

Influência das Variáveis Climáticas na Geração de Energia por Painéis Fotovoltaicos Instalados em Escola Estadual

Influence of Climatic Variables on Energy Generation by Photovoltaic Panels Installed in a State School

Eliane Ribeiro de Sousa^a; Marcelo Dias de Souza^a; Osvaldo Alves Pereira^a; Aquirya Pinheiro Costa^a

^aUniversidade de Cuiabá, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. MT, Brasil.

*E-mail: marcelo.dsouza@cogna.com.br

Resumo

O presente estudo teve como objetivo analisar a estimativa de produção energética das placas fotovoltaicas instaladas na Escola Estadual Fernando Leite de Campos, situada na cidade de Várzea Grande, estado de Mato Grosso. As análises foram realizadas com base em dados coletados entre setembro de 2022 e agosto de 2023, abrangendo variáveis como precipitação total, umidade relativa média do ar, temperaturas e radiação solar. Durante esse período, foi registrada uma produção total de 69.580,6 W, destacando-se o mês de novembro como o mais produtivo, com 7.322,3 W, e o mês de junho como o menos produtivo, gerando apenas 4.529,5 W. Os resultados obtidos permitem compreender o processo de geração de energia solar e suas relações com os fatores climáticos, além de evidenciar a contribuição positiva das placas fotovoltaicas para a escola, através da economia de energia proporcionada pela redução do consumo da rede de distribuição elétrica.

Palavras-chave: Energia Solar. Placas Fotovoltaicas. Produção Energética.

Abstract

The present study aimed to analyze the estimated energy production of photovoltaic panels installed at Fernando Leite de Campos State School, located in the city of Várzea Grande, state of Mato Grosso. The analyzes were carried out based on data collected between September 2022 and August 2023, covering variables such as total precipitation, average relative humidity, temperatures and solar radiation. During this period, a total production of 69,580.6 W was recorded, highlighting the month of November as the most productive, with 7,322.3 W, and the month of June as the least productive, generating only 4,529.5 W. The results obtained allow us to understand the process of generating solar energy and its relationships with climatic factors, in addition to highlighting the positive contribution of photovoltaic panels to the school, through the energy savings provided by the reduction in consumption of the electrical distribution network.

Keywords: Solar Energy. Photovoltaic Panels. Energy Production.

1 Introdução

A energia desempenha um papel central e inegável no tecido da sociedade contemporânea, sendo a força que impulsiona o desenvolvimento econômico, melhora os padrões de vida e possibilita avanços tecnológicos, sendo que sua importância transcende fronteiras e permeia todos os aspectos da vida cotidiana, moldando o curso do progresso humano (Hemery *et al.*, 1991).

A sociedade, de modo geral, se apropriou de um modo de vida que exige um intenso consumo de energia elétrica. Os avanços tecnológicos, o aumento demográfico, o estabelecimento de padrões de consumo, exigiram e exigem, cada vez mais, dos recursos naturais, consumindo de forma mais intensa fontes não renováveis de recursos (Alves *et al.*, 2013). Desse modo, o sistema fotovoltaico se posiciona como uma excelente alternativa para unir proteção ambiental com desenvolvimento humano.

Nesse contexto, a instalação de sistemas de geração de energia é fundamental para sociedade, como o uso de painéis fotovoltaicos que são compostos por células solares que

convertem a luz solar em eletricidade, sendo que essas células solares são feitas de materiais semicondutores, como o silício, que absorvem a luz solar e liberam os elétrons, gerando uma corrente elétrica (Bursztyn, 2020), a qual pode proporcionar benefícios na esfera econômica a longo prazo, principalmente se instalados em empreendimentos com atividade contínua todos os anos, como é o caso de escolas ou universidades municipais, estaduais, federais ou privadas.

A adoção de fontes de energia renovável, como a energia solar, pode se tornar uma solução viável para escolas públicas, promovendo-as como exemplos de responsabilidade social e ambiental. A implementação de painéis fotovoltaicos pode reduzir os custos com consumo de energia, permitindo que os recursos economizados sejam redirecionados para a aquisição de materiais pedagógicos.

Um fator importante para melhor geração de energias é analisar os dados de incidência da radiação solar, estabelecendo parâmetros que possibilitam analisar a produção de energia, pois a incidência da radiação solar atinge toda a superfície da Terra, desempenhando um papel crucial no sistema de balanço

energético e afetando os processos de aquecimento do solo (Luciano; Valeriano, 2016).

