

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Geração fotovoltaica: análise dos fatores de influência em função do  
Planejamento de Experimentos (DoE)**

**Acássio Marcelo Dias Pinto**

**Itajubá, julho de 2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Acássio Marcelo Dias Pinto**

**Geração fotovoltaica: análise dos fatores de influência em função do  
Planejamento de Experimentos (DoE)**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador: Prof. Dr. Eduardo Crestana Guardia**

**Itajubá, julho de 2023**

## 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. Situações ainda pouco exploradas pela 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. 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.

**Key words:** Energy efficiency, photovoltaic conversion, meteorological variables, resource savings.

## Lista de Figuras

Figura 2.1 – Domínio fatorial.....	16
Figura 2.2 – Espaço experimental .....	16
Figura 2.3 – Ponto experimental.....	17
Figura 2.4 – Os pontos experimentais dispostos na área de estudo.....	17
Figura 2.5 – Superfície de resposta .....	18
Figura 2.6 – Localização dos pontos experimentais.....	21
Figura 2.7 – Variação da resposta em função do domínio fatorial.....	23
Figura 2.8 – Mapa em quadrados latinos.....	27
Figura 2.9 – Experimento composto para dois fatores .....	28
Figura 2.10 – Planejamento de Doehlert .....	29
Figura 2.11 – Delineamento Box-Behnken para três fatores.....	30
Figura 2.12 – Representação triangular de misturas.....	33
Figura 2.13 – Misturas com 4 componentes.....	33
Figura 2.14 – Localização dos pontos experimentais.....	34
Figura 2.15 – Níveis baixos proibidos.....	35
Figura 2.16 – Nível alto proibido .....	35
Figura 2.17 – Níveis altos e baixos proibidos .....	36
Figura 2.18 – Transferência de calor do painel fotovoltaico.....	39
Figura 2.19 – Influência da inclinação dos painéis na distribuição de calor e fluxo de ar.....	46
Figura 2.20 – Influência da inclinação dos painéis na distribuição de calor e fluxo de ar em camada dupla .....	47
Figura 2.21 – Influência da inclinação dos painéis na distribuição de calor e fluxo de ar em camada única .....	47

Figura 2.22 – Painel inteiriço sem passagem de ar para resfriamento da placa .....	48
Figura 2.23 – Painel perfurado com passagem de ar para resfriamento da placa.....	48
Figura 3.1 – Foto aérea Campus Professor José Rodrigues Seabra .....	52
Figura 3.2 – Localização da área de estudo e climatologia das variáveis meteorológicas.....	53
Figura 3.3 – Variação da irradiância solar incidente no topo da atmosfera ( $Q_o$ ) entre as latitudes e meses do ano.....	54
Figura 3.4 – Irradiação Normal no Brasil.....	54
Figura 3.5 – Irradiação solar em Itajubá-MG.....	55
Figura 3.6 – Altimetria do estado de Minas Gerais.....	55
Figura 3.7 – Velocidade do vento a 50 m em Itajubá-MG .....	56
Figura 3.8- Geração solar anual (kWh) QMAP.....	58
Figura 3.9 – Geração solar diária QMAP .....	58
Figura 3.10 – Radiação solar diária .....	59
Figura 3.11 – Matriz de correlação entre a potência gerada, horário e variáveis meteorológicas considerando uma longa série temporal .....	61
Figura 3.12 – Gráfico de regressão, potência em função da radiação solar .....	61
Figura 3.13 – Gráfico de regressão potência em função do horário.....	62
Figura 3.14 – Resposta ótima, com 2499 dados e 4 variáveis.....	63
Figura 3.15 – Gráfico de Pareto com 188 dados e 4 variáveis .....	64
Figura 3.16 – Gráfico de Superfície em função da potência, radiação solar e temperatura, com 188 dados e 4 variáveis.....	64
Figura 3.17 – Gráfico de Contorno da potência em função da temperatura e radiação solar, com 188 dados e 4 variáveis.....	65
Figura 3.18 – Gráfico de Superfície da potência em função da umidade relativa e radiação solar, com 188 dados e 4 variáveis.....	65

Figura 3.19 – Gráfico de Superfície da potência em função da velocidade do vento e radiação solar, com 188 dados e 4 variáveis .....	66
Figura 3.20 – Resposta ótima com 188 dados e 4 variáveis.....	66
Figura 3.21 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 4 variáveis .....	67
Figura 3.22 – Gráfico de contorno da potência em função da temperatura e radiação, com 20 dados e 4 variáveis.....	68
Figura 3.23 – Resposta ótima com 20 dados e 4 variáveis.....	68
Figura 3.24 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 3 variáveis .....	69
Figura 3.25 – Gráfico de contorno da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 3 variáveis.....	70
Figura 3.26 – Gráfico de contorno da potência em função da umidade e radiação solar, com 20 dados e 3 variáveis.....	70
Figura 3.27 – Gráfico de superfície da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 3 variáveis.....	71
Figura 3.28 – Resposta ótima com 20 dados e 3 variáveis.....	71
Figura 3.29 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 2 variáveis .....	72
Figura 3.30 – Gráfico de superfície da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 2 variáveis.....	73
Figura 3.31 – Gráfico de contorno da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 2 variáveis.....	73
Figura 3.32 – Resposta ótima com 20 dados e 2 variáveis.....	73
Figura 3.33 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 2 variáveis .....	75
Figura 3.34 – Gráfico de superfície da potência em função da temperatura e radiação, com 20 dados e 2 variáveis.....	75

Figura 3.35 – Gráfico de contorno da potência em função da umidade e radiação solar, com 20 dados e 2 variáveis.....	76
Figura 3.36 – Gráfico de efeitos principais da potência em função da radiação e temperatura	77
Figura 3.37 – Gráfico de interação da potência em função da radiação e temperatura.....	77
Figura 3.38 – Radiação solar em 17/05/2023 .....	78
Figura 3.39 – Temperatura instantânea do ar em 17/05/2023 .....	78
Figura 3.40 – Geração fotovoltaica em 17/05/2023 .....	79
Figura 3.41 – Geração teórico e real em 17/05/2023 .....	80



## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Resumo dos DoE's	20
Tabela 2.2 – Box-Draper	28
Tabela 2.3 – Projeto Box-Behnken para 3 fatores	30
Tabela 3.1 – Tabela de correlação	60
Tabela 3.2 – Coeficientes Codificados com 20 dados 4 variáveis	68
Tabela 3.3 – Coeficiente codificados com 20 dados e 3 variáveis	71
Tabela 3.4 – Coeficientes Codificados, com 2 variáveis	74
Tabela 3.5 – Coeficientes de determinação	74
Tabela 3.6 – Coeficientes Codificados, com 2 variáveis	76
Tabela 3.7 – Coeficientes de determinação	77
Tabela 3.8 – Geração teórico e real em 17/05/2023	79

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização do Problema.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Considerações específicas e objetivo .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>MODELAGEM TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Planejamento de experimentos (DoE).....</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Unidade codificada ou coordenadas centradas reduzidas (CCR).....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>Noção de espaço experimental.....</b>	<b>15</b>
2.3.1	Noção de superfície de resposta .....	17
2.3.2	Noção de modelagem matemática.....	18
<b>2.4</b>	<b>Experimento fatorial completo de dois níveis .....</b>	<b>21</b>
<b>2.5</b>	<b>Planejamento fatorial de dois níveis <math>2^k</math>.....</b>	<b>23</b>
2.5.1	Fatorial fracionado de dois níveis $2^{k-q}$ .....	24
2.5.2	Planejamento fatorial fracionado.....	24
<b>2.6</b>	<b>Demais planejamento de dois níveis .....</b>	<b>25</b>
2.6.1	Planejamento de Koshal .....	25
2.6.2	Planejamento de Rechtschaffner .....	25
2.6.3	Planejamento de Plackett e Burmann .....	26
<b>2.7</b>	<b>Planejamento fatorial multi-níveis.....</b>	<b>26</b>
<b>2.8</b>	<b>Superfícies de resposta .....</b>	<b>27</b>
2.8.1	Planejamento Composto Central (CCD) .....	28
2.8.2	Planejamento de Doehlert.....	29
2.8.3	Planejamento de Box-Behnken .....	29
2.8.4	Planejamento híbridos .....	30
2.8.5	Planejamento de Mozzo.....	30
2.8.6	Planejamento de Rechtschaffner para o segundo grau .....	31
2.8.7	Formalização algébrica e estatística da superfície de resposta.....	31
<b>2.9</b>	<b>Planejamento de mistura .....</b>	<b>32</b>
2.9.1	Localização dos pontos experimentais .....	33
2.9.2	Modelos matemáticos de misturas.....	34
2.9.3	Níveis proibidos.....	35

