

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

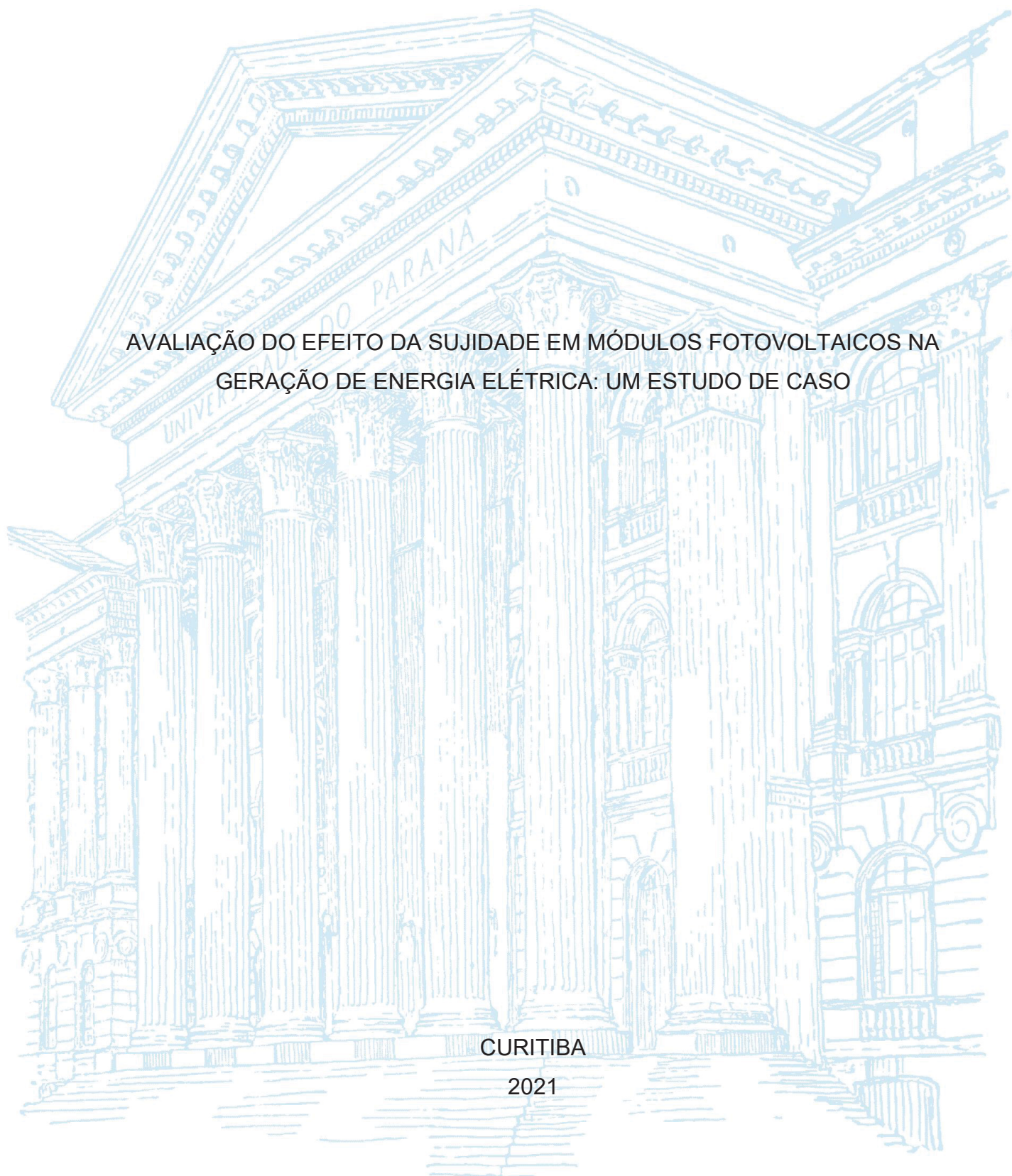
CAROLINA MOCELIN GOMES PIRES

JULIO CEZAR ALVES JUNIOR

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO

CURITIBA

2021



CAROLINA MOCLEIN GOMES PIRES
JULIO CEZAR ALVES JUNIOR

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA SUJIDADE EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS NA
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO DE CASO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Especialização em Energias Renováveis e Eficiência Energética, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis e Eficiência Energética

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Christian Scapulatempo Strobel, pelo apoio e disponibilidade durante a execução de todo o curso.

Ao curso de Especialização em Energias Renováveis e Eficiência Energética da Universidade Federal do Paraná, pelo aprendizado em uma nova área do conhecimento.