A performance da geração dos módulos fotovoltaicos depende diretamente de algumas variáveis, tais como: temperatura, umidade relativa do ar, irradiação, declinação solar e insolação. Esses componentes corroboram para a eficiência de geração de energia. As Regiões Nordeste e Centro-Oeste são as que possuem o maior potencial de aproveitamento da energia solar (Villalva; Gazoli, 2012). O principal fator que afeta a produção dos módulos fotovoltaicos é a intensidade de radiação solar, outros parâmetros podem contribuir para uma redução de até 15% na produção de energia (Kaldellis; Kokala, 2010).

Na prática da engenharia, ao projetar o teto solar é essencial ter conhecimento da quantidade de radiação solar incidente no local, da mesma forma, o planejamento da posição dos painéis fotovoltaicos requer a compreensão da incidência direta da radiação solar, já que esses painéis são orientados para capturar a luz solar (Gopinathan, 1991).

Alves *et al.* (2013), analisando os dados de porção de radiação difusa e transmitância da atmosfera da estação meteorológica de Cuiabá, em Mato Grosso, constataram que em condição de céu claro há uma P_{dif} de 0,200 com transmitância de 0,680, enquanto em céu parcialmente nublado o P_{dif} é de 0,320 e transmitância 0,490. Em condições nubladas, o P_{dif} é de 0,770 e a transmitância de 0,130, ou seja, que as variáveis climatológicas podem afetar diretamente na produção de energia.

Portanto, o estudo teve como objetivo analisar a estimativa de energia gerada em placas fotovoltaicas, instaladas em uma escola estadual, em relação às variáveis climatológicas.

2 Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A pesquisa foi conduzida na Escola Estadual Professor Fernando Leite de Campos, situada na Avenida Alzira Santana, número 347, na região central do município de Várzea Grande, Estado de Mato Grosso. Com uma área construída que ultrapassa os 3.200m², a escola ocupa um terreno de 13.653,00 m² (Figura 1). A escola dispõe de infraestrutura composta por 18 salas de aula, uma secretaria, um laboratório de ciências da natureza e matemática, uma sala de direção, uma sala de professores, um auditório, dois banheiros masculinos e dois femininos, uma cozinha, uma quadra poliesportiva coberta e outra descoberta, uma quadra de areia, um laboratório de aprendizagem, uma sala de coordenação pedagógica, uma biblioteca e diversos outros espaços administrativos e pedagógicos, tudo projetado para atender a mais de 1.400 estudantes.

Figura 1 - Localização da Área de estudo – Escola Estadual Professor Fernando Leite de Campos - Várzea Grande – MT, 2023



Fonte: os autores.

O município de Várzea Grande, localizado no Estado de Mato Grosso, está dentro da Classificação climática de Köppen *aw*, ou seja, está dentro da classificação tropical (A), inserida em um clima de savana (w), em que apresenta uma estação mais seca durante o inverno e o mês mais seco pode ter um nível de precipitação inferior a 60mm, por vezes, não representando 5% de chuva durante o ano todo, tendo como marca a sua temperatura elevada

2.2 Coleta de dados

No processo de levantamento de dados, foi analisado um sistema com 140 módulos fotovoltaicos Canadian, 144 células, 360W Poli - CS3U-360P instalados na cobertura da unidade escolar nas direções Leste-Oeste com uma inclinação de 20,1° e um inversor da marca Solis trifásico 40KW-5G - 4 MPPT – 380V - Solis-40K-5G Wifi. A coleta de dados foi realizada entre os meses de setembro de 2022 e agosto de 2023, sendo as informações coletadas diretamente no inversor fotovoltaico (Figura 2), um dispositivo importante para todo o sistema da energia solar, a considerar que esse converte a corrente contínua gerada pelos painéis ou placas solares em energia alternada, utilizável em redes elétricas.

Figura 2 - Processo de instalação. (A) Local de instalação das placas fotovoltaicas na cobertura da unidade escolar; (B) Inversor fotovoltaico instalado na unidade escolar para coleta de dados referentes à geração de energia



Fonte: os autores.

A leitura do inversor foi feita pela interface que é incorporada a um display. É nesse display que são apresentadas as informações de desempenho, potência de saída, corrente e tensão. A leitura também pode ser realizada através de aplicativos ou plataformas online, quando os inversores estão conectados à rede de Wifi. No momento de realizar a leitura, foi possível encontrar a quantidade total de energia

produzida ao longo do tempo, o que importante para avaliar o desempenho do sistema ao longo do tempo, inclusive, identificando tendências.

Para obtenção dos dados meteorológicos, estes foram extraídos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, da estação Cuiabá – 83361 – MT, localizada a uma distância de 4,87 km da unidade escolar na qual estão instalados os módulos.