<b>2.10</b>	<b>Variáveis Meteorológicas .....</b>	<b>36</b>
2.10.1	Influência da radiação.....	37
2.10.2	Influência da temperatura .....	41
2.10.3	Influência do vento .....	44
<b>2.11</b>	<b>Parametrização matemática das variáveis meteorológicas .....</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>51</b>
<b>3.1</b>	<b>Caracterização das variáveis de interesse .....</b>	<b>51</b>
3.1.1	Caracterização do local de estudo .....	52
3.1.2	Caracterização dos dados meteorológicos.....	53
3.1.3	Caracterização da geração .....	56
<b>3.2</b>	<b>Análise de dados .....</b>	<b>59</b>
3.2.1	Etapa I.....	60
3.2.2	Etapa II .....	63
3.2.3	Etapa III.....	67
3.2.4	Etapa IV.....	69
3.2.5	Etapa V .....	72
3.2.6	Etapa VI.....	74
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>89</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO C.....</b>	<b>102</b>
	<b>ANEXO D.....</b>	<b>103</b>

# 1 Introdução

O Brasil vive a maior expansão de energia fotovoltaica da sua história, e muito em breve será o 3º maior mercado do mundo em geração e distribuição de energia solar. Segundo a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica a expectativa de crescimento é de 40% nos próximos 5 anos e as inovações tecnológicas aceleram ainda mais esse movimento (ABSOLAR, 2023).

Em 2020 no Brasil a capacidade instalada em projeto solar saltou 64% comparado com o ano de 2019, e em 2021 o país alcançou 12,6 GW. O que torna a energia solar fotovoltaica a 7º maior fonte de geração nacional e o segmento com maior potencial de crescimento, que pode ser potencializado exponencialmente com a inserção massiva da Geração Distribuída no âmbito residencial, comercial e industrial.

A tecnologia para o aproveitamento de energia solar térmica, foi uma das primeiras a ser desenvolvida. Em 1910, um motor instalado em pleno deserto do Saara foi alimentado pelo vapor produzido através do aquecimento da água por radiação solar. Hoje, muitas usinas de grande porte utilizam a energia solar para gerar vapor e mover turbinas. Com essa tecnologia, imensos concentradores de luz que funcionam como espelhos são utilizados para focar a energia em um ponto específico e assim aquecer a água que circula em tubos. Sendo uma termoelétrica, que utiliza o sol como combustível principal e que por meios da inércia térmica produz energia até mesmo no período da noite. Entretanto essa tecnologia, apesar dos avanços, apresenta um custo elevado de implementação e geração o que se reflete no valor final da energia.

Desenvolvida na década 50, com 6% de eficiência, as primeiras células fotovoltaicas foram evoluindo, e, hoje, a energia fotovoltaica é a energia limpa que mais cresce no mundo, pela simplicidade com que transforma luz solar em eletricidade. Para isso, utiliza-se de placas solares formadas por várias células fotovoltaicas, feitas de um material semicondutor. A grande maioria das células fabricadas atualmente é constituída de silício, segundo elemento químico mais abundante na crosta terrestre, extraído de grão de areia e quartzo. Ao atingir a placa fotovoltaica, os fótons reagem com os átomos de silício gerando corrente elétrica.

O potencial de crescimento da energia solar fotovoltaica estimula pesquisas e inovações que aquecem o mercado e se impõe como uma realidade e nesse contexto, essa dissertação se insere validando um modelo simples e realista em condições incontrolláveis de campo e buscando o ponto ótimo de operação solar em função de variáveis meteorológicas.

## 1.1 Contextualização do Problema

Os padrões de vida da atual sociedade evidenciam cada vez mais a maior necessidade e dependência de energia. Entretanto, durante muito tempo para suprir tamanha demanda muitos recursos naturais foram utilizados de forma insustentável. Com isso, a busca por energia renovável e alternativa impulsionou a evolução tecnológica e a implementação de energia solar no mundo. Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), espera-se que a capacidade instalada acumulada de painéis fotovoltaicos possa atingir 22% da geração global de eletricidade em 2050, o que por vez irá impulsionar a transição para um sistema energético mais sustentável e proporcionará benefícios substanciais em termos de segurança energética e desenvolvimento socioeconômico. Uma das formas de melhorar o planejamento e reduzir custos conta com a utilização do Método de Planejamento de Experimentos (DoE), pois ele permite estimar os efeitos e interações entre os fatores de influência e os parâmetros de respostas, determinando assim o melhor modelo preditivo (KESSAISSIA et al., 2020a).

O DoE é fundamentado em cálculos estatísticos e algébricos que buscam o planejamento, a análise, a modelagem e a otimização de experimentos em que se realizam inferências com elevada confiabilidade (KESSAISSIA et al., 2020a). O método ajuda a investigar os efeitos das variáveis de entrada em relação às variáveis de saída, não sendo necessário o conhecimento completo do processo físico, o que é benéfico ao permitir a manipulação de diferentes variáveis simultaneamente e determinar a forma mais rentável e produtiva de operá-lo. Portanto, ao analisar os fatores de influência e interesse, é possível obter conclusões com alta significância estatística (KESSAISSIA et al., 2020a; KESSAISSIA et al., 2020b).

Tendo como base a estatística, o DoE é amplamente utilizado em otimização de processos, identificando de forma rápida e econômica informações cruciais do processo, evidenciando possibilidades de otimização e melhorias, com uma análise regressiva que avalia os fatores significativos e representa a influência dos fatores nas ações principais e combinadas na resposta considerada do sistema (KORAN et al., 2013). Podendo ser aplicado em análises específicas, oferecendo uma maneira prática de estudo, modelagem e caracterização de cada fator de interesse e suas relações.

## 1.2 Considerações específicas e objetivo

A dissertação 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. Dessa forma, busca-se verificar, em condições ambientais e incontroláveis, a validade e a predição do DoE, uma área ainda pouco explorada pela literatura técnica. Além disso, pretende-se determinar o ponto ótimo de operação dos painéis solares.

O DoE é uma poderosa ferramenta de análise que possibilita a estimativa dos efeitos e interações entre as variáveis, explicitando de forma sucinta os fatores de influência e os parâmetros de resposta. Isso permite determinar o melhor modelo preditivo, mesmo com um pequeno conjunto de dados. Nesse sentido, diversos trabalhos técnicos têm buscado analisar a influência das variáveis meteorológicas na geração solar, visando o ganho de eficiência e a redução de custos. No entanto, a maioria desses estudos são teóricos ou realizados em condições controladas. Portanto, com base no DoE, esta dissertação tem como objetivo auxiliar a transposição de barreiras técnicas e tecnológicas que são custosas para a geração de energia fotovoltaica.

## 2 Modelagem teórica e revisão da literatura

O presente capítulo expõe toda a metodologia que embasa a dissertação. Inicialmente é apresentado desde os fundamentos até derivações do DoE. Na sequência os fatores meteorológicos, como radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade do ar, são dissertados em uma revisão bibliográfica expondo a interação entre essas variáveis e a geração fotovoltaica.

