

## Energia elétrica produzida por um sistema fotovoltaico versus dados meteorológicos – uma aplicação da correlação de pearson

## Electricity produced by a photovoltaic system versus meteorological data - an application of pearson correlation

DOI:10.34117/bjdv7n5-551

Recebimento dos originais: 07/04/2021

Aceitação para publicação: 03/05/2021

### **Janine Cavalcante de Oliveira**

Bacharelado

Universidade Federal de Goiás

Endereço completo: R. Mucuri, 920 - Parque Itatiaia, Aparecida de Goiânia - GO,  
74968-755

E-mail: janinecavalcanteoliveira@gmail.com

### **Fernando Nunes Belchior**

Doutorado

Universidade Federal de Itajubá

Endereço completo: R. Mucuri, 920 - Parque Itatiaia, Aparecida de Goiânia - GO,  
74968-755

E-mail: fnbelchior@ufg.br

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta como calcular e analisar o Coeficiente de Correlação de Pearson entre a energia produzida por um sistema de geração de energia fotovoltaica e alguns parâmetros meteorológicos. Para tanto, foram coletados dados coletados entre os dias 1º de novembro de 2016 e 28 de fevereiro de 2019, provenientes de uma usina fotovoltaica e de 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. Concluiu-se que o parâmetro de maior influência na geração de energia é a irradiação solar global horizontal. Além disso, 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 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%.

**Palavras-chave:** Correlação de Pearson, Energias Renováveis, Fotovoltaica, Regressão Linear.

### **ABSTRACT**

This paper presents how to calculate and analyze the Pearson Correlation Coefficient between the energy produced by a photovoltaic power generation system and some meteorological parameters. For this, data collected between November 1, 2016 and February 28, 2019, from a photovoltaic plant and a weather station installed in a building of the Federal University of Goiás were collected. For each parameter, monthly averages were calculated and, with these results, the correlations between the energy produced

and each of the meteorological data were obtained. It was concluded that the parameter with the greatest influence on energy generation is the global horizontal solar irradiation. In addition, linear regressions were calculated to verify the fit between the output power of the system and the meteorological data. The equation that best fit 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%.

**Keywords:** Pearson Correlation, Renewable Energy, Photovoltaics, Linear Regression.

## 1 INTRODUÇÃO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez por Edmond Becquerel. Após a sua descoberta as pesquisas não pararam mais. Atualmente, é possível encontrar módulos solares com eficiência próxima a 17% (1), com aplicação tanto nas áreas rurais quanto nas urbanas, bem como 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. Além disso, essas usinas podem não ser a melhor opção – considerando o aspecto financeiro -, pois 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; além de dispendiosas, são altamente poluentes.

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

Para a instalação dos módulos fotovoltaicos 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).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O efeito fotovoltaico foi observado pela primeira vez em 1893. 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. 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 (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.

## CORRELAÇÃO DE PEARSON

Para entender os efeitos de alguns parâmetros meteorológicos na geração de energia solar fotovoltaica, uma das ferramentas que pode ser utilizada é a Correlação de Pearson ( $r$ ), que 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 ( $r$ ) é definida no intervalo  $(-1,1)$ . O sinal indica direção negativa ou positiva do relacionamento e o valor absoluto 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 entre as variáveis pode ser obtido de acordo com a Figura 1:

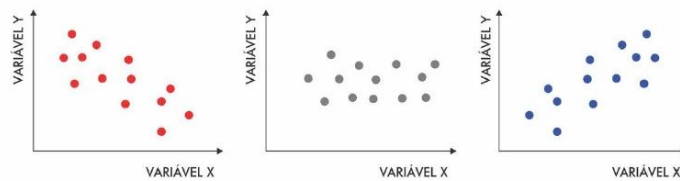
Figura 1 - Níveis de correlação de Pearson

Coefficiente	Relação
0-0,19	Muito fraca
0,2-0,37	Fraca
0,4-0,59	Moderada
0,6-0,79	Forte
0,81-1,0	Muito forte

Fonte: (Sales, 2015)

Fazendo o gráfico da distribuição dos valores analisados (7), tem-se algo similar ao que é encontrado na Figura 2 (8):

Figura 2 - 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; caso seja positiva, as grandezas são diretamente proporcionais.