2.3 Análise dos dados

Os dados foram submetidos a análise de variância e realizados cálculos de estatística descritiva, como média, desvio padrão e coeficiente das variáveis obtidas. Com intuito de verificar possíveis relação entre as variáveis climatológicas coletadas no período de chuva (outubro a março) e estiagem (maio a setembro) com a geração de energia, estes foram correlacionados pela análise de Pearson, sendo a significância comprovado pelo teste de T para duas amostras em pares de variáveis.

Para analisar a estimativa de geração de energia em relação às variáveis climatológicas, os dados foram ajustados por meio de modelo de regressão linear, contendo como variável

independente os dados climatológicos de temperatura média, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar e insolação diária, já a única variável dependente foi a geração de energia. A significância das regressões foi obtida por meio do teste de hipótese nula em que, para a escolha da equação adequada, foi considerada a regressão com menor probabilidade de erro na equação e seus coeficientes, bem como a que obteve maior coeficiente de determinação (r^2). Os dados foram analisados estatisticamente utilizando o software R (R Core Team, 2023).

3 Resultados e Discussão

Refletir sobre a análise dos dados e apresentar os resultados decorrentes desta análise surgem como aspectos essenciais para iniciar com a consideração da quantidade de energia gerada durante o período examinado, da qual constatou que de setembro de 2022 a agosto de 2023, aproximadamente 69.580 KWh foram gerados. Novembro de 2022 foi o mês de maior produção, totalizando 7.322,3 KWh, com uma média de $244,07 \pm 54,30$. Em contraste, junho de 2023 registrou a menor produção, atingindo 4.529,5 KWh, com uma média de $150,98 \pm 46,62$ (Quadro 1).

Quadro 1 - Dados de produção média de energia gerada das placas instaladas na escola estadual Fernando Leite de Campos nos meses de setembro de 2022 a agosto de 2023

Mês	Produção de energia (KWh)		Temperatura Média (°C)	Radiação (KJ/m ²)	Insolação
	Total	Média			
Setembro	5799,3	193,31 ± 44,73	28,55 ± 2,69	1439,73 ± 290,97	6,12 ± 2,47
Outubro	6071,9	195,86 ± 57,51	28,67 ± 1,89	1479,60 ± 461,48	5,98 ± 8,81
Novembro	7322,3	244,07 ± 54,30	28,33 ± 2,12	1843,61 ± 472,15	7,91 ± 3,34
Dezembro	6374,3	205,62 ± 49,17	28,42 ± 1,23	1527,24 ± 388,64	4,78 ± 2,65
Janeiro	6656,4	214,71 ± 54,05	27,23 ± 1,24	1591,14 ± 414,93	5,58 ± 3,23
Fevereiro	5754,8	205,52 ± 47,39	27,42 ± 0,94	1581,11 ± 361,87	4,79 ± 2,59
Março	6269,7	202,24 ± 45,12	27,53 ± 1,54	1524,21 ± 388,67	5,85 ± 3,26
Abril	5607,2	186,91 ± 42,97	27,15 ± 1,23	1404,32 ± 346,53	6,07 ± 3,33
Mai	5119,1	165,13 ± 41,66	26,17 ± 1,67	1388,23 ± 362,03	6,46 ± 2,65
Junho	4529,5	150,98 ± 46,62	23,55 ± 4,51	1358,71 ± 453,44	5,33 ± 2,55
Julho	5057,2	163,12 ± 18,08	25,65 ± 2,02	1535,81 ± 182,78	7,13 ± 1,01
Agosto	5018,9	161,91 ± 25,95	29,21 ± 1,89	1524,91 ± 255,95	7,35 ± 2,55

Fonte: dados da pesquisa.

Neste contexto, é relevante apresentar a variação da temperatura para aprofundar a compreensão da produção de energia, conforme tabela 1, da qual em novembro, a temperatura média foi de $28,33 \pm 1,24$ °C, com uma radiação de $1843,61 \pm 472,15$ KJ/m². Já em junho, a temperatura média foi de $23,55 \pm 4,51$ °C, com radiação de $1.358,71 \pm 453,44$ KJ/m². A análise destes dados sugere que temperaturas mais baixas não garantem uma produção mais eficiente em relação às temperaturas mais altas.

As condições climáticas e sazonais também desempenham um papel crucial, pois em períodos mais quentes, como o verão, há uma exposição prolongada ao Sol, sugerindo uma possível correlação com uma produção mais elevada. Além disso, o aumento da precipitação durante o verão contribui para a limpeza das placas solares, otimizando a captação de energia.