### 2.1 Planejamento de experimentos (DoE)

O DoE relaciona uma quantidade de interesse ‘ $y$ ’ em função de uma variável ‘ $x$ ’, conforme a equação 2.1. Buscando o máximo de informações com o mínimo de experimentos, para cada tipo de problema um tipo de delineamento é mais adequado que o outro, porém todos

eles se baseiam em duas premissas básicas: a de unidade codificada, espaço experimental e a modelagem matemática das grandezas estudadas (GOUPY, 2005).

$$y = f(x) \quad (2.1)$$

## 2.2 Unidade codificada ou coordenadas centradas reduzidas (CCR)

As coordenadas centradas reduzidas (CCR) ou unidades codificadas possibilitam o estudo de diferentes campos de assuntos, com as mais diversas variáveis envolvidas, demonstrando assim a grande generalidade do DoE.

Segundo Goupy (2005), o método do CCR se dá atribuindo o valor -1 ao nível baixo e +1 para o nível alto das variáveis estudadas e entre esses dois valores tem-se o passo (Step). Desta forma a unidade de medida foi alterada e uma nova origem foi definida e denotada por zero.

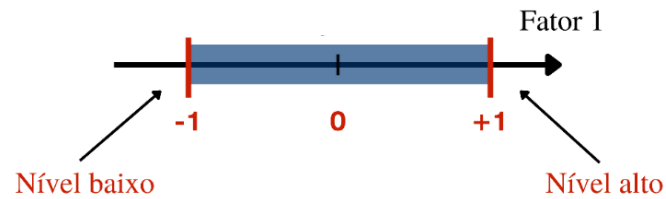
A conversão entre as unidades, é dada pela equação 2.2, em que  $A$  é o valor real da variável,  $A_0$  é o valor central em unidades atuais e  $Step$  é a distância do valor central a um dos níveis.

$$x = \frac{A - A_0}{Step} \quad (2.2)$$

## 2.3 Noção de espaço experimental

Em todo experimento são aferidas informações que são definidas como respostas, ou seja, o valor de interesse e que dependem de diversas variáveis, chamadas de fatores. Desta forma, a noção de espaço experimental representa cada fator por um eixo graduado e orientado, conforme indicado pela Figura 2.1 e onde cada fator é limitado entre a sua variação em que o limite inferior é o nível baixo e o limite superior é o nível alto.

Figura 2.1 – Domínio fatorial

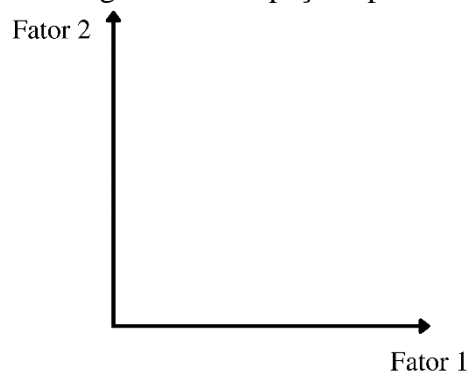


Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

A reunião de todos os valores que o fator pode assumir entre os níveis é chamada de domínio fatorial denotado por -1 para representar o nível baixo e +1 o nível alto, assim como descrito no modo CCR seção 2.2.

Para respostas que dependem de duas variáveis o domínio fatorial de cada uma delas é definido e ambas dispostas ortogonalmente, culminando com a formação de um sistema de coordenadas cartesianas, definindo um espaço euclidiano bidimensional, chamado de espaço experimental composto por dois fatores ortogonais e orientados, conforme representado pela Figura 2.2.

Figura 2.2 – Espaço experimental

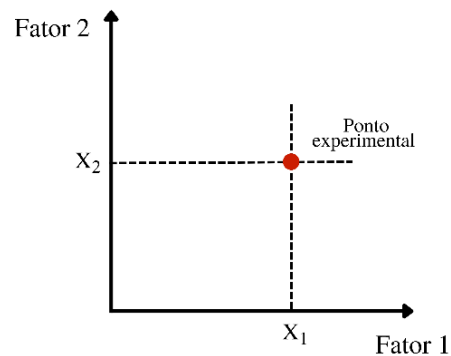


Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

A interseção entre o nível  $X_1$  do fator 1 e do nível  $X_2$  do fator 2 determina a coordenada de um ponto experimental, Figura 2.3. E a união dos domínios fatoriais forma o domínio de estudo, Figura 2.4.

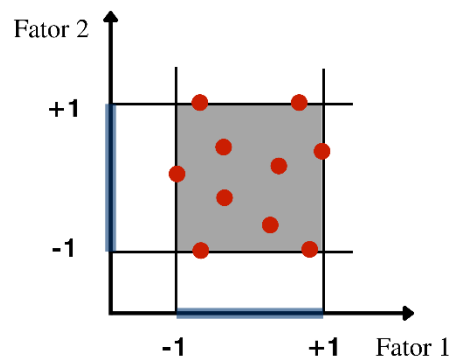


Figura 2.3 – Ponto experimental



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Figura 2.4 – Os pontos experimentais dispostos na área de estudo



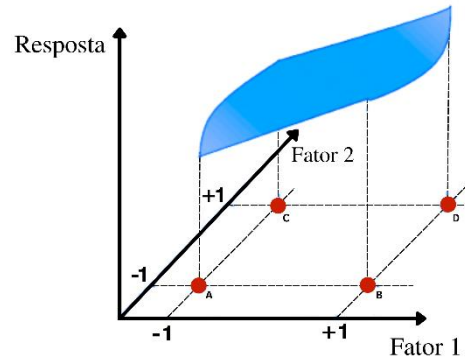
Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

### 2.3.1 Noção de superfície de resposta

A superfície de resposta é constituída pelos níveis  $x_i$ , que são os fatores, determinando o ponto experimental e  $y$  determinando o eixo da resposta. Representando os dois eixos dos fatores e o terceiro eixo as respostas de forma ortogonal, formando um espaço com três eixos ortogonais. Desta forma, o DoE requer o espaço com uma dimensão a mais que o espaço experimental, para o caso específico de dois fatores temos uma dimensão para a resposta e duas para os fatores.

Cada ponto de interseção entre os três eixos corresponde a uma resposta, desta forma a união de todos os pontos do domínio de estudo compõem a superfície de resposta, conforme representado pela Figura 2.5. Assim, para a melhor precisão do modelo, o número de experimentos é limitado.

Figura 2.5 – Superfície de resposta



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

### 2.3.2 Noção de modelagem matemática

Segundo Goupy (2005), a função matemática que parametriza a resposta aos fatores é dada pela equação 2.3, tomada como uma expansão limitada da série Taylor-MacLaurin. Em que as derivadas são assumidas como constantes e a expansão assume a forma de um polinômio de maior ou menor grau, conforme a complexidade do modelo analisado.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (2.3)$$

Em que:

- $y$  é a resposta de interesse. Aferida ao longo do experimento com uma dada precisão;
- $x_i$  representa o nível atribuído ao fator  $i$  pelo experimentador para realizar um teste. Embasado na hipótese de regressão clássica supõe-se este valor sem erro;
- $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii}$  são os coeficientes do modelo matemático calculados a partir dos resultados dos experimentos.

Desta forma se define como “modelo postulado” ou “modelo a priori” a possibilidade de modelar a resposta em função de um polinômio, apenas com alguns dados e sem a necessidade de realizar todos os experimentos.

Todo modelo matemático tende à resposta real, porém erros de ajuste evidenciados pela diferença entre o valor real e estimado, assim como erros advindos da aleatoriedade das respostas devem ser levados em consideração, desta forma estes dois erros são agrupados em um fator denotado por  $\mathbf{e}$ , assim a equação 2.3 é reescrita conforme a equação 2.4.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z + \mathbf{e} \quad (2.4)$$

Os erros experimentais devem ser levados em consideração, desta forma a equação 2.3 que relaciona as respostas e os fatores deve ser complementada, onde cada resposta é dada por um ponto experimental, compondo um sistema de equações em que a cada ponto de interesse é modelado por um polinômio cujos coeficientes são determinados, perfazendo um sistema com  $n$  equações e  $p$  incógnitas dada pela notação matricial 2.5.

$$y = Xa + e \quad (2.5)$$

Em que:

- $y$  é o vetor resposta;
- $X$  é a matriz de cálculo;
- $a$  é o vetor dos coeficientes;
- $e$  é o vetor de desvios.

