

## GERAÇÃO FOTOVOLTAICA SOB A PERSPECTIVA DO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Acássio Marcelo Dias Pinto<sup>1</sup>  
Eduardo Crestana Guardia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Federal de Itajubá*

DOI: 10.47168/rbe.v30i3.948

### RESUMO

A energia solar fotovoltaica vem apresentando forte crescimento nos últimos anos por ser uma energia limpa, renovável, competitiva e acessível. Neste contexto, o Planejamento de Experimentos (DoE) tem como premissa a análise, modelagem e otimização de experimentos, com confiabilidade estatística, economia de dados e custos. Desta forma, foi analisada a geração fotovoltaica em função das variáveis meteorológicas: radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar, bem como a influência isolada e combinada de cada fator, com o objetivo de validar o modelo em condições incontroláveis e definir o ponto ótimo de operação. Os gráficos de Pareto e as Superfícies de Resposta embasam as equações de potência geradas, permitindo a previsão de resultados e estimativas futuras, assim como a definição dos pontos de ótimo técnico e econômico. Além disso, o estudo de caso demonstrou a validade do DoE em ambiente aberto e na operação dos painéis, possibilitando a identificação de ruídos ao longo das análises, tais como velocidade do vento e umidade relativa do ar. São situações ainda pouco exploradas na literatura, mesmo com alta eficiência na análise de ruídos e com potencial para contribuir no diagnóstico de falhas e em estudos preliminares para a implementação de novos projetos.

Palavras-chave: Eficiência energética; Conversão fotovoltaica; Variáveis meteorológicas; Economia de recursos.

### ABSTRACT

Photovoltaic solar energy has shown strong growth in recent years because it is a clean, renewable, competitive and accessible energy. In this context, the Design of Experiments (DoE) is premised on the analysis, modeling and optimization of experiments, with statistical reliability, data and cost savings. In this way, photovoltaic generation was analyzed according to meteorological variables: solar radiation, temperature, wind speed and relative humidity, as well as the isolated and combined influence of each factor, with the objective of validating

the model in uncontrollable conditions and define the optimal operating point. Pareto charts and Response Surfaces support the generated power equations, allowing the prediction of results and future estimates, as well as the definition of technical and economic optimal points. In addition, the case study demonstrated the validity of the DoE in an open environment and in the operation of the panels, allowing the identification of noise throughout the analyses, such as wind speed and relative humidity. These are situations still little explored in the literature, even with high efficiency in noise analysis and with the potential to contribute to the diagnosis of failures and preliminary studies for the implementation of new projects.

Keywords: Energy efficiency; Photovoltaic conversion; Meteorological variables; Resource savings.

## 1. INTRODUÇÃO

Os padrões de vida atuais evidenciam a crescente necessidade e dependência de energia. Durante muito tempo, recursos naturais foram utilizados de forma insustentável para suprir essa demanda. A busca por fontes renováveis de energia impulsionou a evolução tecnológica e a implementação de energia solar no mundo. Espera-se que a capacidade instalada de painéis fotovoltaicos atinja 22% da geração global de eletricidade em 2050, promovendo um sistema energético mais sustentável e trazendo benefícios em segurança energética e desenvolvimento socioeconômico. O Método de Planejamento de Experimentos (DoE) pode melhorar o planejamento e reduzir custos, estimando os efeitos e interações entre fatores de influência e parâmetros de resposta, determinando assim o melhor modelo preditivo (KESSAISSIA et al., 2020a).

O DoE, baseado em cálculos estatísticos, auxilia na análise, modelagem e otimização de experimentos, permitindo investigar os efeitos de variáveis de entrada em variáveis de saída, simultaneamente. Isso facilita a alternância de diferentes variáveis e determina a forma mais rentável de operá-las (KESSAISSIA et al., 2020a; KESSAISSIA et al., 2020b).

A estatística baseia o uso do DoE em otimização de processos, identificando rapidamente informações cruciais do processo e evidenciando possibilidades de melhorias com alta significância (KORAN et al., 2013). Este artigo, baseado na dissertação de mestrado do primeiro autor, sob orientação do segundo, tem como objetivo específico analisar a geração fotovoltaica em função das variáveis meteorológicas: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), velocidade do vento ( $\text{m}/\text{s}$ ) e umidade relativa (%), utilizando o DoE. Busca-se verificar a validade e a predição do DoE em condições ambientais incontroláveis e determinar o ponto ótimo de operação dos painéis solares.

Para uma análise mais detalhada deste estudo consulte Pinto (2023).