3.1 Geração de energia em função do período chuvoso e de estiagem

Ao observar o Quadro 2, a produção de energia no período de estiagem foi menor do que no período chuvoso. A temperatura máxima entre os dois períodos não variou muito, sendo que no período de estiagem a média foi de $34,86 \pm 2,22$ °C e o chuvoso de $34,07 \pm 1,01$ °C, enquanto os níveis de insolação tiveram uma leve variação $6,69 \pm 0,95$ e $5,53 \pm 0,61$, respectivamente. Um dado que pode justificar uma produção maior de energia no período de chuva é a radiação solar, a considerar que alguns outros fatores podem interferir na captação dos raios solares. Como na região que está sendo analisada o período de estiagem tende a ser relativamente mais seco, a umidade do ar reduz bastante.

Quadro 2 - Dados médios da produção de energia das placas fotovoltaicas em relação às variáveis climatológicas diárias nos períodos de estiagem e chuva

Mês	Estiagem		Chuva	
	Média	CV(%)	Média	CV(%)
Produção energia	171,72 ± 18,41	10,71	209,84 ± 19,05	9,08
T max (°C)	34,86 ± 2,22	6,35	34,07 ± 1,01	2,94
T med (°C)	26,97 ± 2,21	8,21	27,68 ± 0,55	2,01
T min (°C)	20,61 ± 2,81	13,59	23,26 ± 1,15	4,94
Insolação	6,69 ± 0,95	14,21	5,53 ± 0,61	11,01
Radiação	1434,41 ± 64,99	4,53	1598,71 ± 123,65	7,73
UR (%)	58,52 ± 6,54	11,17	72,78 ± 3,73	5,13

T max = Temperatura máxima; T med = Temperatura média; T min = Temperatura mínima; PP total = Precipitação total; UR (%) = Umidade Relativa do ar.

Fonte: dados da pesquisa.

A intensidade da radiação solar é diretamente proporcional à geração de energia em sistemas fotovoltaicos. Quando a radiação incidente é menor, há redução correspondente nos valores de corrente, o que diminui a produtividade do sistema. Por outro lado, quando a radiação incidente é maior, ocorre aumento na corrente gerada. Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de que cada fóton energiza um elétron, e quanto maior o número de fótons que atingem a célula fotovoltaica, maior será o número de elétrons energizados, resultando em maior fluxo de corrente elétrica (Green *et al.*, 2012).

Segundo dados levantados no Portal INMET, a Região Metropolitana do Vale do Rio Cuiabá, chegou a apresentar níveis de umidade relativa entre 13% e 15%, nos meses de junho e julho de 2022. A baixa umidade somada a fatores como incêndios, acúmulos de poeira e a poluição, de modo geral, pode comprometer a absorção dos raios solares pelas placas, o que provocará diretamente na eficiência das placas e, conseqüentemente, na capacidade de Watts produzidos.

O acúmulo de impurezas na superfície dos painéis fotovoltaicos diminui, significativamente, a eficiência na geração de energia solar. A fuligem, poeira, poluição atmosférica e outras impurezas que se depositam na superfície dos painéis causam um sombreamento nas células fotovoltaicas, o que impede a absorção total da radiação solar que incide sobre eles. (Yazdani; Yaghoubi, 2022).

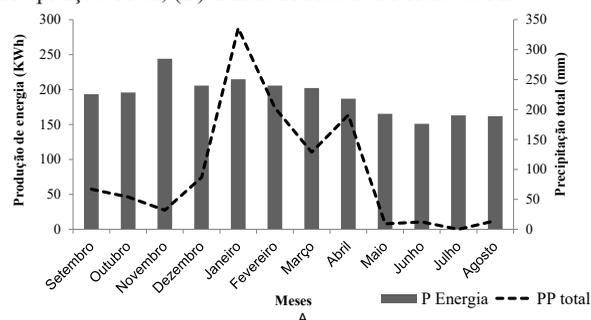
A sujeira acumulada nos painéis fotovoltaicos pode provocar redução significativa no desempenho do sistema, o que torna necessária a manutenção periódica, de forma a garantir que seu desempenho não seja prejudicado pelo acúmulo de sujeira. A aspereza e inclinação das placas influenciam no acúmulo de sujeira, quanto mais horizontal a superfície, maior será o acúmulo de sujeira, além das condições climáticas como brisa lenta, fluxo de ar e frequência de chuvas (Gupta; Ghosh, 2020). Chuvas periódicas podem desempenhar papel importante na limpeza dos painéis fotovoltaicos, removendo parte da sujeira acumulada na superfície dos módulos. Esse processo de autolimpeza é mais eficiente em painéis com inclinação mínima de 10° (Sarver *et al.*, 2013).