A equação 2.4, possui  $n$  equações e  $p + n$  incógnitas, evidenciando um número de equações menor que o de incógnitas, desta forma os coeficientes são estimados usando um método de regressão baseado no critério dos mínimos quadrados. Conforme a equação 2.6 simbolizando os coeficientes por  $\hat{a}$ . Resultando em:

$$\hat{a} = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.6)$$

Em que:

- $X'$  é a matriz de transposta de  $X$ ;
- $X'X$  representa a matriz de informação;
- $(X'X)^{-1}$  é a matriz de dispersão.

Com base no que foi apresentado nas seções anteriores, realizou-se a análise dos projetos de experimentos clássicos, abrangendo tanto o espaço experimental quanto a modelagem matemática. As recomendações, vantagens e desvantagens dos principais projetos encontram-se resumidas na Tabela 10 e serão detalhadas nos próximos tópicos. Essa análise minuciosa permitirá uma compreensão mais aprofundada das características de cada projeto, facilitando a seleção adequada de abordagens para futuras pesquisas e experimentações.

- Experimento fatorial completo de dois níveis;
- Experimentos fatoriais fracionários de dois níveis;
- Outros planejamentos de dois níveis;
- Planejamentos multiníveis;
- Planejamentos para superfícies de resposta;
- Planejamentos de mistura;
- Planejamentos booleanos;
- Planejamento ótimo;
- Planejamento de simulações numéricas.

Tabela 1.1 – Resumo dos DoE's

<b>Tipo de DOE</b>	<b>Recomendado</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Experimento fatorial completo de dois níveis	Quando é necessário avaliar o efeito de múltiplos fatores e suas interações.	Permite avaliar todos os efeitos principais e interações de dois fatores simultaneamente.	Pode ser custoso em termos de recursos e tempo, especialmente com muitos fatores.
Experimentos fatoriais fracionários de dois níveis	Quando há restrições de recursos e é importante identificar os fatores mais significativos.	Reduz o número de experimentos necessários, economizando tempo e recursos.	Não permite a estimativa de efeitos de interação.
Outros planejamentos de dois níveis	Quando se deseja uma abordagem flexível e não se requer uma análise detalhada de interações.	Adaptável a diferentes tipos de situações experimentais.	Pode ser limitado em sua capacidade de capturar efeitos complexos.
Planejamentos multiníveis	Quando se deseja investigar efeitos em diferentes níveis de variação dos fatores.	Permite a avaliação de efeitos em diferentes níveis dos fatores.	Requer mais recursos e pode ser complexo de planejar.
Planejamentos para superfícies de resposta	Quando é necessário encontrar o ponto ótimo de operação do sistema.	Ajuda a otimizar o desempenho do processo ou sistema.	Pode exigir mais pontos de experimentação em comparação com outros DOE.
Planejamentos de mistura	Quando o processo envolve a mistura de diferentes componentes ou ingredientes.	Útil quando se lida com combinações de ingredientes ou componentes.	Pode ser mais complicado de analisar e interpretar os resultados.

Fonte: Próprio autor (2023).

## 2.4 Experimento fatorial completo de dois níveis

O projeto fatorial de dois níveis pode ser aplicado para a análise de variáveis contínuas e discretas, sempre limitado a dois níveis para cada fator. Desta forma em unidades codificadas, conforme já discutido anteriormente na seção 2.3 o campo de estudos se restringe a um quadrado e se parametriza por uma equação de primeiro grau dada pela equação 2.7.

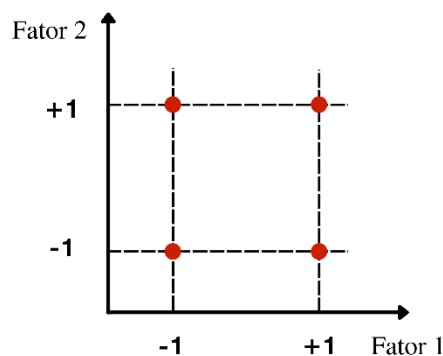
$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + e \quad (2.7)$$

Em que:

- $y$  é a resposta;
- $x_i$  representa o nível atribuído ao fator  $i$ ;
- $a_0$  é o valor da resposta no centro do domínio de estudo;
- $a_1$  é o efeito do fator 1;
- $a_2$  é o efeito do fator 2;
- $a_{12}$  é a interação entre os fatores 1 e 2;
- $e$  é o desvio.

Portanto, a melhor localização dos pontos experimentais, para equações de primeiro grau se encontram nos vértices da região de estudo, conforme representado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Localização dos pontos experimentais



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Quatro pontos definem um quadrado, que é definido como a área de estudo, desta forma cada ponto experimental se parametriza por uma das equações 2.8 a 2.19

$$y_1 = a_0 + a_1x_{1,-1} + a_2x_{2,-1} + a_{12}x_{1,-1}x_{2,-1} + e_1 \quad (2.8)$$

$$y_2 = a_0 + a_1x_{1,+1} + a_2x_{2,-1} + a_{12}x_{1,+1}x_{2,-1} + e_2 \quad (2.9)$$

$$y_3 = a_0 + a_1x_{1,-1} + a_2x_{2,+1} + a_{12}x_{1,-1}x_{2,+1} + e_3 \quad (2.10)$$

$$y_4 = a_0 + a_1x_{1,+1} + a_2x_{2,+1} + a_{12}x_{1,+1}x_{2,+1} + e_4 \quad (2.11)$$

Resolvendo o sistema acima e isolando os coeficientes, têm se:

$$\hat{a}_0 = \frac{1}{4} [+y_1 + y_2 + y_3 + y_4] \quad (2.12)$$

$$\hat{a}_1 = \frac{1}{4} [-y_1 + y_2 - y_3 + y_4] \quad (2.13)$$

$$\hat{a}_2 = \frac{1}{4} [-y_1 - y_2 + y_3 + y_4] \quad (2.14)$$

$$\hat{a}_{12} = \frac{1}{4} [+y_1 - y_2 - y_3 + y_4] \quad (2.15)$$

Desta forma o modelo de regressão que parametriza as previsões em função dos coeficientes calculados é dado pela equação 2.16.

$$\hat{y} = \hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 + \hat{a}_2x_2 + \hat{a}_{12}x_1x_2 \quad (2.16)$$

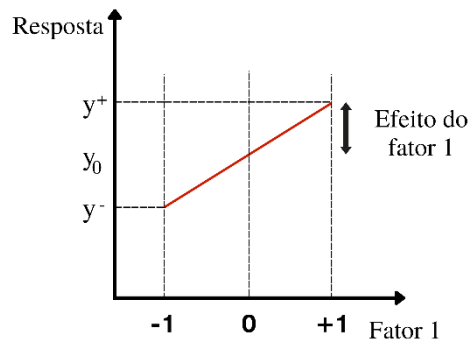
Assim, para  $x_1$  e  $x_2$  tendendo a zero, o centro da área de estudos é encontrada, desta forma a equação 2.17 evidencia que o coeficiente  $\hat{a}_0$  é o valor da resposta no centro do domínio de estudos.

$$\hat{y}_0 = +\hat{a}_0 \quad (2.17)$$

Seguindo o mesmo raciocínio anterior, porém zerando apenas  $x_2$ , obtém-se a equação 2.18, evidenciando a variação da resposta prevista em função da variação entre os níveis -1, 0, +1. Que pode ser melhor visualizado pela Figura 2.7.

$$\hat{y} = +\hat{a}_0 + \hat{a}_1x_1 \quad (2.18)$$

Figura 2.7 – Variação da resposta em função do domínio fatorial



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Por fim, o fator  $\hat{a}_{12}$  da relação 2.15 pode ser reescrito conforme a equação 2.19.

$$\hat{a}_{12} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{2} (y_4 - y_3) - \frac{1}{2} (y_2 - y_1) \right] = \frac{1}{2} [+ef^+ - ef^-] \quad (2.19)$$

Em que:  $ef$  representa metade da diferença entre os fatores, sendo  $ef^+$  a metade do efeito do fator 1 e  $ef^-$  a metade do efeito do fator 2, expondo o efeito de um fator sob o outro em uma interação de ordem 2.