## REGRESSÃO LINEAR

Outra ferramenta de análise a ser utilizada é a regressão linear, que consiste em uma análise estatística, com o objetivo de verificar a existência de uma relação funcional entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. A Equação 2 apresenta o modelo estatístico para a regressão.

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

onde:

- Y - Variável dependente.
- $\alpha$  - Constante de regressão.
- $\alpha_k$  - Coeficientes de regressão.

$X_k$  - Variáveis independentes.

### PERFIL DIÁRIO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Por fim, para que a relação entre as variáveis se torne ainda mais visível, serão 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 boa ou má geração de energia.

### 3 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, em Goiânia, Goiás.

A estação meteorológica, representada na Figura 3, 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 escala Celsius ( $^{\circ}C$ );
- um psicrômetro, que mede a umidade relativa do ar (%).

Figura 3 - 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.

Com relação ao sistema de energia solar fotovoltaica, 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. Dessa forma, foram coletados os dados mensais de produção de energia, que foram correlacionados com os parâmetros meteorológicos. Os resultados foram resumidos na Figura 4.

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 Figura 5, 6, 7, 8 e 9.

Com 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. Para tanto, foram utilizados dois conjuntos de dados, divididos da seguinte forma:

- Método 1 - 8 a 12 de fevereiro de 2019, período em que a produção de energia, que foi de 117,1 quilowatts-hora (kWh), aproximou-se da média geral de produção de energia, em todo o período analisado, que foi 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.

Para cada método descrito anteriormente, foi obtida uma equação. Posteriormente, essas equações foram testadas, utilizando os dados de geração e meteorológicos do dia 12 de janeiro de 2019, às 10:00 h.

Ainda, considerando que no dia 24 de dezembro de 2016 obteve-se a maior geração de energia, com 181,83 kWh, foram gerados gráficos, a título de comparação, entre os dias 18 de dezembro de 2018, em que se teve a segunda maior geração de energia e o dia 27 de setembro de 2017, 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 10 e 11.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Utilizando o *software* Libre Office Calc, foram obtidas as correlações entre todos os parâmetros a serem analisados, resumidos na Figura 4.

Figura 4 - Coeficiente de Correlação de Pearson entre as 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

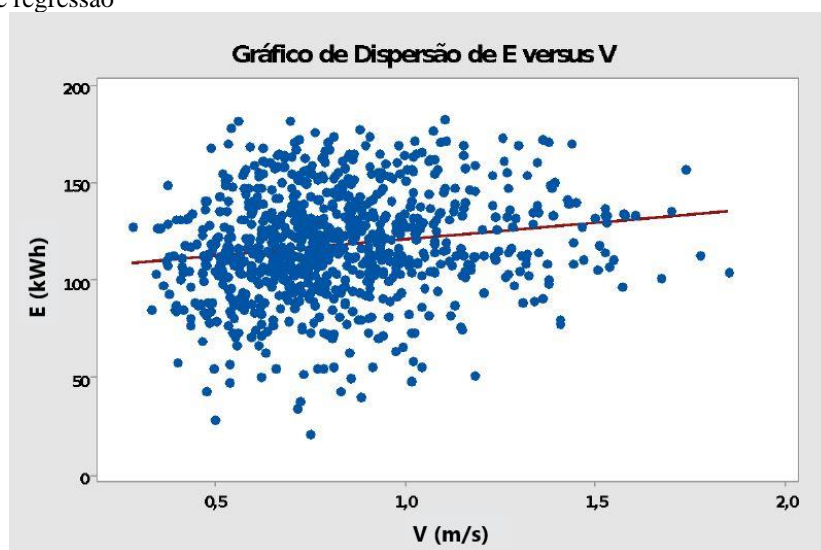
Os coeficientes de correlação de Pearson referentes aos parâmetros da Figura 4 são provenientes de medições ocorridas entre os dias 1º de novembro de 2016 e 28 de fevereiro de 2019.