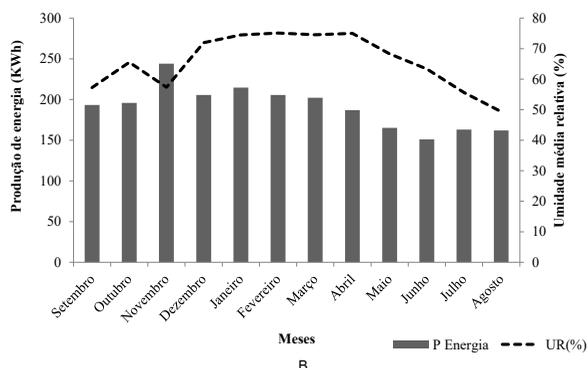
Ainda assim, a principal variável a se tratar nessa análise é a radiação solar, pois as estações do ano influenciam diretamente na produção de energia em relação à inclinação do planeta Terra em relação ao Sol. Os períodos de outono e inverno possui desvantagem na produção de energia em função da angulação do sol em relação à Terra, os dias são mais curtos, assim, nas regiões próximas aos polos, a inclinação do eixo da Terra faz com que os raios solares incidam em um ângulo mais raso, resultando em dias mais curtos e menos radiação solar direta. Isso leva a temperaturas mais frias nessas áreas. Enquanto isso, nas regiões mais próximas do Equador, o Inverno pode ser marcado por dias ligeiramente mais curtos, mas ainda recebem uma quantidade significativa de radiação solar direta (Smith *et al.*, 2020).

Com essas informações, observou-se que o principal fator para a diminuição de produção de energia nos meses de junho e julho, por exemplo, são os dias mais curtos, e com possíveis perdas na eficiência em função da falta de precipitação que, possivelmente, provocou uma menor produção, em detrimento da quantidade de poeira acumulada. De acordo com Maghami *et al.* (2016), a manutenção e limpeza regular dos painéis fotovoltaicos são cruciais para garantir a máxima eficiência na geração de energia, uma vez que a acumulação de sujeira, poeira, folhas e outros detritos na superfície dos painéis pode reduzir, significativamente, a quantidade de luz solar que atinge as células fotovoltaicas, diminuindo assim a produção de energia, sendo que a remoção de sujeira dos painéis solares pode aumentar a eficiência em até 50% em áreas com alta concentração de poeira e poluição.

Durante a estiagem em junho, observou-se redução na produção, pois a falta de manutenção adequada, como a limpeza das placas solares, resultam em uma diminuição na eficiência de captação em função de sujeira, assim a transição entre o Outono e o Inverno, nesse período também contribui para dias mais curtos e céu mais nebuloso, afetando a produção energética, (Mukerjee; Nivedita, 2012) como pode ser observado na relação da produção de energia com precipitação total (Figura 3A) e com a umidade relativa do ar (Figura 3B).

Figura 3 - Gráfico da produção média de energia gerada pelas placas fotovoltaicas em função das variáveis climatológicas. (A) Precipitação Total; (B) Umidade Relativa Média do Ar



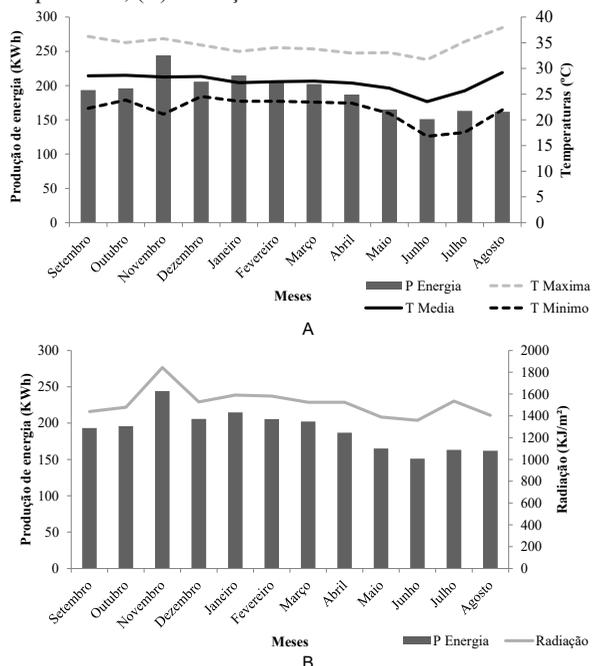


Fonte: dados da pesquisa.

