



CORRELAÇÃO DE PEARSON APLICADA À ENERGIA PRODUZIDA E OS DADOS METEOROLÓGICOS DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO

Janine Cavalcante de Oliveira*¹, Fernando Nunes Belchior¹

¹UFG – Universidade Federal de Goiás

Resumo - Condições climáticas afetam a geração de energia solar fotovoltaica. Este trabalho tem como objetivo calcular e analisar o Coeficiente de Correlação de Pearson entre a energia produzida por um sistema de geração de energia fotovoltaica e parâmetros meteorológicos como a velocidade do vento, precipitação, temperatura e umidade relativa do ar e irradiância, para dados coletados entre os dias 01/11/16 e 28/02/19, provenientes de uma usina fotovoltaica e uma estação meteorológica instaladas em um prédio da Universidade Federal de Goiás. Para cada parâmetro, foram calculadas médias mensais e, com esses resultados, obtidas as correlações entre a energia produzida e cada um dos dados meteorológicos. O parâmetro que mais influencia na geração de energia é a irradiação solar global horizontal, pois possui maior valor de correlação. Foram calculadas regressões lineares para verificar o ajuste entre a potência de saída do sistema e os dados meteorológicos. A equação que mais se adaptou ao modelo possui uma confiança de 64,2%, que é um resultado bom, mas pode não ser o melhor modelo para representar o sistema, apesar de produzir um erro de apenas 6,5%. Para melhor visualização da relação entre os parâmetros foram gerados gráficos dos perfis diários de geração de energia.

Palavras-Chave - Correlação de Pearson, Energias Renováveis, Fotovoltaica, Regressão Linear.

CORRELATION OF PEARSON APPLIED TO THE ENERGY PRODUCED AND THE METEOROLOGICAL DATA OF THE PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY SYSTEM

Abstract - It is known that climatic conditions can affect the generation photovoltaic energy. Therefore, this work aims to calculate and analyze Pearson's Correlation Coefficient between the energy generated by a photovoltaic solar energy generation system and some meteorological data such as wind speed, precipitation, air temperature, global horizontal solar irradiance and relative air humidity, between 01/11/16 and 02/28/19, in a class building at the Federal University of Goiás. Initially, for each parameter, monthly averages were calculated

and, with these results, were obtained and plotted the correlations between the energy produced and each one of the meteorological parameters. The strongest correlation is that between the energy produced and the global horizontal solar irradiation, being, therefore, the most important parameter for energy production. In addition, a linear regression was performed to verify the fit between the generated power and the meteorological data. The regression equation that best fits the model has a confidence of 64.2%, which is a good result, but may not be the best model to represent the system, despite producing an error of only 6.5%. In addition, for better visualization of the relationship between the parameters, graphs of the power generation profiles were generated.

Keywords - Correlation of Pearson, Renewable energies, Photovoltaic, Linear regression.

NOMENCLATURA

- V Velocidade do vento (m/s)
- T Temperatura do ar (°C)
- U Umidade relativa do ar (%)
- C Precipitação pluviométrica (mm)
- I Irradiação solar global horizontal (W/m²)
- P Potência (W)

I. INTRODUÇÃO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel e após a sua descoberta as pesquisas não pararam mais. Hoje, tem-se módulos solares com eficiência de cerca de 17% [1], que são aplicados tanto nas áreas rurais quanto nas urbanas, nas indústrias e nas residências.

A matriz energética brasileira é composta principalmente por energia proveniente das hidrelétricas e por combustíveis fósseis. Alguns estudiosos argumentam que as usinas hidrelétricas que utilizam barragens não são sustentáveis como se pensava e a cada dia torna-se mais difícil o licenciamento para a construção de novas barragens, devido à demarcação de terras indígenas e, além disso, essas usinas

*janinecavalcanteoliveira@gmail.com

podem não ser a melhor opção, financeiramente falando, já que não produzem a quantidade de energia esperada [2].

Já os combustíveis fósseis são utilizados por veículos e por termelétricas, que são ativadas quando as hidrelétricas não conseguem suprir a demanda e, além de dispendiosas, são altamente poluentes.

Portanto, um dos objetivos do trabalho é mostrar a importância do desenvolvimento e da implementação de fontes alternativas de energia e uma excelente opção é o aproveitamento da luz solar.