### 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 Figura 1, 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, com a reta de regressão.

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) em kWh e a velocidade do vento (V) em m/s, com a reta de regressão



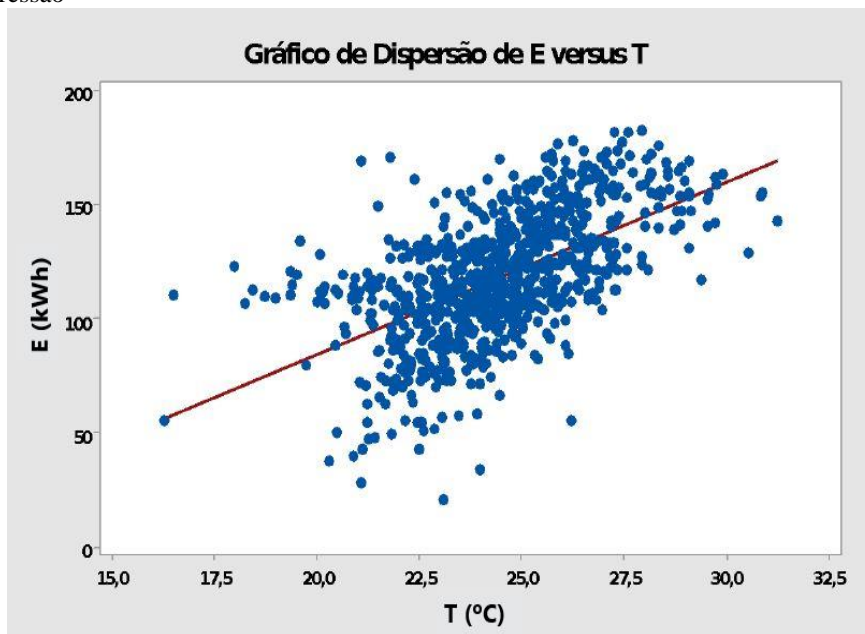
Fonte: Autores



## 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 Figura 1, que mostra que entre essas grandezas há um coeficiente de correlação igual a 0,58. É importante mencionar que a temperatura dos módulos influencia negativamente a geração de energia. Contudo, no estudo empreendido, a temperatura dos módulos não foi medida; mediu-se apenas a temperatura do ar.