Aos nossos familiares e amigos, pelo apoio e compreensão durante o curso.

"I want to break free"

John Deacon, 1983.

RESUMO

O uso de painéis solares para geração de energia elétrica é crescente. Esses coletores apresentam características peculiares para geração de energia, tais como: a redução do impacto ambiental e a geração de energia de forma limpa e renovável. Contudo, a eficiência dos módulos solares ainda apresenta baixos valores. Além disso, podem apresentar perdas de eficiência na ordem de 20%. Um parâmetro que influencia na redução da eficiência energética é a sujidade dos painéis, pois aumentam a opacidade dos módulos solares, reduzindo a absorção da radiação solar. Diante dessa problemática, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito da sujidade dos coletores solares em função da geração de energia elétrica. Para isso, foi realizada uma análise estatística para averiguar a correlação entre as variáveis geração de energia elétrica e a radiação solar emitida. Os resultados indicaram que a correlação entre essas variáveis reduziu 12,2% no período de estiagem e ausência de limpeza, além de mostrar uma tendência de redução crescente da geração de energia elétrica. Assim, foi observado que a limpeza dos módulos solares de forma periódica contribui para o aumento da eficiência da geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Painéis solares. Radiação solar. Energia limpa. Eficiência energética.

ABSTRACT

The use of solar panels to generate electricity is growing. These collectors have peculiar characteristics for energy generation, such as: reducing the environmental impact and generating energy in a clean and renewable way. However, the efficiency of solar modules is low. Furthermore, they can present efficiency losses in the order of 20%. One parameter that influences the reduction of energy efficiency is the dirt on the panels, as they increase the opacity of the solar modules, reducing the absorption of solar radiation. In light of this problem, the aim of this paper was to evaluate the effect of dirt on solar collectors as a function of electricity generation. To that end, a statistical analysis was conducted to verify the correlation between the variables of electric energy generation and the emitted solar radiation. The results indicated that the correlation between these variables decreased 12.2% in the drought period and absence of cleaning, in addition to showing an increasing trend reduction in electricity generation. Thus, it was observed that periodic cleaning of solar modules contributes to the increase of the efficiency of electricity generation.

Keywords: Solar panels. Solar radiation. Clean energy. Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geração de energia elétrica em função radiação solar emitida20

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores mensais de geração de energia e de precipitação de chuvas....	18
Tabela 2 – Coeficientes de determinação e de correlação de Pearson	21

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 MATERIAL E MÉTODOS	18
2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA	18
2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRELAÇÃO	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4 CONCLUSÃO	22
REFERÊNCIAS	23

1 INTRODUÇÃO

O sol é a principal fonte de fornecimento de energia ao nosso planeta. Essa energia contribui para a ocorrência da vida na Terra e para os processos climáticos naturais. Por outro lado, o sol também pode atuar como fonte geradora para realização de atividades não naturais, tais como a geração de energia elétrica (MOREIRA, 2017; BARBOSA et al. 2018).

Os módulos fotovoltaicos operam por meio da conversão da energia solar que incide na superfície dos painéis solares em energia elétrica. Assim, por meio do efeito fotovoltaico, tem-se a geração de corrente contínua a partir da radiação solar. Com o avanço da tecnologia e a redução dos preços, os sistemas de geração de energia solar fotovoltaicos vêm crescendo e se tornando mais acessível nos últimos anos (MOREIRA, 2017).

A eficiência na conversão da radiação solar em energia elétrica varia de acordo com as características dos materiais que compõem os módulos fotovoltaicos. Há disponíveis inúmeros modelos de painéis solares comerciais, os quais possuem eficiência de 12% a 24,7% (VILLALVA, 2015). Contudo, fatores externos também podem contribuir com a redução da eficiência dos módulos fotovoltaicos, tais como o ângulo de inclinação do sistema, o efeito das sombras, a temperatura, e a sujidade dos painéis (ARAUJO et al, 2019).

Visto que a sujidade aderida aos coletores solares interfere na eficiência de conversão, para o reduzir o acúmulo de sujeira nos módulos é recomendado seguir as orientações dos fabricantes para realização da limpeza periódica. Por conseguinte, a ocorrência de chuvas frequentes também auxilia na limpeza dos módulos, desfavorecendo a redução da eficiência da geração de energia elétrica (MOREIRA, 2017).