Para a instalação das placas fotovoltaicas em um determinado local, além de considerar a posição em relação ao Sol, é interessante analisar a irradiação solar e as condições meteorológicas, para que se obtenha o maior aproveitamento possível do sistema [3]. Analisando um sistema de geração de energia solar fotovoltaica, já instalado na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação (EMC) da Universidade Federal de Goiás (UFG), campus Goiânia-GO, este trabalho tem como objetivo analisar como as condições meteorológicas afetam a produção desta energia solar.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

Em 1893 o efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez. O físico francês Edmond Becquerel verificou que placas metálicas imersas em um eletrólito produzem uma pequena diferença de potencial, quando expostas à luz [4].

A primeira célula solar preparada a base de silício foi desenvolvida por cientistas da Bell Labs em 1954, a célula possuía eficiência de 6%. Desde então, as pesquisas no ramo não pararam mais. Em 26 de abril de 1954 o jornal estadunidense "The New York Times" anunciou que as células fotovoltaicas de silício poderiam ser a possibilidade do futuro de aproveitamento de uma fonte de energia ilimitada, a radiação solar [5].

Além disso, com a Guerra Fria e, posteriormente, a Crise do Petróleo, a busca por fontes alternativas de energia foi intensificada.

Sabe-se que, para que seja gerada energia a partir da luz solar, são necessárias algumas condições, como uma boa irradiação solar, e deve-se evitar sombreamento. Além disso, é importante que os módulos não atinjam altas temperaturas, de acordo com as especificações técnicas de cada fabricante, e que estejam sempre limpos.

A. Correlação de Pearson

Para entender os efeitos de alguns parâmetros meteorológicos na geração de energia solar fotovoltaica, uma das alternativas que pode ser utilizada é a Correlação de Pearson, uma ferramenta que mensura o grau de associação entre grandezas, ou seja, o Coeficiente de Correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis e é dado pela Equação (1):

$$(r) = \frac{1}{n-1} \sum \frac{(x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{sx sy} \quad (1)$$

Onde:

- n - Número de amostras.
- x_i - Amostra da variável x .
- \bar{X} - Média da variável x .
- sx - Desvio padrão da variável x .
- y_i - Amostra da variável y .
- \bar{Y} - Média da variável y .
- sy - Desvio padrão da variável y .

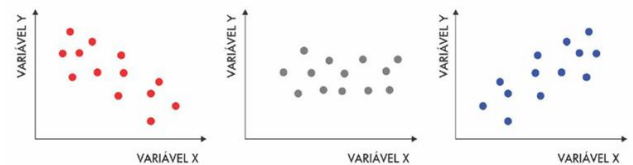
A constante (r) encontra-se no intervalo (-1,1). O sinal indica direção negativa ou positiva do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. No outro oposto, uma correlação de valor zero indica que não há relação linear entre as variáveis [6]. O nível de correlação positiva entre as variáveis pode ser obtido de acordo com a Tabela I:

Tabela I: Níveis de Correlação de Pearson

Coefficiente	Relação
0-0,19	Muito fraca
0,2-0,39	Fraca
0,4-0,59	Moderada
0,6-0,79	Forte
0,8-1,0	Muito forte

Fazendo o gráfico da distribuição dos valores analisados [7], tem-se algo similar ao que é encontrado na Figura 1

Figura 1 - Representação dos gráficos de correlação (da esquerda para a direita) negativa, nula e positiva



Fonte: Oper Data

Quando a correlação (r) for negativa significa que os valores analisados são inversamente proporcionais e, caso seja positiva, as grandezas são diretamente proporcionais.

B. Regressão Linear

Outra ferramenta de análise a ser utilizada é a regressão linear [8], que consiste em uma análise estatística com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes. O modelo estatístico para a regressão é dado pela Equação (2)

$$Y = \alpha + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 + \dots + \alpha_k X_k \quad (2)$$

Onde:

- Y - Variável dependente.
- α - Constante de regressão.
- α_k - Coeficientes de regressão.
- X_k - Variáveis independentes.