## 2. MODELAGEM TEÓRICA

### 2.1 Planejamento de experimentos (DoE)

O DoE determina o número de experimentos a serem realizados de acordo com um objetivo bem definido, analisando diversos fatores simultaneamente, mitigando a dispersão relacionada às medições, estimando os efeitos de interação entre os fatores e, por fim, avaliando o nível de influência de cada fator e suas interações (CUBAS et al., 2014). Desta forma, o DoE leva em consideração apenas os parâmetros de entrada e saída do sistema estudado, e na ausência de qualquer informação específica sobre as ligações entre essas entradas e saídas, pode-se modelar todos os sistemas por uma relação polinomial geral. O desenvolvimento desta relação universal dá a seguinte equação polinomial:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{\substack{i,j=0 \\ i < j}}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 \tag{1}$$

Em que  $y$  é a resposta medida do sistema estudado,  $x_i$  são seus parâmetros ou fatores de entrada e  $a_i$  são os coeficientes do modelo.

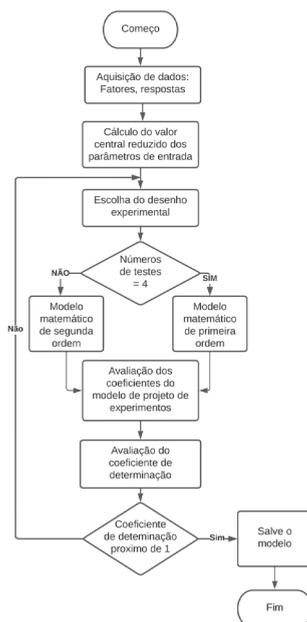


Figura 1 - Fluxograma com o método do DoE

Sendo assim, o método pode ser resumido da seguinte forma, conforme o fluxograma apresentado na Figura 1 (KESSAISSIA et al., 2020). Inicialmente, os dados de interesse são adquiridos, fornecendo dados de entrada (fatores) e saída (resposta) do sistema. Na sequência, é definido o valor central reduzido de cada fator, em que cada fator deve ser limitado por ambas as extremidades, sendo o limite superior +1 e o limite inferior -1.

Inicialmente, com quatro tentativas, o método produzirá o desenvolvimento de equações de primeira ordem do modelo matemático para a resposta considerada. Até quatro tentativas, e quando o número de tentativas for igual ao número de equações, o modelo matemático de segunda ordem é imposto. Esses sistemas de equações são simplificados por um sistema matricial com coeficientes desconhecidos que necessitam de resolução com métodos numéricos. A substituição desses coeficientes nos modelos preditivos fornece os valores calculados das respostas. Já uma avaliação da diferença entre o valor medido e o calculado leva em consideração os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), que devem ser iguais a 1. Quando  $R^2$  tende a 1, o modelo preditivo reproduz as medidas reais, correspondendo assim a um modelo preciso; caso contrário, a escolha de outro desenho experimental das medidas se faz necessária (KESSAISSIA et al., 2020a).

## 2.2 Variáveis Meteorológicas

A eficiência e a durabilidade dos sistemas fotovoltaicos são fortemente influenciadas por variáveis meteorológicas. Diversos trabalhos científicos apontam para uma lacuna na compreensão de como condições meteorológicas, como radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa, afetam a geração fotovoltaica.

A radiação solar, a principal fonte de energia para os painéis solares, é a energia radiante emitida pelo sol a partir de uma reação de fusão nuclear, quantificada em termos de fluxo e densidade de potência. Segundo Villalva (2015), a radiação é expressa pela razão instantânea entre potência e área [ $W/m^2$ ]. A conversão direta da radiação solar em energia elétrica ocorre nos painéis solares; no entanto, fatores como reflexão, poluição, poeira e sedimentos acumulados nos painéis podem reduzir significativamente a geração de energia. Estudos, como os de Gökmen et al. (2016), Krauter (2004), Verma et al. (2011), Syafiq et al. (2018) e Sayigh (2019), discutem amplamente essas questões.

O espectro luminoso responsável pelo efeito fotoelétrico também causa o aquecimento das placas solares, resultando em perdas térmicas, redução da eficiência dos painéis e diminuição de sua vida útil. Diversos autores, como Hadipour et al. (2021), Bahaidarah (2016), Jakhar et al. (2017), Firoozzadeh et al. (2019) e Castanheira et al. (2018), exploram esses impactos negativos.

Dado que a radiação solar aquece os painéis e a temperatura reduz a eficiência energética, várias pesquisas, incluindo as de Naghavi et al. (2021), Shiravi et al. (2022), Gökmen et al. (2016), Kim et al. (2019) e Sarhaddi et al. (2010), investigam métodos para mitigar esses efeitos térmicos. Destacam-se as técnicas de resfriamento ativo e passivo, com o vento desempenhando um papel crucial na troca de calor entre o módulo fotovoltaico e o ambiente, seja por meio de ventilação natural ou com o auxílio de ventiladores.

### **3. METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO**

#### **3.1 Caracterização das variáveis de interesse**

Os dados de radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa foram obtidos da estação meteorológica automática localizada no campus da UNIFEI, com latitude  $22^{\circ}24'41.10''\text{S}$  e longitude  $45^{\circ}26'51.31''\text{O}$ , gerenciada pelo Centro de Previsão e Estudos de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG).