A falta de chuva colabora também com o aquecimento dos painéis solares e quando a temperatura aumenta, a capacidade das células fotovoltaicas de gerar tensão diminui. Isso ocorre porque o aumento da temperatura aumenta a taxa de recombinação de portadores de carga dentro das células, o que reduz a voltagem máxima que as células podem produzir. Além disso, o aumento da temperatura também pode aumentar a resistência elétrica das células, o que diminui a eficiência do módulo (Souza; Aristone, 2018).

Estes resultados podem ser verificados quando se analisa a geração da energia em função das temperaturas mínima, média e máxima, bem como a radiação solar, da qual percebe-se que os meses do período chuvoso apresentaram maiores geração de energia e no caso da radiação solar, percebe-se uma associação positiva (Figura 4).

Figura 4 - Gráfico da produção média de energia gerada pelas placas fotovoltaicas em função das variáveis climatológicas. (A) Temperaturas; (B) Radiação solar



Fonte: dados da pesquisa.

Em maio, durante o Outono e um período seco, foram produzidos 5.119,1 KWh de energia, com uma temperatura média de $26,17 \pm 1,67$ °C e radiação de $1.388,23 \pm 362,03$ KJ/

m². Esses resultados reforçam a correlação entre uma maior exposição ao Sol, altos níveis de captação de radiação solar, menor nebulosidade e uma produção energética mais elevada.

Não é possível afirmar que quando se têm altos índices de precipitação, simplesmente se gera mais energia, pois as placas estão limpas. Essa é uma afirmação equivocada, pois analisando a correlação estatística entre as variáveis (Quadro 3) são observados comportamentos diferentes em relação ao período analisado, como a umidade relativa do ar, que na estiagem não teve correlação com a geração de energia, mas no período de chuvas houve uma correlação positiva e significativa, diferente da precipitação que na estiagem apresentou correlação positiva e significativa, mas no período de chuva não houve correlação.

Quadro 3 - Dados de correlação estatística entre a produção de energia das placas fotovoltaicas com as variáveis climatológicas nos meses de estiagem e chuva

Período	Variáveis	r	Test T	Significância
Estiagem	T max (°C)	0,47	1,28	ns
	T med (°C)	0,69	3,02	*
	T min (°C)	0,78	3,97	**
	Insolação	0,32	0,43	ns
	Radiação	0,41	1,45	ns
	PP total	0,78	4,07	**
	UR(%)	-0,17	0,55	ns
Chuva	T max (°C)	0,84	4,92	**
	T med (°C)	0,59	2,31	*
	T min (°C)	-0,73	3,42	*
	Insolação	0,21	0,37	ns
	Radiação	0,93	8,14	**
	PP total	-0,32	1,07	ns
	UR(%)	-0,87	5,67	**

T max = Temperatura máxima; T med = Temperatura média; T min = Temperatura mínima; PP total = Precipitação total; UR(%) = Umidade Relativa do ar. Estatística: ns = Não significativo; * = significativo a 5% de probabilidade de erro; ** = significativo a 1% de probabilidade de erro.

Fonte: dados da pesquisa.

Isso ressalta que a falta de manutenção afeta na produção da energia, pois no período de estiagem ocorrem poucas chuvas, mas quando acontecem, essas tendem a limpar as placas favorecendo na geração. Já no período de chuvas, em função da presença de alto teor de umidade e chuvas ser algo constante, a correlação só ocorre com a umidade relativa.

Quando a radiação solar atinge uma gota de água no ar, esta gota pode sofrer diferentes processos, como reflexão, refração e difração. Durante períodos de baixa umidade relativa do ar, há menos gotículas de água suspensas na atmosfera para interagir com a radiação solar, portanto, em períodos de baixa umidade relativa do ar (período seco), a quantidade de radiação direta que atinge uma superfície geralmente é menor em comparação com períodos de alta umidade relativa do ar (Latha *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2014).

Segundo Liao e Cai (2017), a presença de partículas de água na atmosfera pode aumentar a difusão da luz solar, enquanto em condições de baixa umidade relativa, a ausência

dessas partículas pode reduzir a difusão e, conseqüentemente, a radiação difusa disponível. Além disso, estudos realizados por Kaskaoutis *et al.* (2013) indicam que em climas secos, como no deserto, a falta de umidade reduz a dispersão de radiação difusa, influenciando a quantidade total de radiação recebida na superfície.