## 2.5 Planejamento fatorial de dois níveis $2^k$

O planejamento fatorial de dois níveis, ou fatorial de base 2, aceita até  $k$  fatores, porém o número de tentativas se eleva na proporção de  $2^k$ , desta forma para a análise de tal problema utiliza-se o planejamento fatorial fracionário de dois níveis.

Devido a sua capacidade de verificação, o planejamento fatorial é amplamente utilizado na modelagem e otimização de experimentos, proporcionando a análise de múltiplos fatores com variações simultâneas entre dois níveis. Isso permite verificar a interação de cada fator na

resposta obtida. E o número de experimentos pode ser determinado pela seguinte equação (2.20):

$$N = n \cdot 2^k \quad (2.20)$$

Em que:

- $N$  representa o número total de experimentos a serem realizados;
- $n$  indica o número de réplicas;
- 2 representa a base do planejamento, também chamado de níveis;
- $k$  expressa o número total de fatores considerados no experimento.

### 2.5.1 Fatorial fracionado de dois níveis $2^{k-q}$

O Delineamento Fatorial Fracionário analisa todos os fatores, porém, com o número de testes reduzido em  $2^q$  se comparado com o delineamento fatorial completo. Ao longo do planejamento fatorial obtém-se um sistema de  $n$  equações, contendo  $p$  coeficientes desconhecidos com  $p > n$ , tornando inviável a resolução do sistema, porém ao longo do processo fracionário o número de incógnitas é reduzido para o mesmo número de equações, culminando com um sistema de  $n$  equações e  $n$  coeficientes.

### 2.5.2 Planejamento fatorial fracionado

O planejamento fatorial completo é denotado por  $2^k$ , em que  $k$  representa os fatores e o algarismo dois indica os níveis de cada fator. Do mesmo modo, o planejamento fatorial fracionado com metade do planejamento completo é representado por  $2^{k-1}$ . Sendo assim, em um projeto  $2^{k-q}$  é possível estudar  $k$  fatores de dois níveis cada, com o planejamento completo dividido por  $2^q$ .

O planejamento fatorial fracionado busca simplificar a análise, não realizando todos os experimentos do projeto completo, assim são negligenciadas as interações fracas e as interações fortes são avaliadas individualmente, desta forma hipóteses embasadas em estatísticas juntamente com o conhecimento acerca dos fenômenos estudados são levantadas, sendo elas:



- Interações de ordem maior que três são desprezíveis;
- Interações que tendem a zero são desprezíveis;
- Se dois efeitos são fracos, sua interação também o é;
- Se um efeito é fraco e o outro forte, a interação entre eles também é fraca;
- Se dois efeitos são fortes, a interação entre eles também pode ser.

## 2.6 Demais planejamento de dois níveis

Os planejamentos de dois níveis têm como objetivos principais auxiliar estudos preliminares esclarecendo situações específicas, embasado em modelos de primeiro grau, reduzindo assim tempo e esforço matemático.

Dentre os planejamentos de dois níveis destacam-se os delineamentos de:

- Koshal;
- Rechtschaffner,
- Plackett e Burman,
- Tabelas Taguchi.

### 2.6.1 Planejamento de Koshal

Os delineamentos Koshal (KOSHAL, 1933), se mostra prático para esboço de problemas, uma vez que determina os efeitos principais diretamente, não avaliando as interações, e é parametrizado pela equação 2.21.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i \quad (2.21)$$

### 2.6.2 Planejamento de Rechtschaffner

Os delineamentos de Rechtschaffner se constituem de delineamentos fracionários simplificados com o objetivo de determinar fatores e interações de segunda ordem, adotando

todas as demais interações como zero e se parametrizando pela equação 2.22 (RECHTSCHAFFNER, 1967).

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j \quad (2.22)$$

### 2.6.3 Planejamento de Plackett e Burmann

Baseada nas matrizes de Hadamard, as matrizes de cálculo dos planejamentos de Plackett e Burman (PLACKETT e BURMAN, 1946), possibilitam analisar experimentos com um número de tentativas intermediário ao do planejamento fatorial completo. Tais planejamentos de experimentos tendem a saturar com o aumento de variáveis, desta forma são parametrizados de forma análoga aos de Koshal, sem interação, conforme a equação 2.21.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i$$

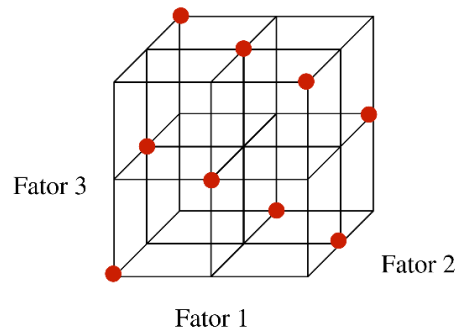
## 2.7 Planejamento fatorial multi-níveis

O planejamento de experimentos de dois níveis se destaca por necessitar de um pequeno número de tentativas, desta forma cada fator recebe o número de níveis necessários para o estudo e a interpretação dos resultados varia conforme a natureza das variáveis.

Para variáveis contínuas são utilizados modelos de primeiro ou segundo grau parametrizados, existindo diversos critérios de otimização, critérios estes que serão analisados nos tópicos dedicados aos planejamentos fatoriais e superfícies de respostas.

Segundo Poirier (1993), para as variáveis discretas, a análise de variância deve ser usada para a interpretação dos resultados, assim como experimentos específicos, sendo eles; quadrados latinos Figura 2.8, quadrados greco-latinos, experimentos de Youden e experimentos de níveis mistos em que cada um se difere pelo número de fatores, níveis, testes e interações.

Figura 2.8 – Mapa em quadrados latinos



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

## 2.8 Superfícies de resposta

Segundo Goupy (1999), a superfície de respostas ou planejamento de segundo grau são utilizados na busca de máximos, mínimos e pontos de interesses, operando então, com variáveis contínuas estabelecendo modelos matemáticos de segundo grau. Para dois fatores a superfície de resposta é regida pela equação 2.23.

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (2.23)$$

Conforme já discutido anteriormente na seção 2.3.2, cada coeficiente do sistema de equações é dado pela equação 2.6.

$$\hat{a} = (X'X)^{-1}X'y$$

E a equação utilizada para determinar o número de experimentos é dada por:

$$N = nf + na + nc \quad (2.24)$$

$$N = 2^k + 2k + nc \quad (2.25)$$

Em que:

- $N$  representa o número total de experimentos a serem realizados;
- $nf$  representa o número de pontos fatoriais;
- $na$  representa o número de pontos axiais;

- $nc$  representa o número de pontos centrais, dado pela tabela de Box-Draper (Tabela 2.1);
- 2 representa a base do planejamento, também chamado de níveis;
- $k$  expressa o número total de fatores considerados no experimento.

Tabela 2.2 – Box-Draper

k	2	3	4	5	5
F	4	8	16	32	16
$n_c$	2-4	2-4	2-4	2-4	1-4

Fonte: Adaptada de Galil e Kiefer (1977).

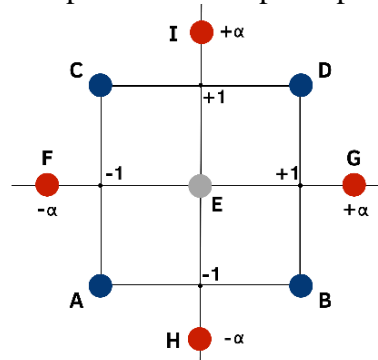
Além disso, a superfície de resposta se deriva em diferentes tipos, sendo eles:

- Planejamento composto;
- Os planejamentos de Doehlert;
- Os planejamentos de Box-Behnken;
- Planejamento híbridos;
- Planejamento de Mozzo;
- Planejamento de Rechtschaffner para o segundo grau.