Os dados de geração, por sua vez, foram adquiridos do Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica (QMAP), que monitora 112 módulos fotovoltaicos da Yingli Solar (YL245P-29b), cada um com uma potência de 245 W, totalizando uma potência instalada de 27,44 kWp. Estruturalmente, os painéis têm uma inclinação de  $23^{\circ}$  e um desvio azimutal de  $-5^{\circ}$ .

#### **3.2 Análise de dados**

Este estudo se diferencia ao considerar uma situação real de campo. Os dados utilizados derivam de observações meteorológicas próximas à área de estudo e são sujeitos a todas as variações das condições meteorológicas.

Nesse sentido, este estudo de caso foi realizado em seis etapas, descritas na sequência de subseções.

##### **3.2.1 Etapa I**

Preliminarmente, a Tabela 1 (PINTO, 2023) apresenta as correlações entre a potência, horário e as quatro variáveis meteorológicas. Desta forma, como já se previa, a radiação solar influencia significativamente a potência, seguida pela temperatura, que impacta de forma moderada, e o horário de forma insignificante. Os valores para velocidade do vento e o horário tendem a zero, indicando que não existe uma relação linear forte entre essas variáveis e a potência. E por fim, a umidade apresenta coeficiente negativo, evidenciando que o aumento da potência ocorre quando se tem a redução da umidade. Vale ressaltar

que as correlações indicam associações estatísticas entre as variáveis, mas não fornecem informações sobre causalidades.

Tabela 1 – Correlações entre variáveis

|                         | Pot.[kW] | Rad.[W/m <sup>2</sup> ] | Temp.[°C] | UR.[%] |
|-------------------------|----------|-------------------------|-----------|--------|
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ] | 0,966    |                         |           |        |
| Temp.[°C]               | 0,354    | 0,340                   |           |        |
| UR.[%]                  | -0,381   | -0,340                  | -0,769    |        |
| Vel.Vento[m/s]          | 0,056    | 0,062                   | 0,113     | -0,256 |
| Horário                 | -0,070   | -0,116                  | 0,766     | -0,780 |

Por meio da análise do gráfico linear de regressão, apresentado na Figura 2 (PINTO, 2023), o ponto de máxima potência é em  $y = 23,13\text{kW}$ , com radiação solar igual a  $809\text{W/m}^2$ , temperatura igual a  $6,60^\circ\text{C}$ , velocidade do vento igual a  $0\text{ m/s}$  e umidade relativa de  $36\%$ . Ou seja, a melhor operação ocorre em condições de baixa umidade relativa, em dias com baixa amplitude térmica.

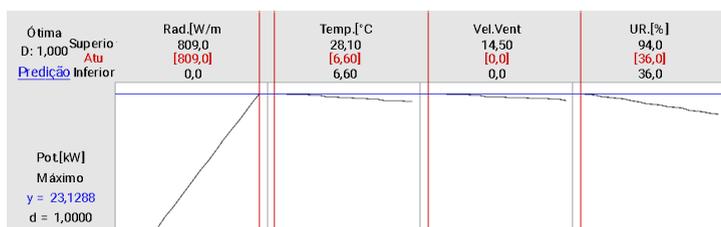


Figura 2 - Resposta ótima, com 2499 dados e 4 variáveis

A compreensão dessa primeira etapa permite uma melhor otimização do sistema, visando maximizar a potência gerada e alcançar a eficiência energética desejada, porém com um elevado número de dados. Desta forma, as próximas etapas buscam mitigar o número de informações com confiabilidade e predição, que norteiam todo projeto de geração.

### 3.2.2 Etapa II

Esta etapa é realizada com base no DoE, superfície de resposta, composto por uma série temporal de 188 dados e elevado número de repetições, possibilitando um alto grau de liberdade estatística, definindo erros e determinando quais termos mais contribuem para a resposta, que é a potência gerada.

De forma preliminar, o gráfico de Pareto, mostrado na Figura

3 (PINTO, 2023), compara a magnitude relativa e a significância dos efeitos principais quadráticos e interações. Com isso, também é possível identificar a radiação solar com efeito significativo, de primeira e segunda ordem, e temperatura e umidade com menor significância, porém ambos parâmetros com efeitos quadráticos, indicando que a relação entre tais fatores e a resposta segue uma linha curva, conforme mostrado na Figura 4 (PINTO, 2023).

