistema, garantindo uma produção energética mais consistente e confiável [6]. Essa configuração é particularmente vantajosa em sistemas de minigeração, onde o fator de geração é frequentemente superior ao observado em sistemas de microgeração.

A análise por modelo explicativo realizada destacou a relação significativa entre variáveis climáticas e a energia injetada por sistemas de MMGD, evidenciada pelos modelos de regressão ajustados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários. Os coeficientes obtidos demonstraram a influência direta de variáveis como temperatura e radiação, com impactos positivos na geração de energia, enquanto a precipitação apresentou uma relação inversa.

De modo geral, os modelos de regressão linear simples indicaram que a temperatura e a radiação são os melhores preditores da energia injetada, com R^2 ajustado superiores a $0,38$ na geração por MMGD total. Apesar do poder explicativo moderado dos modelos, os resultados encontrados confirmam a existência de uma relação estatisticamente significativa entre clima e desempenho dos sistemas de MMGD, o que evidencia a importância de considerar essas variáveis em modelos preditivos e no planejamento energético distribuído.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à ENACOM e a CEMIG, pela parceria firmada por meio do projeto P&D PD-PD-04951-GT0669.

REFERÊNCIAS

- [1] EPE, "Balanço energético nacional: Relatório síntese 2024," <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>, 2024, accessed: 2024-11-22.
- [2] Y. Yang, S. Xia, P. Huang, and J. Qian, "Energy transition: Connotations, mechanisms and effects," *Energy Strategy Reviews*, vol. 52, p. 101320, 2024.
- [3] R. H. A. Shiekh and E. F. El-Hashash, "A comparison of the pearson, spearman rank and kendall tau correlation coefficients using quantitative variables," *Asian Journal of Probability and Statistics*, pp. 36–48, 2022.
- [4] C. L. d. A. Dias, D. A. C. Branco, M. C. Arouca, and L. F. L. Legey, "Performance estimation of photovoltaic technologies in brazil," *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 367–375, 2017.
- [5] L. Xu, K. Feng, N. Lin, A. T. D. Perera, H. V. Poor, L. Xie, C. Ji, X. A. Sun, Q. Guo, and M. O'Malley, "Resilience of renewable power systems under climate risks," *Nature Reviews Electrical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, 2024.
- [6] A. Sangwongwanich, Y. Yang, D. Sera, F. Blaabjerg, and D. Zhou, "On the impacts of pv array sizing on the inverter reliability and lifetime," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, pp. 3656–3667, 2018.
- [7] PYTHON, "Python software foundation," <https://www.python.org/>, 2024, accessed: 2024-11-27.
- [8] PANDAS, "Pandas documentation," <https://pandas.pydata.org/>, 2024, accessed: 2024-11-27.
- [9] PLOTLY, "Plotly documentation," <https://plotly.com/>, 2024, accessed: 2024-11-27.
- [10] C3S, "Reanalysis era5: Single levels," <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>, 2024, accessed: 2024-11-26.

- [11] R. B. Cleveland, W. S. Cleveland, J. E. McRae, and I. Terpenning, "Stl: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess," *Journal of Official Statistics*, vol. 6, no. 1, pp. 3–73, 1990.