C. Perfil diário de geração de energia

Por fim, para que a relação entre as variáveis se torne ainda mais visível, foram plotados dois gráficos incluindo o comportamento das variáveis analisadas na Regressão Linear

(potência de saída, velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e irradiação solar global horizontal) comparando dias em que se teve alta ou baixa geração de energia.

III. METODOLOGIA

Como objeto de estudo para este trabalho, utilizou-se a Estação Meteorológica instalada junto aos módulos fotovoltaicos, no telhado do Bloco B, na Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação, no Campus I da UFG, localizado no Setor Universitário.

A estação meteorológica, representada na Figura 2, possui os seguintes equipamentos [9]:

- um anemômetro, que mede a velocidade dos ventos em metros por segundo (m/s);
- um pluviômetro, que mede a precipitação pluviométrica em milímetros (mm);
- um piranômetro, que mede a irradiação solar global no plano horizontal em watts por metro quadrado (W/m^2);
- um barômetro, que mede a pressão (mBar);
- um termômetro, que mede a temperatura do ar em graus Celsius ($^{\circ}C$);
- um psicrômetro, que mede a umidade relativa do ar (%).

Figura 2 - Representação da Estação Meteorológica utilizada como fonte de dados

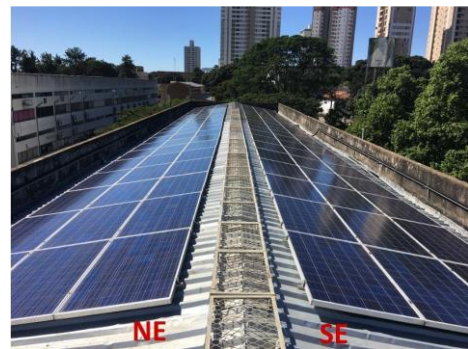


Fonte: Silva (2019)

Os dados são registrados em intervalos de um minuto, e salvos no *site* da Estação [10]. Considerando os dados do dia 1 de novembro de 2016 ao dia 28 de fevereiro de 2019, utilizando o *software Libre Office Calc*, foram feitas médias mensais para cada parâmetro.

Já o sistema de energia solar fotovoltaica estudado, contava com 145 módulos e sete inversores, sendo seis com potência de 4,4 kW e um com potência de 2,9 kW. Durante o estudo, apenas 133 módulos estavam ativos. Nas Figuras 3 e 4, é possível visualizar alguns módulos e alguns inversores do sistema fotovoltaico.

Figura 3 - Módulos do sistema fotovoltaico estudado



Fonte: Silva (2019)

Figura 4: Inversores do sistema fotovoltaico estudado.



Fonte: Silva (2019)

Os dados de geração de energia podem ser consultados na plataforma dos inversores Theia [11]. No *site*, é possível verificar a produção diária, semanal, mensal e anual de energia. Portanto, foram coletados os dados mensais e, com isso, foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson, apresentados na Tabela I.

Posteriormente, com o *software Minitab*, foram gerados os gráficos de dispersão com as retas de regressão, para facilitar a visualização da tendência dos dados, apresentados nas Figuras 5 a 8.

Em relação às retas de regressão, os dados utilizados foram a potência de saída (em kW) do sistema de geração de energia e os dados meteorológicos, sendo considerados intervalos de um minuto entre as medições. Além disso, foram utilizados dois conjuntos de dados, distribuídos da seguinte forma:

- Método 1 - 8 a 12 de fevereiro de 2019, período em que a produção de energia, que foi de 117,1 kWh se aproximou à média geral de produção de energia, em todo o período analisado, que é igual a 117,5 kWh.
- Método 2 - 8 a 16 de janeiro de 2019, quando se teve alta produção de energia, cerca de 150 kWh.

Os intervalos foram escolhidos dessa forma para que fosse possível verificar se o sistema se adaptaria melhor à equação que considerou dados de alta produção de energia, ou àquela em que foram considerados dias com produção próxima à média geral.

Para cada conjunto de dados descrito, foi obtida uma equação. Posteriormente, essas equações foram testadas,

utilizando os dados de geração e meteorológicos do dia 12/01/19, às 10h.