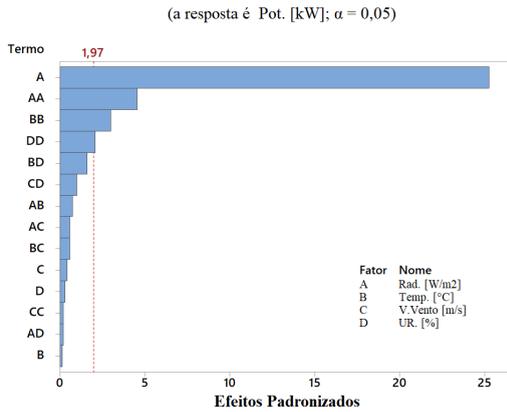


Figura 3 - Gráfico de Pareto para 188 dados e 4 variáveis

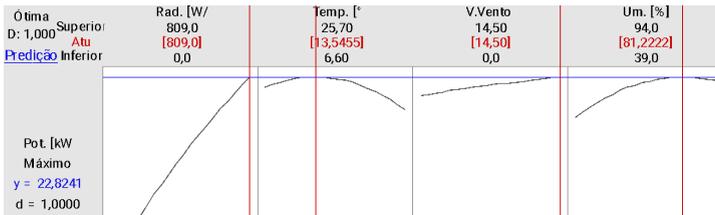


Figura 4 - Resposta ótima com 188 dados

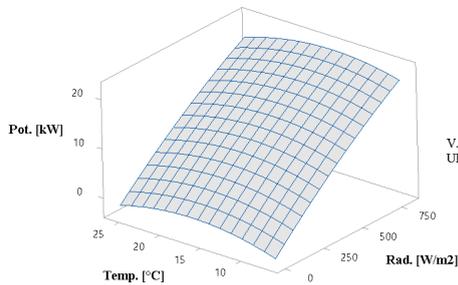


Figura 5 - Gráfico de Superfície

Já pela superfície de resposta, apresentada na Figura 5 (PINTO, 2023), é possível verificar que radiação solar e temperatura são os fatores de maior influência e interação com a potência gerada. Em dias com alta radiação solar, associado a temperatura mais amena (entre 13°C) a potência gerada é maior, e vice-versa. Desta forma, é possível chegar ao resultado similar a Etapa I, em que o ponto ótimo de potência é  $y = 22,8241\text{kW}$ , com radiação solar de  $809\text{ W/m}^2$ , temperatura em  $13,54^\circ\text{C}$ , velocidade do vento igual a  $14,5\text{ m/s}$  e umidade relativa de 81%.

### 3.2.3 Etapa III

Identificada a convergência entre as duas primeiras etapas, a Etapa III busca reduzir o número de dados analisados ao menor número possível. Desta forma, após identificar os fatores relevantes o estudo é realizado considerando 4 fatores, 24 pontos fatoriais e 2 pontos centrais sendo necessários 26 dados.

O resultado obtido então apresenta significativa discrepância do observado nas Etapas I e II. Pelo gráfico de Pareto, mostrado na Figura 6 (PINTO, 2023), é possível identificar diferenças, pois apesar da radiação solar e sua relação quadrática ser a de maior significância, a interação entre radiação solar e umidade relativa também apresenta significância, o que não foi observado na Figura 3. Além disso, a interação entre radiação solar e temperatura também se altera, e não é tão significativa como mostrado nas etapas anteriores. Porém, isso se justifica pelo fato de que desde a Etapa I é possível constatar que velocidade do vento e umidade relativa são ruídos, pois não foram identificadas correlações estatísticas entre essas variáveis e a potência gerada.

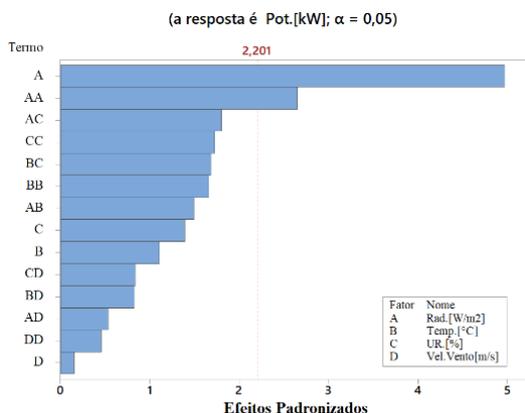


Figura 6 - Gráfico de Pareto

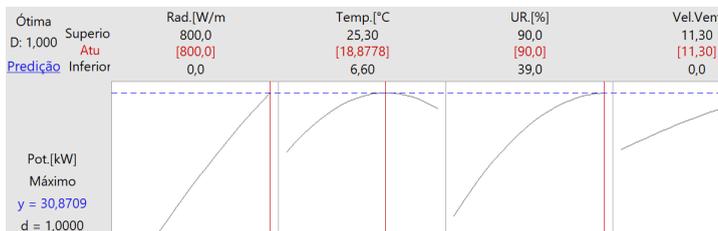


Figura 7 - Resposta ótima

A Tabela 2 (PINTO, 2023), de coeficientes codificados, corrobora com a constatação de que a velocidade do vento e umidade relativa estão poluindo os resultados, pois apresentam elevado VIF (Variance Inflation Factor): Vel. Vent (VIF de 31,15) e UR[%] (VIF = 101,91). Isso indica a presença de multicolinearidade e coeficientes não confiáveis com a ampliação dos erros, acarretando a interpretações incorretas dos resultados. Desta forma, por apresentar elevado VIF e significativa variação nas análises anteriores é indicado realizar novas análises desconsiderando a velocidade do vento, com o intuito de se ter respostas de maior confiabilidade e validade estatística.