### 2.8.1 Planejamento Composto Central (CCD)

Em um Planejamento Composto Central (CCD) os fatores assumem dois níveis, com um ponto experimental localizado no centro da região de interesse e pontos axiais, no eixo de cada fator, conforme representado na Figura 2.9 em que A, B, C e D são pontos experimentais, E é o ponto central e F, G, H e I são pontos axiais ou planejamento estrela.

Figura 2.9 – Experimento composto para dois fatores



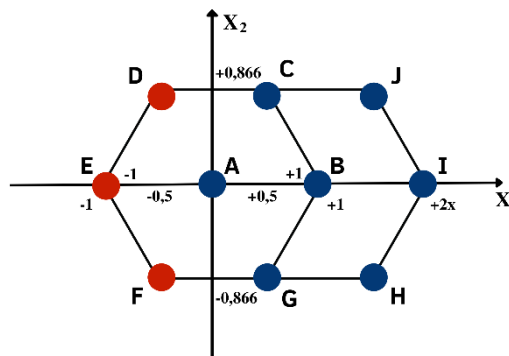
Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Em função do critério de otimização, as coordenadas dos pontos axiais são definidas, desta forma o planejamento composto se destaca por ser adequado para experimentos com aquisição progressiva dos resultados.

### 2.8.2 Planejamento de Doehlert

Segundo Doehlert (1970), os planejamentos de Doehlert existem para quaisquer números de fatores, sendo todos os pontos equidistantes do centro de estudo formando um hexágono regular conforme a Figura 2.10 em que os pontos de A a G representam o primeiro plano de Doehlert, H a J são pontos de possíveis experimentos adicionais e os pontos B, G, H, I, J, C e A indicam um segundo planejamento de Doehlert.

Figura 2.10 – Planejamento de Doehlert

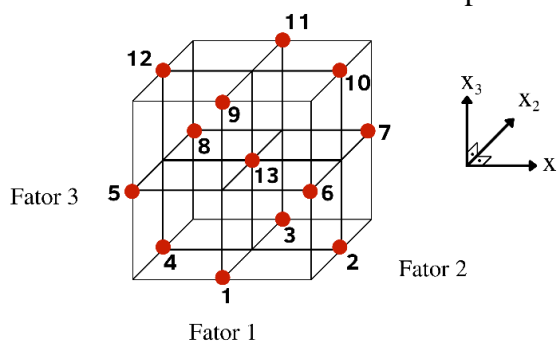


Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

### 2.8.3 Planejamento de Box-Behnken

O planejamento de Box-Behnken, se mostra como uma evolução dos citados anteriormente, em que os pontos experimentais estão centrados nas arestas de cada lado do cubo, conforme representado na Figura 2.11. Segundo Box e Behnken (1960), tal delineamento de experimento atende critérios de otimização particular em que o erro é o mesmo para todos os pontos de uma mesma esfera, permitindo estudar três fatores (Tabela 2.2).

Figura 2.11 – Delineamento Box-Behnken para três fatores



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Tabela 2.3 – Projeto Box-Behnken para 3 fatores

Nº Ensaio	Fator 1	Fator 2	Fator 3
1	0	-1	-1
2	1	0	-1
3	0	1	-1
4	-1	0	-1
5	-1	-1	0
6	1	-1	0
7	1	1	0
8	-1	1	0
9	0	-1	1
10	1	0	1
11	0	1	1
12	-1	0	1
13	0	0	0

Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

#### 2.8.4 Planejamento híbridos

Segundo Roquemore (1976), os planejamentos híbridos mesclam em uma única análise a ortogonalidade e a isovariância por rotação na busca por otimização, assegurando precisão e previsibilidade do erro em função da distância ao centro da região de interesse.

#### 2.8.5 Planejamento de Mozzo

Segundo Mozzo (1990), o planejamento de Mozzo se caracteriza por serem sequenciais e com o número de níveis limitados, porém para analisar um número maior de fatores, basta realizar testes adicionais.

### 2.8.6 Planejamento de Rechtschaffner para o segundo grau

Conforme já discutido na seção 2.6, abordando os panos de dois níveis, o planejamento de Rechtschaffner, segundo Rechtschaffner (1967), também permite estabelecer um modelo quadrático, com  $k$  fatores e  $n$  número de tentativas dado pela equação 2.26:

$$n = \frac{1}{2}(2 + 3k + k^2) \quad (2.26)$$

### 2.8.7 Formalização algébrica e estatística da superfície de resposta

Segundo Myers et al. (2009), a metodologia de superfície de resposta consiste em não somente técnicas estatísticas, mas também algébricas para planejamento, análise, modelagem e otimização de experimentos. Partindo da metodologia de resposta é possível obter os níveis ótimos operacionais das variáveis de controle que otimizam a resposta de interesse. Desta forma, a superfície de resposta obtém um modelo de regressão que representa algebricamente o processo conforme as equações 2.27 e 2.28, sendo a equação 2.28 um modelo de segunda ordem completa.

$$f(x) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (2.27)$$

$$f(x) \sim y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon = \mathbf{a}'(\mathbf{x})\boldsymbol{\beta} + \varepsilon \quad (2.28)$$

Em que:

- $y$  = resultado de interesse;
- $f(x)$  = função objetiva que representa o resultado de interesse;
- $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , vetor de variáveis de decisão;
- $\beta_i$  = Coeficiente da função objetivo estimado por métodos de regressão;
- $x_i$  = Variável de decisão;

- $\mathbf{a}(x) = \{1, x_1, x_2, \dots, x_i x_j\}$  = vetor que consiste em todos os r termos (uma constante 1, linear, termos quadráticos e interações) do modelo de superfície de resposta  $f(x)$ ;
- $\boldsymbol{\beta} = \beta_0, \beta_1, \beta_1, \dots, \beta_{ij}$  = vetor de coeficientes da função objetivo;
- $\varepsilon$  = erro entre o valor verdadeiro da resposta  $y$  e o valor previsto pela função  $f(x)$ .

## 2.9 Planejamento de mistura

Profundamente estudado pelo americano Cornell (1981), o planejamento de mistura é estudado separadamente, pois apesar de ser um delineamento de experimento ele apresenta restrições em que a soma das proporções de uma mistura é sempre igual a 100% e os fatores são as proporções de cada constituinte das misturas (GOUPY, 2000).

Desta forma a restrição fundamental das misturas é dada percentualmente pela equação 2.29.

$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 100\% \quad (2.29)$$

Em que:

- $x_i$  representa o teor do constituinte;
- $i$  é a soma dos teores de todos os constituintes da mistura.

Substituindo a percentagem por unidade, obtem-se a equação 2.30 denominada de restrição fundamental da mistura.

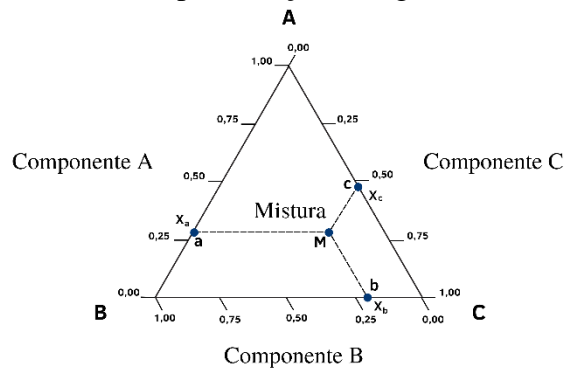
$$\sum_{i=1}^{i=n} x_i = 1 \quad (2.30)$$

Sendo a soma de todos os constituintes de uma mistura igual a 1, a representação geométrica do planejamento de experimento se dá por representações triangulares, tetraedros e hiper poliedros, respeitando assim a restrição fundamental das misturas.