Ainda, levando-se em consideração que no dia 24/12/16 obteve-se a maior geração de energia, com 181,83 kWh, foram gerados gráficos, a título de comparação, entre os dias 18/12/18, em que se teve alta produção de energia e o dia 27/09/17, com a pior geração de energia, em que foram produzidos 181,11 e 20,31 kWh, respectivamente. Os parâmetros foram inseridos no gráfico em escalas diferentes, para facilitar a visualização da relação entre as variáveis, como pode ser visto nas Figuras 8 e 9.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando o *software Libre Office Calc*, foram obtidas as correlações entre todos os parâmetros a serem analisados, onde a Tabela II apresenta os coeficientes de correlação de Pearson obtidos referentes aos parâmetros supracitados, obtidos de medições ocorridas entre os dias 1 de novembro de 2016 e 28 de fevereiro de 2019.

Tabela II - Coeficiente de Correlação de Pearson entre grandezas analisadas

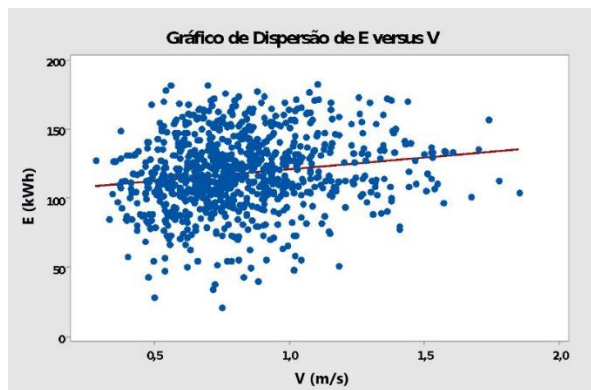
	E	V	T	U	C	I
E	-	0,16	0,58	-0,46	-0,23	0,93
V	0,16	-	-0,10	-0,20	-0,04	0,19
T	0,58	-0,10	-	-0,39	-0,17	0,61
U	-0,46	-0,2	-0,39	-	0,39	-0,53
C	-0,23	-0,04	-0,17	0,39	-	-0,24
I	0,93	0,19	0,61	-0,53	-0,24	-

Fonte: Autores

A. Energia gerada x Velocidade do vento

Analisando a relação entre a velocidade do vento e a energia gerada, observa-se que essas grandezas possuem uma relação muito fraca, de acordo com a Tabela I, com um coeficiente de Pearson de 0,16. Portanto, a velocidade do vento não tem influência significativa na geração fotovoltaica do sistema estudado, como mostrado na Figura 5. Contudo, o fluxo de ar nos módulos pode ser afetado por uma platibanda existente no edifício, diminuindo o resfriamento das placas e, por isso, a correlação é baixa. A reta de regressão (em vermelho) foi inserida para facilitar a visualização da correlação entre as variáveis.

Figura 5 - Gráfico de dispersão entre a energia gerada E (kWh) e a velocidade do vento V (m/s), com a reta de regressão.

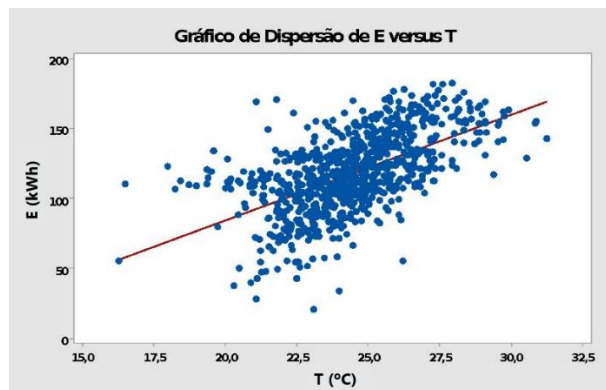


Fonte: Autores

B. Energia gerada x Temperatura do ar

Observando a Figura 6, percebe-se que a relação entre a temperatura do ar e a geração de energia é moderada. Corroborando o dado da Tabela I, que mostra que entre essas grandezas há um coeficiente de correlação igual a 0,58. É importante lembrar que a temperatura dos módulos influencia negativamente a geração de energia. Contudo, para a realização deste trabalho não foi medida a temperatura dos módulos, apenas a temperatura do ar.