Tabela 2 – Coeficientes Codificados com 20 dados 4 variáveis

| Termo                         | Coef  | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF    |
|-------------------------------|-------|------------|---------|---------|--------|
| Constante                     | 12,98 | 1,13       | 11,44   | 0,000   |        |
| Rad.[W/m²]                    | 8,92  | 1,79       | 4,97    | 0,000   | 41,29  |
| Temp.[°C]                     | 3,89  | 3,51       | 1,11    | 0,292   | 183,29 |
| UR.[%]                        | 3,36  | 2,42       | 1,39    | 0,192   | 101,91 |
| Vel.Vento[m/s]                | -0,32 | 2,09       | -0,15   | 0,883   | 31,15  |
| Rad.[W/m²]*Rad.[W/m²]         | 2,353 | 0,887      | -2,65   | 0,023   | 3,47   |
| Temp.[°C]*Temp.[°C]           | -7,55 | 4,55       | -1,66   | 0,125   | 99,47  |
| UR.[%]*UR.[%]                 | -6,53 | 3,79       | -1,73   | 0,112   | 77,17  |
| Vel.Vento[m/s]*Vel.Vento[m/s] | -0,87 | 1,92       | -0,45   | 0,659   | 10,60  |
| Rad.[W/m²]*Temp.[°C]          | 7,52  | 5,03       | 1,49    | 0,163   | 167,94 |
| Rad.[W/m²]*UR.[%]             | 9,67  | 5,35       | 1,81    | 0,098   | 166,02 |
| Rad.[W/m²]*Vel.Vento[m/s]     | 1,20  | 2,26       | 0,53    | 0,605   | 22,26  |
| Temp.[°C]*UR.[%]              | 10,89 | 6,47       | -1,68   | 0,121   | 337,92 |
| Temp.[°C]*Vel.Vento[m/s]      | 4,31  | 5,21       | 0,83    | 0,426   | 151,12 |
| UR.[%]*Vel.Vento[m/s]         | 4,04  | 4,82       | 0,84    | 0,419   | 143,74 |

### 3.2.4 Etapa IV

Dado o alto valor de VIP para a variável velocidade do vento, uma nova etapa foi realizada repetindo os processos da Etapa III, mas

agora desconsiderando a velocidade do vento por apresentar elevada discrepância e ser o fator menos correlacionado. E como o método DoE possibilita trabalhar com infimidade de variáveis, foi realizada a redução do número de dados com a redução da variável velocidade vento. Assim, agora trabalhando com 20 dados, sendo 3 fatores, culminando em 23 pontos fatoriais e 2 pontos centrais, voltamos a ter um resultado semelhante às Etapas I e II, em que a interação entre radiação solar e temperatura são significativos.

Com isso, ao verificar os resultados na Tabela 3 (PINTO,2023) é possível identificar que as variáveis temperatura e umidade relativa apresentam valores de VIF consideravelmente altos, indicando novamente a presença de multicolinearidade entre essas variáveis independentes. Tal multicolinearidade pode afetar a interpretação dos coeficientes e a precisão das estimativas no modelo estatístico, acarretando em redundâncias. Desta forma, uma nova análise foi realizada (Etapa V), em que a variável umidade relativa foi desconsiderada.

Tabela 3 – Coeficiente codificados com 20 dados e 3 variáveis

| Termo   | Coef   | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF     |
|---|--------|------------|---------|---------|---------|
| Constante                                       | 11,834 | 0,522      | 22,67   | 0,000   |         |
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ]                         | 10,823 | 0,785      | 13,78   | 0,000   | 11,00   |
| Temp.[°C]                                       | 6,77   | 4,06       | 1,67    | 0,126   | 408,03  |
| UR.[%]  | 5,25   | 3,69       | 1,42    | 0,185   | 323,06  |
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ]*Rad.[W/m <sup>2</sup> ] | -1,741 | 0,718      | -2,42   | 0,036   | 2,80    |
| Temp.[°C]*Temp.[°C]                             | -18,4  | 10,9       | -1,69   | 0,123   | 986,77  |
| UR.[%]*UR.[%]                                   | -11,57 | 9,73       | -1,19   | 0,262   | 688,12  |
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ]*Temp.[°C]               | -1,41  | 2,70       | -0,52   | 0,613   | 59,74   |
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ]*UR.[%]                  | -0,76  | 2,95       | -0,26   | 0,802   | 47,33   |
| Temp.[°C]*UR.[%]                                | -28,4  | 20,3       | -1,40   | 0,192   | 3023,80 |

### 3.2.5 Etapa V

Após a remoção dos fatores identificados como ruídos, velocidade do vento e umidade relativa, uma nova análise pelo método DoE foi realizada, pois o método de superfície de resposta possibilita a redução do número de dados para apenas 10, sendo dois fatores, culminando com 4 pontos fatoriais e 2 pontos centrais. Porém, por questões de conservadorismo, foram utilizados 20 dados, abrindo margem para a identificação de erros.