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



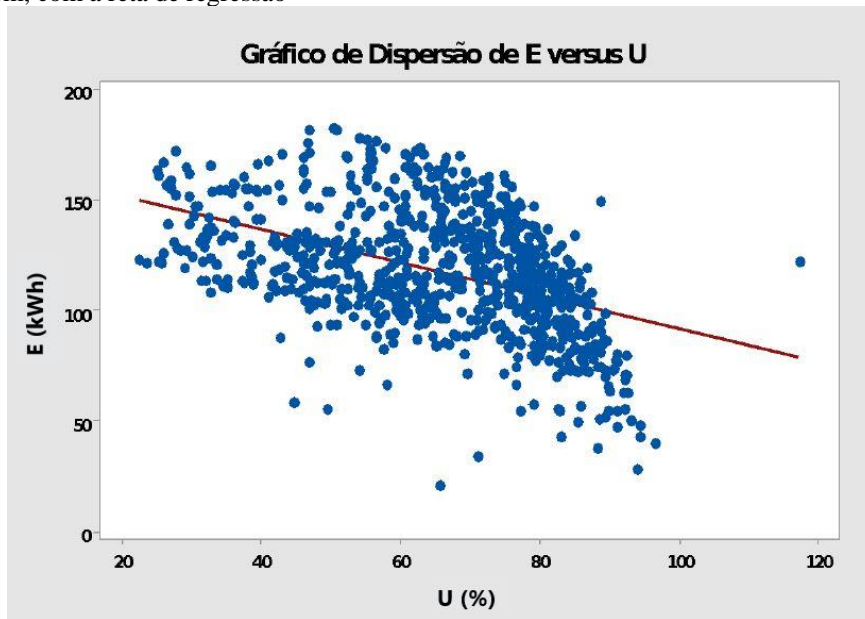
Fonte: Autores

## ENERGIA GERADA X UMIDADE RELATIVA DO AR

De acordo com a Figura 7, percebe-se que a relação entre as grandezas é moderada, sendo (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) em kWh e a umidade relativa do ar (U), em porcentagem, com a reta de regressão



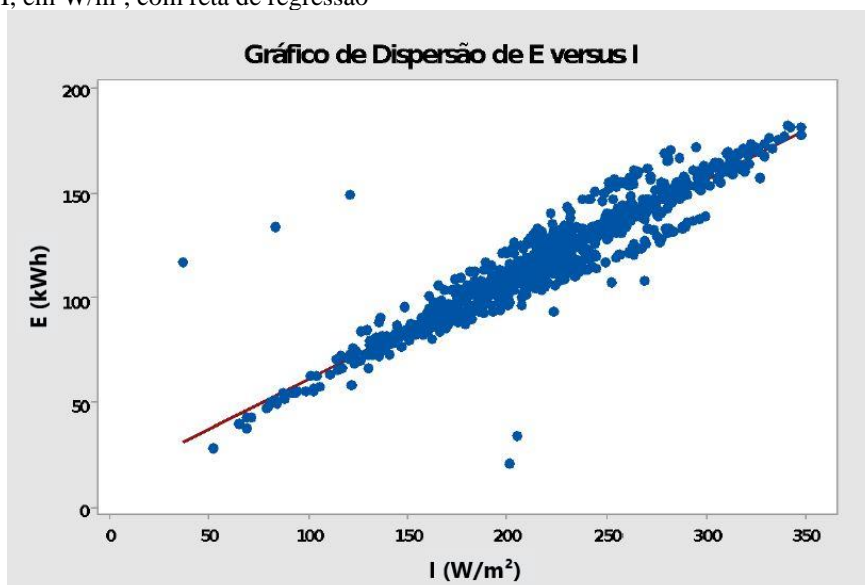
Fonte: Autores

### 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 Figura 1.

Com base na Figura 8, é possível observar a intensidade da relação entre os parâmetros. Salienta-se que a irradiação, dentre os parâmetros analisados, é a grandeza com maior influência na geração de energia fotovoltaica.

Figura 8 - Gráfico de dispersão entre energia produzida (E) em kWh e irradiação solar global no plano horizontal I, em W/m<sup>2</sup>, com reta de regressão