Figura 6 - Gráfico de dispersão entre energia gerada E (kWh) e a temperatura do ar T (°C), com a reta de regressão

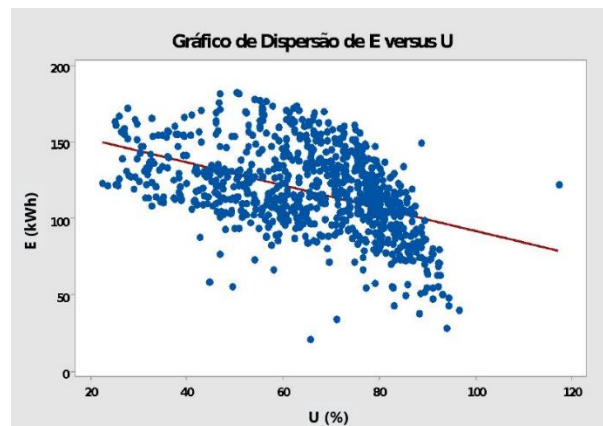


Fonte: Autores

C. Energia gerada x Umidade relativa do ar

De acordo com a Figura 7, percebe-se que a relação entre as grandezas é moderada, tendo (r) igual a -0,46. Uma das explicações pode ser o fato de que em dias mais úmidos, o céu fica mais nublado, afetando consideravelmente a geração de energia.

Figura 7 - Gráfico de Dispersão entre energia gerada E (kWh) e a umidade relativa do ar U (%), com a reta de regressão

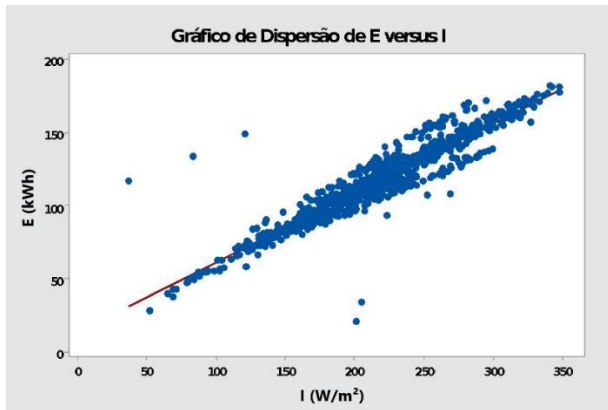


Fonte: Autores

D. Energia gerada x Irradiação solar global horizontal

O coeficiente de correlação de Pearson entre a energia produzida e a irradiação solar global no plano horizontal é de 0,93, considerada muito forte, de acordo com a Tabela I. Na Figura 8, percebe-se a intensidade da relação entre os parâmetros. Sendo a irradiação, dentre os parâmetros analisados, a grandeza que mais influencia na geração de energia solar.

Figura 8 - Gráfico de dispersão entre energia produzida E (kWh) e irradiação solar global no plano horizontal I (W/m²), com reta de regressão

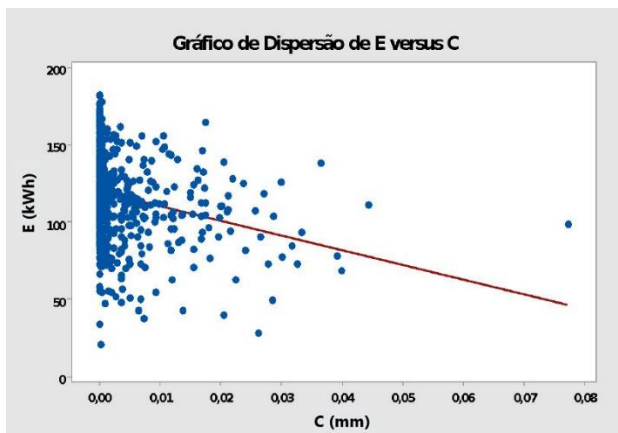


Fonte: Autores

E. Energia gerada x Precipitação

De acordo com a Figura 9, percebe-se que a correlação entre a precipitação e a geração de energia é fraca. Contudo, é interessante observar a tendência à uma inclinação negativa dos pontos no gráfico, o que significa que há uma relação inversamente proporcional entre os parâmetros, com $(r) = -0,23$.