Nesse contexto, refazendo as análises considerando apenas as duas variáveis de maior interação com a potência, radiação solar e temperatura, foram observados resultados semelhantes aos da Etapa I e II, conforme demonstrado pelo gráfico de Pareto na Figura 8,

(PINTO,2023). Também é possível identificar uma tendência de linearidade entre radiação solar e potência gerada pelo gráfico de superfície. Uma temperatura intermediária de operação de 15°C é identificada pelo gráfico de contorno e explicitada pela resposta ótima,  $y = 21,67$  kW,  $Rad = 800$  W/m<sup>2</sup> e  $Temp = 15,3$ °C, conforme Figura 9 (PINTO, 2023).

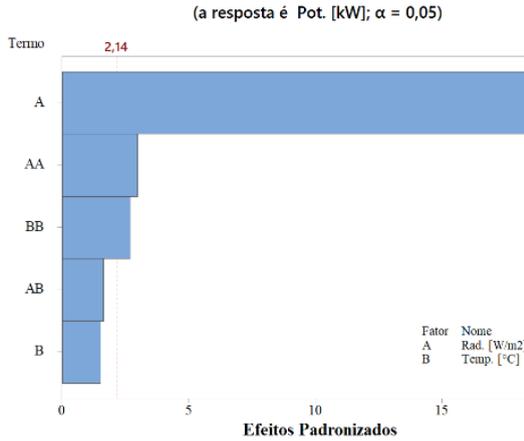


Figura 8 - Gráfico de Pareto

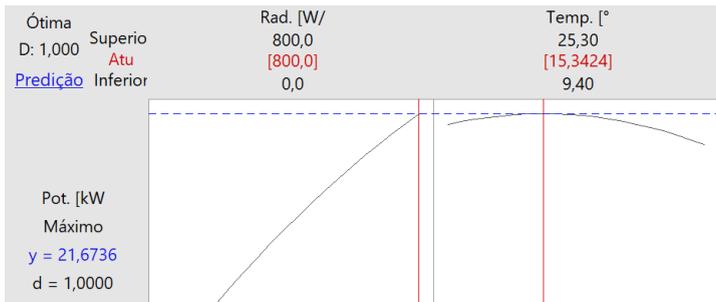


Figura 9 - Resposta ótima

Embasado pela tabela de coeficientes codificados é possível obter a equação da potência em função da radiação solar e temperatura (Equação 2). O resultado é resguardado por um ótimo ajuste ( $R^2=99,32\%$ ), assim com elevado coeficiente de previsão ( $R^2\text{-predi}=98,59\%$ ).

$$P = 12,038 + 11,153R + 0,699T - 1,632R^2 - 1,781T^2 - 1,604RT \quad (2)$$

Apesar de se ter encontrado um modelo com ótimo ajuste, o modelo ainda apresenta uma equação com várias interações e termos quadráticos. O VIF foi reduzido ao longo das etapas, mas ainda permanece acima de 5 em alguns fatores, o que não é recomendado pela literatura (BUTLER, 2006). Desta forma, um ajuste mais preciso se faz necessário a fim de se chegar a um modelo robusto, visto que a colinearidade pode causar estimativas de parâmetros instáveis, modelos não confiáveis e capacidade preditiva fraca.

### 3.2.6 Etapa VI

Na busca de um modelo mais simples, tão robusto quanto, com baixa multicolinearidade e com alta previsibilidade, é possível refazer a análise da etapa anterior (Etapa V), porém utilizando o método discutido na teoria do DoE, Planejamento fatorial de dois níveis. Para esse modelo, com 2 variáveis são necessários apenas 4 dados de potência gerada, e cabe ressaltar que não há grau de liberdade para se identificar erros nessa análise. Desta forma serão utilizados os mesmos 20 dados da Etapa V na busca por um modelo mais robusto, preditivo e confiável estatisticamente.

O gráfico de Pareto da Figura 10 (PINTO, 2023) evidencia o efeito principal e a forte interação entre os fatores. O gráfico de superfície e contorno se aproximam do gráfico construído na Etapa V, porém com forma mais regular, o que simplifica o modelo, facilitando análises, sem perda de confiabilidade.

A Tabela 4 (PINTO, 2023) de coeficientes codificados, converge com as análises preliminares e teoria em que a potencia apresenta coeficiente positivo para a radiação solar e negativo para a temperatura e sua interação com a radiação solar, demonstrando um efeito antagônico das variáveis. Tais constatações são corroboradas pelo baixo valor do Valor-P e do VIF, indicando elevada confiabilidade nesse modelo mais simplista.