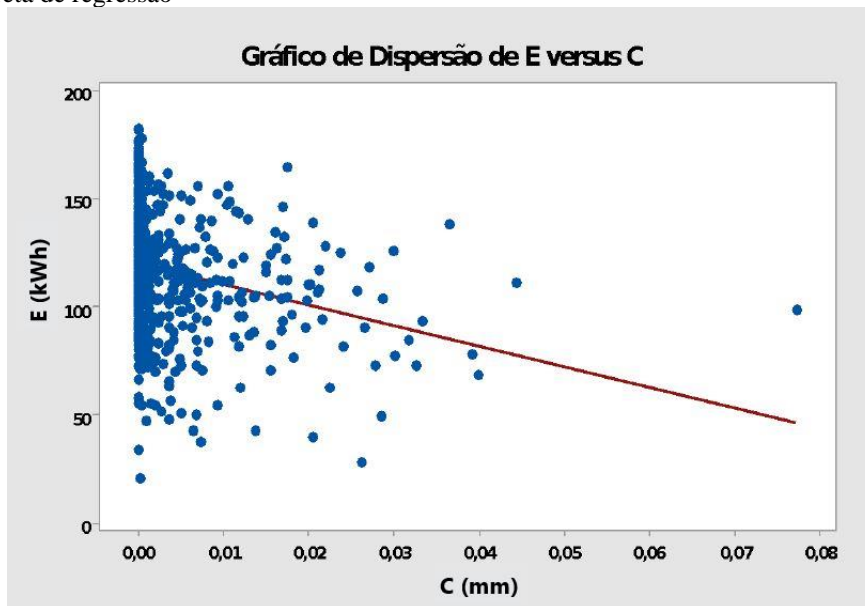


Fonte: Autores

## ENERGIA GERADA X PRECIPITAÇÃO

De acordo com a Figura 9, 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) em kWh e a precipitação pluviométrica (C) em mm, com reta de regressão



Fonte: Autores

## REGRESSÃO LINEAR

Foram considerados dois conjuntos de dados para gerar as equações de regressão linear. Dos 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:

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

Com 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 10:00 h, quando se tinha  $V=0,95$  m/s,  $T=25,6$  °C,  $U = 62,11\%$ ,  $C=0$

mm,  $I=229,8 \text{ W/m}^2$ ,  $P_{sis}=790\text{W}$ , sendo  $P_{sis}$  a potência produzida pelo sistema naquele momento.

Com base nesses dados, tem-se:  $P_{M1} = 738,78 \text{ W}$ , com erro de 6,5% e  $P_{M2} = 594,12 \text{ W}$ , com 24,8%. Portanto, percebe-se que a equação  $P_{M1}$  se encaixa melhor no modelo utilizado, apesar de apresentar menor confiança.

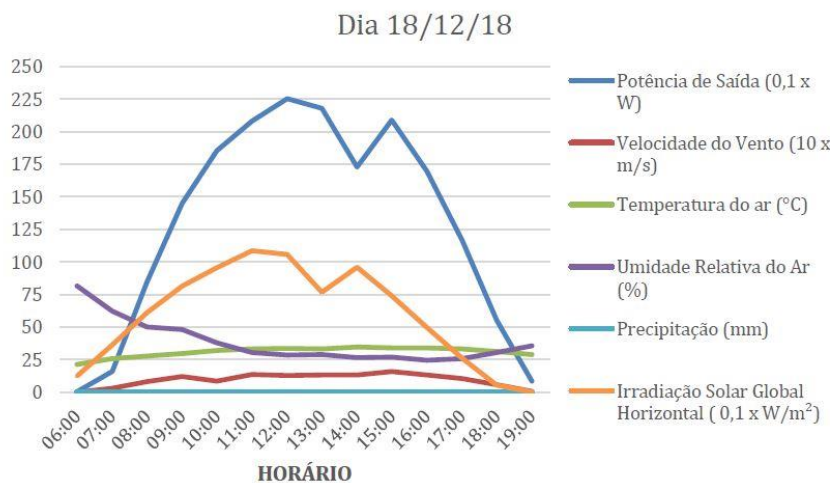
### PERFIL DIÁRIO DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Um dado interessante a ser observado é que a média mensal da produção de energia entre novembro de 2016 e janeiro de 2019 variou entre 99,1 e 142 kWh, sendo que a média da produção em todo o período analisado foi de 117,5 kWh.

Dos meses analisados, o mês de janeiro de 2019 foi o que apresentou a maior média mensal de produção de energia, com 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. Menciona-se que a potência possui comportamento similar à irradiação solar global horizontal, o que é esperado, uma vez que, como visto anteriormente, a correlação entre essas grandezas é alta. Além disso, é interessante observar que houve geração de energia entre 6:00 h e 19:00 h.