Misturas de três componentes são representadas por triângulos equiláteros conforme a Figura 2.12.



Figura 2.12 – Representação triangular de misturas



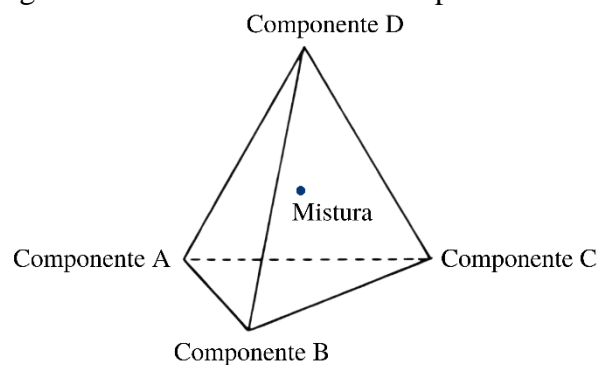
Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Em que:

- Os vértices representam os produtos puros;
- Os lados representam as misturas binárias;
- O ponto interno a superfície do triângulo representa a composição das três misturas.

Para representar misturas com quatro componentes é feita por um tetraedro regular, representado na Figura 2.13, para mais de 3 misturas a forma mais adequada de representação é dada por hiper poliedros regulares.

Figura 2.13 – Misturas com 4 componentes



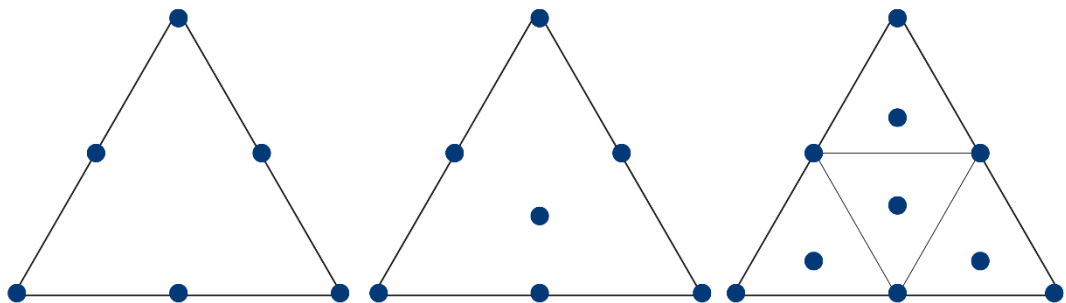
Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

### 2.9.1 Localização dos pontos experimentais

Segundo Goupy (2005), existem diversas maneiras de dispor os pontos experimentais na área de estudos, conforme demonstrado na Figura 2.14 com os planejamentos experimentais de coordenadas simplex, simplex-centroide e simplex-centroide aumentado, em que:

- Simplex: É um algoritmo de otimização usado para encontrar o máximo ou mínimo de uma função em problemas lineares.
- Simplex-Centroide: É uma extensão do algoritmo simplex que usa o ponto central dos vértices do poliedro de restrições para melhorar a eficiência do processo de otimização.
- Simplex-Centroide Aumentado: É uma extensão do método simplex-centroide que também leva em consideração restrições adicionais, chamadas de "restrições aumentadas", para restringir ainda mais o espaço de busca e focar em regiões promissoras.

Figura 2.14 – Localização dos pontos experimentais



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

## 2.9.2 Modelos matemáticos de misturas

Em função das restrições impostas, a mistura dada nas equações 2.29 e 2.30, a constante é imposta como zero, desta forma para três componentes, a modelagem matemática de primeiro grau é dada pela equação 2.31:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (2.31)$$

Já a modelagem de segundo grau é dada pela equação 2.32:

$$y = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (2.32)$$

Para modelagens maiores, a complexidade se eleva e os coeficientes são calculados a partir da regressão dada por 2.33:

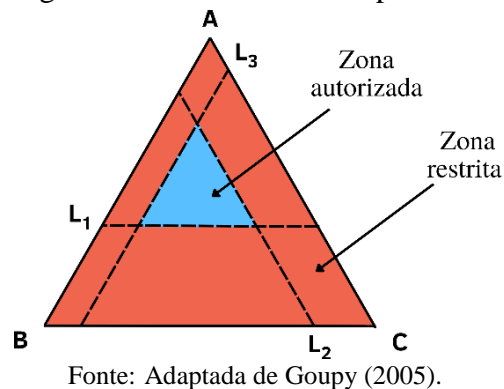
$$\hat{b} = (X'X)^{-1}X'y \quad (2.33)$$

### 2.9.3 Níveis proibidos

Apesar das restrições impostas nas equações 2.29 e 2.30, existem delimitações que são exigências específicas de casos particulares, sendo eles os níveis de baixo proibido, alto proibido e altos e baixos proibidos.

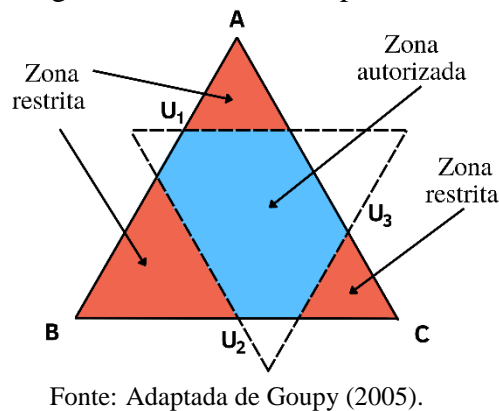
O nível baixo proibido se caracteriza por restringir níveis mínimos de cada mistura, conforme a Figura 2.15.

Figura 2.15 – Níveis baixos proibidos



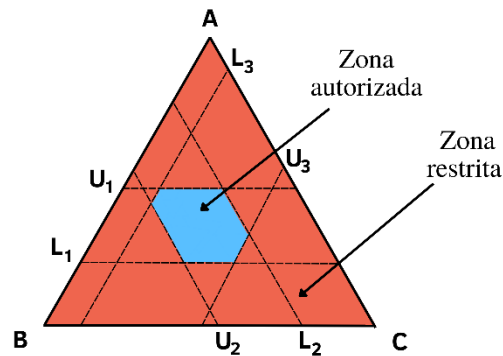
O nível alto proibido por sua vez restringe os componentes da mistura em níveis máximos, alterando o formato do domínio de estudo, conforme a Figura 2.16.

Figura 2.16 – Nível alto proibido



A interseção entre as duas restrições anteriores se faz necessária em estudos específicos, sendo definido como níveis altos e baixos proibidos, alterando a zona de estudo, conforme a Figura 2.17.

Figura 2.17 – Níveis altos e baixos proibidos



Fonte: Adaptada de Goupy (2005).

Segundo Goupy (2005), além das restrições máximas e mínimas, existem também as delimitações com relação constante entre as proporções de cada constituinte da mistura, respeitando assim uma relação de adição entre as proporções de dois ou mais constituintes, conforme explicitada pelas relações abaixo:

$$\frac{x_1}{x_2} = \text{constante ou } k_1 \leq \frac{x_1}{x_2} \leq k_2$$

$$x_1 + x_2 = \text{constante ou } k_3 \leq x_1 + x_2 \leq k_4$$

Tais restrições alteram a delimitação da área de estudos.

## 2.10 Variáveis Meteorológicas

Há uma convergência entre os diversos trabalhos científicos de que existe uma lacuna que relacione as condições meteorológicas como, radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa com a geração fotovoltaica. Desta forma este capítulo analisa cada um destes fatores com o intuito de mesclar com a teoria do DoE visto nas seções anteriores e assim relacioná-los no Capítulo 3.