Em relação à análise da estimativa de produção de energia gerada, dos modelos lineares testados, os que apresentaram os melhores resultados estatísticos foram encontrados em relação: radiação solar, com a umidade relativa do ar e temperatura média, pois essa função que obteve o menor coeficiente de determinação ($r^2 = 0,81$), contendo todos os coeficientes (β) com significância menor que 1% de probabilidade de erro. Sendo representado pela fórmula:

$$GE = -149,2 + 0,1266.Rd + 1,089.UR + 2,799.Tm$$

Em que:

GE= Geração de energia em W

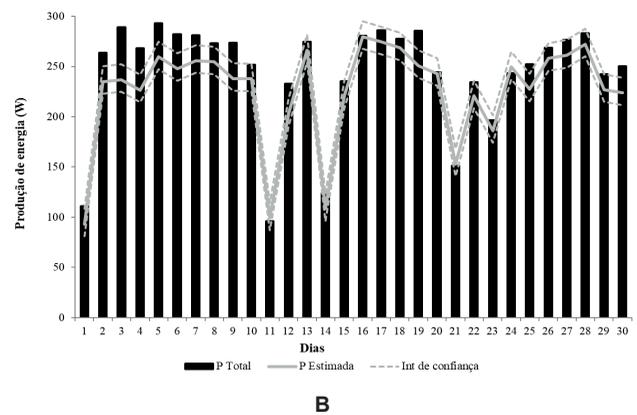
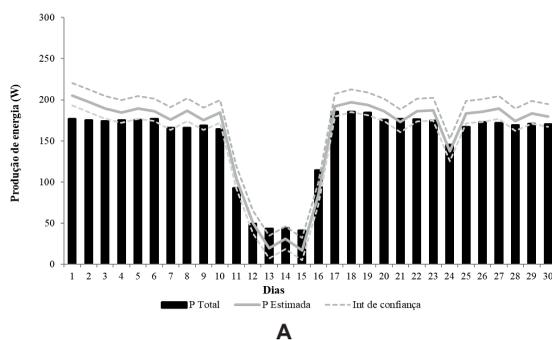
Rd= Radiação solar em KJ/m²

UR= Umidade relativo do ar em %

Tm= Temperatura média local em °C

Para verificar a estimativa da equação modelada, foram plotados os gráficos de dois meses, sendo escolhido um mês do período de estiagem da qual gerou menor quantidade de energia no mês (Junho) (Figura 5A) e, também, o mês do período de chuvas que mais gerou energia no mês (Novembro) (Figura 5B), da qual se percebe que os dados estimados estão próximos aos dados reais, uma vez que o intervalo de confiança da reta ajustada passa pelos dados reais, demonstrando assim que a equação conseguiu estimar os dados de geração de energia acima dos 81% conforme demonstra o coeficiente de determinação r^2 .

Figura 5 - Gráfico da produção de energia gerada diariamente em relação aos dados estimados por meio da equação matemática modelada em função das variáveis: radiação, umidade relativa e temperatura média. (A) junho – período de estiagem; (B) novembro - período de chuva



Fonte: dados da pesquisa.

Sobre os meses que menos se produziu (junho) energia e o mês que mais produziu (novembro), é de fundamental importância destacar que o fator da radiação e declinação solar participou como elementos protagonistas para explicar os níveis de energia solar produzida pelos painéis. A declinação do Sol é um elemento importante a se considerar, pois essa se refere à medida do ângulo entre os raios solares e o plano do Equador do planeta Terra. A variação ocorre durante o ano em função da inclinação do eixo da Terra em relação ao plano da sua órbita ao redor do Sol.

Quanto mais o Verão se aproxima, o Sol atinge maior declinação positiva, o que significa que está mais alto no céu em relação ao plano do Equador, isso faz com que os dias se tornem mais longos no Verão. Logo, quando é Inverno se tem dias mais curtos (Milone *et al.*, 2018). A exposição da região em que estão instalados os painéis do sistema fotovoltaico ao Sol implicará positivamente na produção de energia. Assim, o gráfico da figura 5 sugere que com dias mais longos e com níveis de radiação solar mais altos em função da estação do ano, a eficiência energética aumenta.

De modo geral, é possível observar que a produção de energia solar realizada através de painéis fotovoltaicos possui inúmeras variações climáticas que interferem em toda a cadeia de produção. Realizar a análise dos dados garantiu uma maior compreensão em como se movimentam os fatores externos para a garantia de geração de energia. Considerar o clima, as temperaturas máxima, média e mínima, radiação solar, insolação, umidade relativa do ar e declinação solar, torna-se tarefa imprescindível para levantar hipóteses e, por fim, alcançar os resultados obtidos durante este trabalho.