Tabela 4 – Coeficientes Codificados, com 2 variáveis

| Termo                             | Efeito | Coef   | EP de Coef | Valor-T | Valor-P | VIF  |
|-----------------------------------|--------|--------|------------|---------|---------|------|
| Constante                         |        | 11,152 | 0,207      | 53,92   | 0,000   |      |
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ]           | 25,215 | 12,607 | 0,428      | 29,47   | 0,000   | 1,92 |
| Temp.[°C]                         | -0,792 | -0,396 | 0,350      | -1,13   | 0,275   | 1,79 |
| Rad.[W/m <sup>2</sup> ]*Temp.[°C] | -7,938 | -3,969 | 0,737      | -5,39   | 0,000   | 2,61 |

Comparando essa análise com o resultado da Etapa V, o desvio padrão residual teve seu valor elevado, conforme é apresentado na Tabela 5 (PINTO, 2023), o que já era esperado dada a simplificação do modelo,

porém os coeficientes de determinação ( $R^2=98,8\%$  e  $R^2\text{-pred}=98,4\%$ ) se mantiveram alto, indicando que o modelo tem um ótimo ajuste, e é capaz de fazer previsões precisas para novos dados, conforme explicitado pela equação de regressão (Equação 3).

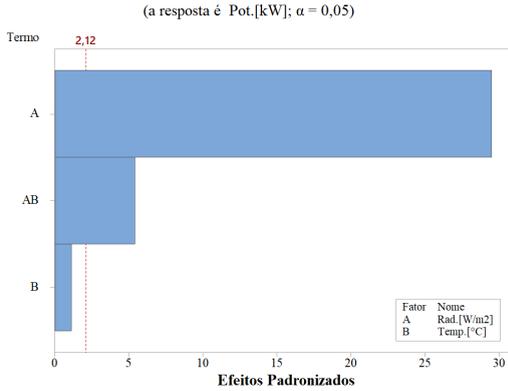


Figura 10 - Gráfico de Pareto

Tabela 5 – Coeficientes de determinação

| S        | R <sup>2</sup> | R <sup>2</sup> (aj) | R <sup>2</sup> (pred) |
|----------|----------------|---------------------|-----------------------|
| 0,729095 | 98,80%         | 98,58%              | 98,04%                |

$$P = -9,25 + 0,05317 R + 0,4494 T - 0,001248 R * T \quad (3)$$

Com o objetivo de verificar a validade do modelo de forma empírica, foi escolhido o dia 17/05/2023. Os dados de radiação solar e temperatura do ar foram registrados pela estação meteorológica automática, enquanto os dados de geração foram obtidos pelo WebSolar, com intervalo de 15 minutos entre as medidas.

Os dados foram tabulados e posteriormente foram substituídos os valores de temperatura e radiação solar na Equação 3, verificando a simplicidade, robustez e alta capacidade de predição do modelo, visto que o valor teórico e real convergiram para valores similares, com uma diferença mínima, conforme Figura 11 (PINTO, 2023).

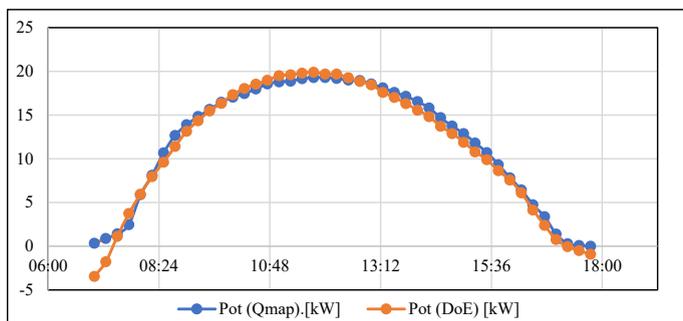


Figura 11 - Geração teórico e real em 17/05/2023

#### 4. CONCLUSÃO

Com o objetivo de validar o DoE em condições incontroláveis e de se definir o ponto ótimo de operação da geração fotovoltaica em função das variáveis meteorológicas, este estudo fez uso da Superfície de Resposta e do Fatorial Completo. Devido à fácil modelagem matemática, que possibilita a otimização de resultados com um pequeno conjunto de dados, tem-se economia de recursos, com elevada confiabilidade estatística e robusta predição.

Os resultados obtidos são corroborados pela literatura, explicitando que o ambiente adequado para a geração fotovoltaica se dá com elevada radiação solar em temperaturas amenas ( $15^{\circ}\text{C}$ ), e que a temperatura atmosférica impacta diretamente no rendimento do sistema. Como o estudo foi realizado em condições reais de operação, o sistema não foi submetido a variações extremas ou controladas, conforme estudos laboratoriais, porém mesmo assim os resultados aqui encontrados tendem aos resultados dos estudos em ambientes controlados, ou seja, isso demonstra a robustez e confiabilidade do DoE.

O estudo de caso buscou a validação do DoE em campo, se mostrando extremamente eficiente para definir ruídos na análise. Desta forma, o método pode ser utilizado para diagnóstico de falhas, análise de sensibilidade, identificação de pontos críticos, inconsistência, dimensionamento, disposição dos painéis, controle de sombreamento, comportamento da carga com utilização de dispersores de água, uso de painel flutuante em água, temas que podem ser aprofundados e explorados por novos estudos na busca pelo aperfeiçoamento da geração solar.