Figura 9 - Gráfico de dispersão entre a energia gerada E (kWh) e a precipitação pluviométrica C (mm), com a reta de regressão



Fonte: Autores

F. Regressão Linear

Foram considerados dois conjuntos de dados para gerar as equações de regressão linear. Para os dias 8 a 12 de fevereiro de 2019, em que a produção de energia foi próxima à média geral analisada, obteve-se a Equação (3), com 64,2% de confiança:

$$P_{M1} = -668 + 120,92V + 71,21T - 10,38U + 954C + 0,66I \quad (3)$$

Já em relação aos dados de 8 a 16 de janeiro de 2019, quando se teve alta produção de energia (150 kWh), obteve-se a Equação (4), com 74,77% de confiança

$$P_{M2} = -1640 + 109,4V + 69,23T + 2,18U + 177,2C + 1,13I \quad (4)$$

Para testar os resultados das equações, foram inseridos os dados do dia 12 de janeiro de 2019, às 10 h, quando se tinha $V=0,95$ m/s, $T=25,6$ °C, $U = 62,11\%$, $C=0$ mm, $I=229,8$ W/m², $P_{sis}=790$ W, sendo P_{sis} a potência produzida pelo sistema naquele momento.

Portanto, utilizando os dados acima, obtém-se $P_{M1} = 738,78$ W, com erro de 6,5% e $P_{M2} = 594,12$ W, com 24,8%. Portanto, percebe-se que a equação P_{M1} se encaixa melhor ao modelo utilizado, apesar da menor confiança.

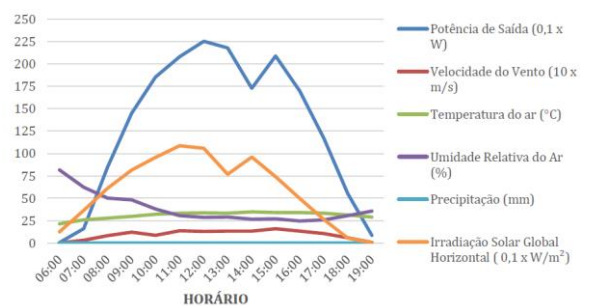
G. Perfil diário de geração de energia

É interessante observar que a média mensal da produção de energia entre novembro de 2016 e janeiro de 2019 varia entre 99,1 e 142 kWh, sendo que a média da produção em todo o período analisado é de 117,5 kWh.

Dos meses analisados, o mês de janeiro de 2019 foi quando se obteve a maior média mensal de produção de energia, com média igual a 142 kWh. O segundo e o quarto meses com maior produção de energia foram setembro e agosto de 2018, respectivamente. Além disso, foi realizada a limpeza dos módulos em junho, agosto, setembro e outubro de 2018 e essa pode ser uma das causas da boa produção nos meses 8 e 9 de 2018.

O dia 18 de dezembro de 2018 foi a segundo melhor em quantidade de energia gerada, em todo o período analisado, sendo produzidos 181,11 kWh. A potência de saída está representada na Figura 10, junto às curvas dos dados meteorológicos. É interessante observar que a potência possui comportamento similar à irradiação solar global horizontal, o que é esperado, já que, como visto anteriormente, a correlação entre essas grandezas é alta. Além disso, é interessante observar que há geração de energia entre 6 e 19h.

Figura 10 - Comportamento da potência de saída e dos dados meteorológicos no dia 18/12/18

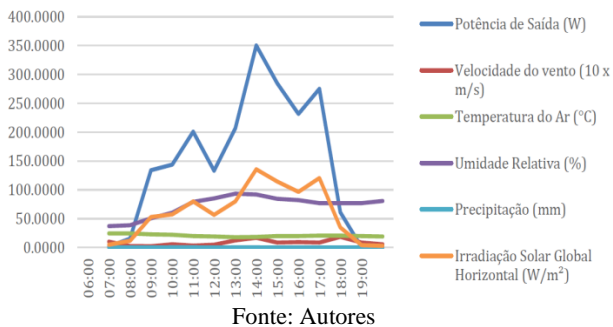


Fonte: Autores

Já em relação ao dia 27/09/17, que foi o dia em que foi produzida a menor quantidade de energia (20,31 kWh) em todo o período analisado, observa-se, na Figura 11, que o gráfico da potência de saída é mais estreito, significando que a produção de energia ocorreu em um período mais curto quando comparado ao dia 18/12/18. Além disso, o comportamento da irradiação solar varia muito ao longo do dia, o que afeta negativamente a produção. Ainda, a média da umidade relativa do ar foi maior no dia 27/09/17, tendo o valor de 65,6%, enquanto no dia 18/12/18 foi de 50,8%, o que pode

ter influenciado na quantidade de nuvens no céu, causando sombreamento nos painéis solares.