4 Conclusão

A produção de energia solar varia, sazonalmente, atingindo picos durante os meses de maior incidência solar e diminuindo em períodos de menor insolação. Essas flutuações ressaltam a importância de desenvolver estratégias de gerenciamento e armazenamento de energia para otimizar o aproveitamento da energia solar ao longo do ano. Nos períodos chuvosos, com maior índice de radiação solar, em função do aumento na produção de energia, é importante aproveitar esse período

para maximizar a eficiência dos sistemas fotovoltaicos. Por outro lado, durante os períodos de seca ocorre uma redução na produção de energia, em função do acúmulo de sujeira nas placas solares e do aumento da temperatura, assim é adequado que se implementem estratégias de manutenção adequadas, como a limpeza regular das placas e o controle da temperatura ambiente.

Referências

- ALONSO, R.H. Posicionamento eficiente de módulos fotovoltaicos em plantas solares no ambiente urbano. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.
- ALVES, M. C. *et al.* Efeitos das condições do céu medidas pelo índice de clareza na estimativa da radiação solar usando um modelo digital de elevação. *Ciênc. Atmosféricas Clim.*, v.3, n.4, 2013, p.618-626. doi: 10.4236/acs.2013.34064.
- BURSZTYN, M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas. *Estud. Avançados*, v.34, p.167-186, 2020.
- GOPINATHAN, K.K. Solar radiation on variously oriented sloping surfaces. *Solar Energy*, v.47, n.3, p.173-179, 1991.
- GREEN, M. A., *et al.* Solar cell efficiency tables (version 39). *Progress in photovoltaics: Res. Applic.*, v.20, n.1, p.12-20, 2012.
- GUPTA, R.; GHOSH, A. Investigating the impact of dust accumulation on the performance of photovoltaic modules: Experimental analysis and performance modeling. *Renewable Energy*, v.145, p.2063-2076, 2020.
- HEMERY, D; DEBEIR, J.C.; DELEAGE, J.P. Uma história da energia. Brasília: UNB, 1991.
- HUANG, J. *et al.* Climate effects of dust aerosols over East Asian arid and semiarid regions. *Atmospheric Res.*, v.119, n.9, p.11398-11416, 2014.
- KALDELLIS, J.; KOKALA, A. Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. *Energy*, v.35, n.12, p.4862-4869, 2010.
- KASKAOUTIS, D. G. *et al.* The role of aerosol models on solar radiation variability and climate studies. *Atmospheric Res.*, v.124, p.1-18, 2013.
- LATHA, K.M.; BADARINATH, K.V.S.; REDDY, P.R. Impact of aerosols on solar dimming over a tropical urban area. *Atmospheric Environ.*, v.45, n.6, p.1138-1145, 2011.
- LIAO, L.Z.; CAI, H.W. Effect of aerosols on terrestrial solar radiation in China during the past 50 years: Spatial distribution and interdecadal variation. *J. Geophys. Res. Atmospheres*, v.122, n.1, p.409-423, 2017.
- LUCIANO, A.C.S.; VALERIANO, M.M. Mapeamento da distribuição de radiação solar devida ao relevo em diferentes períodos, latitudes e condições atmosféricas. *Rev. Bras. Cartografia*, n.68, p.945-956, 2016.
- MAGHAMI, M.R. *et al.* Power loss due to soiling on solar panel: a review. *Renewable Sustainable Energy Rev*, v.59, p.1307-16, 2016.
- MILONE, A.C. *et al.* Introdução à astronomia e astrofísica. São José dos Campos: INPE, 2018, 370p.
- MUKERJEE, A. K.; NIVEDITA, T. Photovoltaic systems: analysis and design. New York: McGraw-Hill, Technology & Engineering, 2012.
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- SARVER, T.; AL-QARAGHULI, A.; KAZMERSKI, L.L. A comprehensive review of the impact of dust on solar energy systems: History, research, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.22, p.698-733, 2013.
- SMITH, J.H.; GONZALEZ, M.L. Solar Radiation and Climate in Equatorial Regions. *Journal of Climate*, v. 32, n. 4, p. 123-145, 2020.
- SOUZA, A.; ARISTONE, F. Um estudo da temperatura e da irradiação solar em células fotovoltaicas. *Tecno-Lógica*, v. 22, n. 2, p.194-200, 2018.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J.R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. São Paulo: Érica, 2012.
- YAZDANI, H.; YAGHOUBI, M. Dust deposition effect on photovoltaic modules performance and optimization of cleaning period: a combined experimental–numerical study. *Sustainable Energy Technol. Assess.*, v.51, p.101946, 2022.