Em suma, este trabalho demonstrou a validade e relevância do DoE na análise da geração fotovoltaica, explicitando suas vantagens em termos de eficiência, confiabilidade e economia de recursos. Os resultados obtidos possibilitam o avanço de novas pesquisas nesse campo promissor e em franca expansão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAHAIDARAH, H. M. S. Experimental performance evaluation and modeling of jet impingement cooling for thermal management of photovoltaics. *Solar Energy*, v. 135, p. 605-617, 2016.

BUTLER, N. A. On the minimum bias response surface designs of Box and Draper. *Journal of statistical planning and inference*, v. 136, n. 9, p. 3221-3230, 2006.

CASTANHEIRA, A. F. A.; FERNANDES, J. F. P.; BRANCO, P. J. C. Demonstration project of a cooling system for existing PV power plants in Portugal. *Applied Energy*, v. 211, p. 1297-1307, 2018.

CUBAS, J.; PINDADO, S.; MANUEL, C. Explicit expressions for solar panel equivalent circuit parameters based on analytical formulation and the Lambert W-function. *Energies*, v. 7, p. 4098-4115, 2014.

FIROOZZADEH, M.; SHIRAVI, A.; SHAFIEE, M. An experimental study on cooling the photovoltaic modules by fins to improve power generation: economic assessment. *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, v. 10, n. 2, p. 80-84, 2019.

GÖKMEN, N.; HU, W.; HOU, P.; CHEN, Z.; SERA, D.; SPATARU, S. Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations. *Renewable Energy*, v. 90, p. 283-290, 2016.

HADIPOUR, A.; ZARGARABADI, M. R.; RASHIDI, S. An efficient pulsed-spray water cooling system for photovoltaic panels: Experimental study and cost analysis. *Renewable Energy*, v. 164, p. 867-875, 2021.

JAKHAR, S.; SONI, M. S.; GAKKHAR, N. An integrated photovoltaic thermal solar (IPVTS) system with earth water heat exchanger cooling: Energy and exergy analysis. *Solar Energy*, v. 157, p. 81-93, 2017.

KESSAISSIA, F. Z.; ZEGAOU, A.; AILLERIE, M.; ARAB, M.; BOUTOUBAT, M.; FARES, C. Factorial design and response surface optimization for modeling photovoltaic module parameters. *Energy Reports*, v. 6, p. 299-309, 2020a.

KESSAISSIA, F. Z.; ZEGAOU, A.; TALEB, R.; FARES, C.; AILLERIE, M. Design of experiments approach for modeling the electrical response of a photovoltaic module. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 20, n. 3, p. 1140-1147, 2020b.

KIM, S. M.; KIM, J. H.; KIM, J. T. Experimental study on the thermal and electrical characteristics of an air-based photovoltaic thermal collector. *Energies*, v. 12, n. 14, p. 2661, 2019.

KORAN, A.; LABELLA, T.; LAI, J. S. High efficiency photovoltaic source simulator with fast response time for solar power conditioning systems evaluation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 29, n. 3, p. 1285-1297, 2014.

KRAUTER, S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 82, n. 1-2, p. 131-137, 2004.

NAGHAVI, M. S.; ESMAEILZADEH, A.; SINGH, B.; ANG, B. C.; YOON, T. M.; ONG, K. S. Experimental and numerical assessments of underlying natural air movement on PV modules temperature. *Solar Energy*, v. 216, p. 610-622, 2021.

PINTO, A. M. D. Geração fotovoltaica: análise dos fatores de influência em função do Planejamento de Experimentos (DoE). Orientador: Eduardo Crestana Guardia. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/3866>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SARHADDI, F.; FARAHAT, S.; AJAM, H.; BEHZADMEHR, A. M. I. N.; ADELI, M. M. An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector. *Applied energy*, v. 87, n. 7, p. 2328-2339, 2010.

SAYIGH, A. (Ed.). *Renewable Energy and Sustainable Buildings: Selected Papers from the World Renewable Energy Congress WREC 2018*. Springer Nature, 2019.

SHIRAVI, A. H.; FIROOZZADEH, M.; LOTFI, M. Experimental study on the effects of air blowing and irradiance intensity on the performance of photovoltaic modules, using Central Composite Design. *Energy*, v. 238, p. 121633, 2022.

SYAFIQ, A.; PANDEY, A. K.; ADZMAN, N. N.; ABD RAHIM, N. Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels. *Solar Energy*, v. 162, p. 597-619, 2018.

VERMA, L. K.; SAKHUJA, M.; SON, J.; DANNER, A. J.; YANG, H.; ZENG, H. C.; BHATIA, C. S. Self-cleaning and antireflective packaging glass for solar modules. *Renewable Energy*, v. 36, n. 9, p. 2489-2493, 2011.

VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2 Edição ed. São Paulo, 2015.

ZERHOUNI, F. Z.; ZERHOUNI, M. H.; ZEGRAR, M.; BENMESSAOUND, M. T.; TILMATINE, A.; STAMBOILI, A. B. Modelling polycrystallin photovoltaic cells using design of experiments. *Scientia Iranica*, v. 21, n. 6, p. 2273-2279, 2014.