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

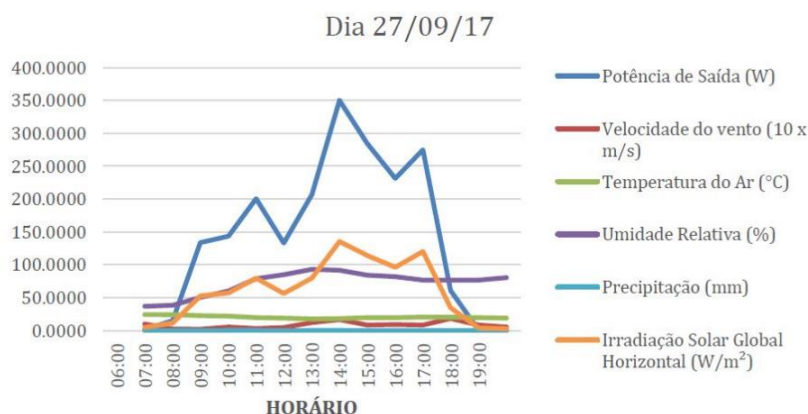


Fonte: Autores

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 de dezembro de 2018.

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 de setembro de 2017, tendo o valor de 65,6%, enquanto no dia 18 de dezembro de 2018 foi de 50,8%, o que pode ter influenciado na quantidade de nuvens no céu, causando sombreamento nos módulos fotovoltaicos.

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



Fonte: Autores

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a análise acerca do sistema de geração de energia solar fotovoltaica instalado no Bloco B da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação da Universidade Federal de Goiás, campus Goiânia. 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 64,2%.

Além disso, fez-se uma comparação entre os dias 18 de dezembro de 2018 e 27 de setembro de 2017, quando foram obtidos diferentes níveis de geração de energia, comparando a potência de saída e os dados meteorológicos.

Constatou-se que, nos momentos em que a umidade foi alta, a irradiação solar foi afetada; conseqüentemente, a potência de saída diminuiu. Ademais, é importa destacar 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 a geração de energia solar fotovoltaica, como era de se esperar. Além disso, nota-se que a produção de energia é favorecida à medida que a temperatura do ar aumenta e a umidade relativa diminui.

Com base no que foi apresentado, entende-se que este estudo contribui com a área a que se aplica, à medida em que estima os efeitos dos parâmetros meteorológicos na produção de energia. Em pesquisas futuras, pode ser interessante analisar a irradiação solar no plano inclinado, em vez de considerar a irradiação global no plano horizontal. Dessa forma, será possível obter uma correlação mais precisa entre a irradiação solar e a produção de energia.

## REFERÊNCIAS

- [1] TIPOS de painel solar fotovoltaico. **Portal Solar**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>. Acesso em maio de 2021.
- [2] BORES, H., BLOWER, A.P. Hidrelétricas se tornam insustentáveis dependendo de onde forem construídas. **O Globo**. 12 nov. 2018. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/meio-ambiente/hidreletricas-se-tornam-insustentaveis-dependendo-de-onde-forem-construidas-23215004>>. Acesso em maio de 2021
- [3] VILLALVA, M.G., GAZOLI, J.R. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações – sistemas isolados e conectados à rede. 1. 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. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/76/pdf>. Acesso em maio de 2021.
- [5] KOMP, R. J. **Practical photovoltaics: eletricity from solar cells**, 3a. ed., aatec publications: Ann Arbor, 2001.
- [6] SALES, B. F., DIAS, T. J. **Influência das condições meteorológicas na geração fotovoltaica - estudo de caso CERIn**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- [7] 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.
- [8] COEFICIENTES de Correlação. **Oper Data**. 2019. Disponível em: <<https://operdata.com.br/blog/coeficientes-de-correlacao/>>. Acesso em maio de 2021
- [9] SILVA, J. A. A. **Tratamento de Dados Meteorológicos e Análise de Desempenho do Sistema Fotovoltaico da EMC/UFG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e da Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019.
- [10] ESTAÇÃO Meteorológica EMC UFG. **Weather Station**. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/sfvemcufg/weather-station>>. Acesso em maio de 2021.
- [11] SISTEMA de geração de energia solar fotovoltaica da EMC UFG. **Theia Analyzer**. Disponível em: <<http://200.137.220.91>>. Acesso em maio de 2021.