Neste trabalho, foi realizado um estudo de caso para analisar o efeito da sujidade na geração de energia elétrica em um sistema fotovoltaico localizado em uma instituição de ensino instalado na cidade de Curitiba-PR. A operação do sistema de geração teve início em janeiro de 2020 e, devido às circunstâncias impostas pela pandemia de COVID-19, os módulos não foram submetidos às manutenções e limpezas recomendadas. Adicionalmente, o ano de 2020 foi marcado por longos períodos de estiagem na região de Curitiba, resultando em um acúmulo de sujeira nos módulos solares. Assim, diante dessa problemática, foi realizada uma análise

univariada para averiguação do efeito da sujidade na correlação entre as variáveis de radiação solar e da geração de energia elétrica.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho foi realizado um estudo de caso considerando a geração de energia elétrica a partir de painéis solares. Para isso, foram coletadas informações de uma central de geração na cidade de Curitiba-PR, a qual possui 380 módulos fotovoltaicos. Os painéis são da marca Canadian Solar, modelo CS6U-330P, com potência nominal de 330 W, dimensões de 1960 mm × 992 mm × 40 mm e eficiência de 16,97%.

2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA

Foram coletados dados de diferentes parâmetros para a análise da eficiência dos painéis solares, sendo eles a média mensal da precipitação chuvas, a radiação solar média emitida e a geração de energia elétrica total dos módulos. Esses valores estão apresentados na Tabela 1. Os valores obtidos referentes à radiação solar e à precipitação de chuvas em Curitiba foram coletados a partir da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET– A807).

Tabela 1 – Valores mensais de geração de energia e de precipitação de chuvas

Referência	Radiação solar (kJ m⁻²)	Geração de energia (kW h)	Precipitação de chuvas (mm)
Fev/2020	472978,5	13733,6	110,8
Mar/2020	620261,1	17966,1	14,6
Abril/2020	511396,9	14581,6	21,2
Mai/2020	430239,2	12070,2	26,6
Jun/2020	258610,4	6958,1	145,0
Jul/2020	370407,7	9949,7	31,0
Ago/2020	402925,9	10495,9	144,0
Set/2020	475181,7	11170,4	45,0
Out/2020	516503,5	12028,5	121,0
Nov/2020	620273,5	14621,8	211,0
Dez/2020	572373,8	15489,9	166,2
Jan/2021	484141,9	13253,1	219,4
Fev/2021	399493,8	10356,7	92,0

FONTE: Os autores (2021)

2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CORRELAÇÃO

A análise univariada por meio do coeficiente de correlação de Pearson considera a relação linear entre duas variáveis. Visto que a geração de energia se dá em função da radiação solar emitida, neste trabalho foi avaliado o efeito da sujidade na correlação entre essas variáveis. Para isso, foi realizada a análise em dois períodos distintos, sendo o primeiro período caracterizado por chuvas normais, de fevereiro de 2020 até agosto de 2020. O segundo período foi avaliado de setembro até fevereiro de 2021, que corresponde ao período de estiagem que ocorreu em Curitiba. Assim, o coeficiente de correlação de Pearson (r) é dado por

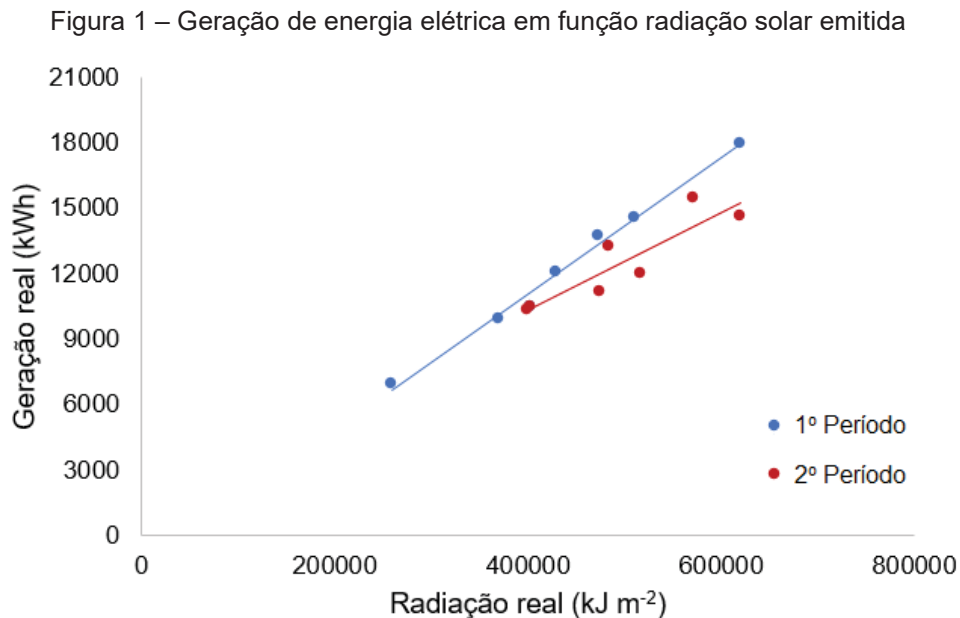
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

onde x_i corresponde às observações de radiação solar emitida mensal, \bar{x} é a média dos valores de radiação, y_i representa a geração de energia elétrica mensal, \bar{y} corresponde à média da geração elétrica e n é o número total de observações.