Figura 11 - Comportamento da potência de saída e dos dados meteorológicos no dia 27/09/17



V. CONCLUSÕES

Este artigo analisou o sistema de geração de energia solar fotovoltaico instalado no Bloco B da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação da Universidade Federal de Goiás, campus Goiânia-GO. Foram correlacionados os dados meteorológicos e a energia produzida no período de novembro de 2016 a fevereiro de 2019, utilizando o *software Libre Office Calc*.

Com os dados dos dias 8 a 16 de janeiro de 2019, com intervalo de um minuto entre as medidas, foi calculada uma regressão linear. O sistema não foi perfeitamente descrito pelo modelo, tendo uma confiança de 74,77%. Contudo, considerando o teste realizado, em que se obteve 6,5% de erro, o sistema se adaptou melhor ao primeiro conjunto de dados, que considera os dias 8 a 12 de fevereiro, com 64,2% de confiança.

Além disso, fez-se uma comparação entre dois dias (18/12/18 e 27/09/17) em que se obteve alta e baixa geração de energia, respectivamente, comparando a potência de saída e os dados meteorológicos. É possível perceber que nos momentos quando a umidade é alta, a irradiação solar é afetada e, conseqüentemente, a potência de saída diminui. Ademais, é importante perceber como o comportamento da irradiação solar global horizontal reflete na potência de saída dos inversores.

Analisando os coeficientes de correlação de Pearson e os perfis diários de geração de energia, conclui-se que a irradiação é o parâmetro que mais influencia na geração de energia solar fotovoltaica, como era de se esperar. Além disso, percebe-se que a produção de energia é favorecida à medida que a temperatura do ar aumenta e a umidade relativa diminui.

O trabalho contribui com a área a que se aplica, na medida em que estima os efeitos dos parâmetros meteorológicos na produção de energia. Em trabalhos futuros, pode ser interessante analisar a irradiação solar no plano inclinado, ao invés de considerar a irradiação global no plano horizontal, desta forma, será possível obter uma correlação mais precisa entre a irradiação e a produção de energia.

REFERÊNCIAS

[1] Tipos de painel solar fotovoltaico. Portal Solar, junho de 2018. Disponível em:

<<https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 13 de setembro de 2020.

[2] Bores, H.; Blower, A.P. Hidrelétricas se tornam insustentáveis dependendo de onde forem construídas. 12 de novembro de 2018. O Globo. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/meio-ambiente/hidreletricas-se-tornam-insustentaveis-dependendo-de-onde-forem-construidas-23215004>>. Acesso em 13 de setembro de 2020

[3] Villalva, M.G; Gazoli, J.R. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à rede. 1ª ed. São Paulo. Editora Érica, 2013.

[4] Vallêra, A.M; Brito, M.C. Meio Século De História Fotovoltaica. Gazeta de Física, Sociedade Portuguesa de Física, 29, 10-15. 2005.

[5] Komp, R. J. Practical photovoltaics: electricity from solar cells, 3a. ed., aatec publications: Ann Arbor, 2001.

[6] Filho, D. B. F.; Júnior, J. A. D. S. Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r). *Revista Política Hoje*, 18(1), 115–146. 2019.

[7] Coeficientes de Correlação. Oper Data. 2019. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/coeficientes-de-correlacao/>>. Acesso em: 24 de set. de 2020

[8] M. P. Mello, L. A. Peternelli, “Conhecendo o R - Uma Visão mais que Estatística”. Editora UFV, 2013.

[9] SILVA, J. A. A. Tratamento de Dados Meteorológicos e Análise de Desempenho do Sistema Fotovoltaico da EMC/UFG. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) – UFG. Goiânia, p. 95-97.2019.

[10] Estação Meteorológica EMC UFG. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/sfvemcufg/weather-station>>. Acesso: 13 de setembro de 2020.

[11] Sistema de geração de energia solar fotovoltaica da EMC UFG. Disponível em: < <http://200.137.220.91>>. Acesso em: 13 de setembro de 2020.