De forma complementar, foi realizado o ajuste do modelo, para os dois períodos de análise, via método dos mínimos quadrados. Também foi avaliada a qualidade do modelo obtido para ambos os períodos via coeficiente de determinação (r^2).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A limpeza mecânica dos painéis solares, assim como as chuvas, contribui para a manutenção da eficiência dos coletores (ARAÚJO et al, 2019). Pode-se verificar, por meio da Figura 1, que há uma tendência linear ascendente entre as variáveis radiação solar e a geração de energia. Esse comportamento era esperado, uma vez que a radiação solar é a força motriz para geração de energia elétrica. Contudo, foi observado que o valores referentes ao segundo período apresentaram uma tendência menor de linearidade.



FONTE: Os autores (2021).

A Tabela 2 apresenta os valores referentes aos coeficientes de determinação e de correlação de Pearson (r), assim como o modelo ajustado via método dos mínimos quadrados e o coeficiente de determinação (r^2).

Pode-se verificar, de acordo com a Figura 1 e com a Tabela 2, que o primeiro período de análise apresenta maior linearidade entre as variáveis analisadas e maior coeficiente de correlação. Por outro lado, foi observado que o segundo período apresentou uma menor qualidade do modelo ajustado (r^2), assim como um menor valor do coeficiente de correlação de Pearson (r). Este resultado está associado à

temporada de forte estiagem que ocorreu em Curitiba, e à ausência de limpeza dos painéis devido às restrições trabalhista em decorrência da COVID-19. Com isso, os módulos solares apresentaram maior sujidade em sua superfície, o que foi responsável por diminuir a eficiência dos painéis. Este comportamento resultou em uma redução do coeficiente de correlação entre as variáveis radiação solar e a geração de energia elétrica de 12,2%.

Tabela 2 – Coeficientes de determinação e de correlação de Pearson

Variável	1º período	2º período
Modelo ajustado	$y = 0,0312 x - 1435,5$	$y = 0,0222 x + 1468,4$
Coeficiente de determinação (r^2)	0,9905	0,7637
Coeficiente de correlação (r)	0,9953	0,8739

FONTE: Os autores (2021)

Ao analisar os dados referentes à precipitação de chuvas apresentados na Tabela 1, nota-se que o segundo período em estudo (set/2020 até fev/2021) apresenta valores superiores ao primeiro período, diferente dos resultados esperados. Contudo, é importante salientar que esses valores correspondem à precipitação de chuvas mensal na forma acumulada. Contudo, ao avaliar a ocorrência das chuvas diárias, foram observados elevados valores de precipitação ocorrendo em dias isolados, seguido de longos intervalos de estiagem entre as precipitações (INMET, 2021). Desta forma, tem-se que essa condição meteorológica, ocorrida no segundo período, contribuiu diretamente para o aumento da sujidade dos painéis, o que corrobora para a redução da eficiência dos módulos solares.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado o efeito da sujidade em coletores solares empregando uma correlação univariada entre a radiação solar emitida e a geração de energia elétrica. Os resultados indicaram que a redução da limpeza mecânica dos painéis associadas ao período de estiagem que ocorreu em Curitiba-PR implicaram em uma redução de coeficiente de correlação de Pearson de 12,2%. Esse resultado indica, indiretamente, uma menor eficiência dos coletores solares, uma vez que a associação entre as variáveis radiação solar e geração de energia elétrica foi reduzida.

REFERÊNCIAS

Araújo, D. N., de Carvalho, P. C. M. & Dupont, I. M. (2019). Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. **Revista Tecnologia**, 40(2), 1-23.

Barbosa, E. R., de Faria, M. S. F. & Gontijo, F. B. (2018). **Influência da sujeira na geração fotovoltaica**. In Anais VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Estação A807. (2021). Consultado em 5 ago. 2021. Disponível em <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A807>.

Moreira, J. R. S. (2017). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. Rio de Janeiro: LTC.

Villalva, M. G. (2012). **Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações**. (2ª ed.). São Paulo: Érica.