### 2.10.1 Influência da radiação

A radiação solar é a energia radiante emitida pelo sol a partir de uma reação de fusão nuclear sendo quantificada em termos de fluxo e densidade de potência. Segundo Villalva (2015), a radiação é dada pela razão instantânea entre potência e área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

A conversão direta da radiação solar em energia elétrica se dá pelos painéis solares, porém o mesmo espectro luminoso responsável pelo efeito fotoelétrico também aquece as placas, gerando perdas térmicas, redução da eficiência dos painéis e mitigação de sua vida útil. Segundo Gökmen et al. (2016), a curva de rendimento evidencia tal efeito, visto que o horário de maior radiação nem sempre culmina com o horário de maior geração.

O painel fotovoltaico é instalado de modo que os raios solares incidam perpendicularmente em sua superfície, produzindo perda por reflexão na faixa de 4 a 5%, reduzindo o rendimento elétrico dos módulos de 8% a 15%. Segundo Krauter (2004), revestimento antirreflexo pode ser uma alternativa, porém o alto custo, baixa vida útil, dificuldade de limpeza e significativo acúmulo de poeira o tornam desvantajoso. Desta forma a utilização de uma fina película de água corrente sobre o painel é proposto, reduzindo a reflexão de 2% a 3,6%, em função do índice de reflexão da água ser intermediário entre o vidro e o ar, mitigando em  $22^\circ\text{C}$  a temperatura da placa solar culminando com um ganho líquido de 8% a 9% na geração considerando a energia necessária para operar a bomba.

Na busca por uma superfície autolimpante e antirreflexiva para módulos solares, Verma et al. (2011) propõe o uso de nanoestruturas, identificando que a superfície do vidro se torna hidrofílica após a nanoestruturação. Concluindo que a eficiência do módulo fotovoltaico cai 33% para cada  $1 \text{ g}/\text{m}^2$  de poeira depositada na superfície.

O acúmulo de poeira e sedimentos interferem na recepção de radiação solar pelos painéis, impedindo que os elétrons livres migrem para a banda de condução reduzindo a eficiência fotovoltaica, desta forma Syafiq et al. (2018) analisou abordagens e métodos para limpeza de painéis solares revisando métodos mecânicos, eletrostáticos e revestimento dos painéis. Após tal análise, identificou que a limpeza manual consome tempo e energia, além de deteriorar a superfície do painel. Já a limpeza eletrostática além de gastar energia é pouco eficaz em dias chuvosos ou de alta umidade. Mecanicamente, os sopradores apresentam grandes vantagens, pois limpam sem riscar os painéis, além de reduzir a temperatura dos painéis durante o processo de limpeza. Por fim, o método de autolimpeza com base em superfícies hidrofóbicas

se mostra mais adequado para aplicações fotovoltaicas, pois além de ser antiaderente, não acumula água e ainda evita o risco de corrosão.

Sayigh (2019) analisou e comparou perdas de desempenho e a degradação de dois módulos fotovoltaicos instalados no estado de Minas Gerais, por 15 anos e identificou que as condições climáticas de alta temperatura e alto índice de radiação solar aceleraram a degradação dos módulos, reduzindo o desempenho e a confiabilidade dos mesmos, aumentando a resistência em série, reduzindo a eficiência energética com uma perda média anual entre 0,3 a 4,0%.

Além dos fatores de influência como temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar, a geração fotovoltaica também sofre influência antropogênica com a emissão de aerossóis na atmosfera, o que interfere diretamente na recepção da radiação solar pelos painéis solares. Segundo Sweerts et al. (2019), dados meteorológicos de 119 estações meteorológicas mostram que entre 1960 e 2015, a China teve seu potencial fotovoltaico reduzido em média de 11% a 15%, o que equivale a uma perda energética de 14 TWh.

A umidade relativa por sua vez influencia diretamente no desempenho das células fotovoltaicas, interferindo desde a dispersão da radiação solar até a deterioração das células fotovoltaicas. Segundo Hamdi et al. (2018), o efeito da umidade relativa interage com todas as variáveis meteorológicas, porém, sua interação com a radiação absorvida ou refletida pela água gera de 15-30% de perda de eficiência, além de corroer as juntas metálicas, deteriorando as células fotovoltaicas, comprometendo a vida útil dos painéis.

Chaichan e Kazem (2016) analisaram a interação entre a geração fotovoltaica e as condições climáticas extremas de Omã, identificando alta relação na geração em função da radiação solar, umidade relativa, temperatura e insignificante influência do vento. A elevada umidade relativa do ar foi identificada como fator preponderante na geração por reduzir a intensidade da radiação solar.

Com base na pequena porcentagem de radiação solar que se converte em energia elétrica, além de perdas como o aumento da energia interna do painel, calor por convecção, irradiação e evaporação, Hadipour et al. (2021) propõe uma modelagem teórica para estudo analítico das perdas, conforme descrito abaixo.

A radiação solar recebida pelo painel depende diretamente do coeficiente de absorção ‘ $a$ ’, da radiação incidente, da área do painel, parametrizado pela equação 2.34.

$$Q_{solar} = a \cdot R \cdot A_p \quad (2.34)$$

Em que:

- $Q_{solar}$ : Radiação solar recebida pelo painel (W);
- $a$ : Coeficiente de absorção;
- $R$ : Radiação ( $W/m^2$ );
- $A_p$ : Área superficial do painel ( $m^2$ ).

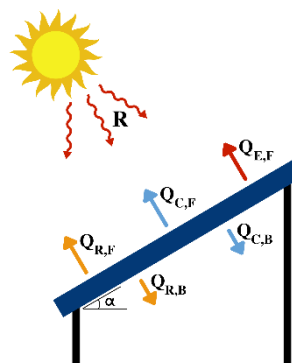
A perda de calor total se dá pela soma das componentes de perda por convecção, irradiação e evaporação, para regiões úmidas ou para painéis com dispersores de água, conforme equação 2.35 e ilustrada pela Figura 2.18.

$$Q_{perda} = Q_C + Q_R + Q_E \quad (2.35)$$

Em que:

- $Q_{perda}$ : Energia despendida para o ambiente (W);
- $Q_C$ : Perda de calor por convecção (W);
- $Q_R$ : Perda de calor por irradiação (W);
- $Q_E$ : Perda de calor por evaporação (W).

Figura 2.18 – Transferência de calor do painel fotovoltaico.



Fonte: Adaptada de Hadipour et al. (2021).

A convecção térmica se dá pela movimentação ascendente e descendente de ar em diferentes temperaturas, que no painel ocorre em suas duas superfícies, frontal e inferior, desta forma a troca de calor por convecção é dada pela soma das componentes, conforme a equação 2.36.

$$Q_C = Q_{C,F} + Q_{C,I} \quad (2.36)$$

Em que:

- $Q_C$ : Perda de calor por convecção (W);
- $Q_{C,F}$ : Perda de calor por convecção frontal do painel (W);
- $Q_{C,I}$ : Perda de calor por convecção inferior do painel (W).

A perda de calor com convecção frontal e inferior dos painéis depende diretamente do coeficiente de temperatura por convecção, da área da placa e da variação de temperatura submetida, conforme equações 2.37 e 2.38.

$$Q_{C,F} = h_F A_p (T_{P,F} - T_{a,F}) \quad (2.37)$$

$$Q_{C,B} = h_I A_p (T_{I,P} - T_{a,B}) \quad (2.38)$$

Em que:

- $h_F$ : Coeficiente de transferência de calor por convecção frontal do painel (W/m<sup>2</sup>·K);
- $h_I$  : Coeficiente de transferência de calor por convecção inferior do painel (W/m<sup>2</sup>·K);
- $T_{P,F}$ : Temperatura frontal do painel (K);
- $T_{I,P}$ : Temperatura da superfície inferior do painel (K).

A perda de calor por irradiação, assim como a perda por condução se dá em ambas as superfícies do painel, conforme equação 2.39, sendo calculada cada componente pelo produto entre a constante de Stefan-Boltzmann, a emissividade, o fator de vista e a variação de temperatura, conforme a equação 2.40.

$$Q_I = Q_{I,F} + Q_{R,I} \quad (2.39)$$

Em que:

$$Q_I = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_p \cdot F_{xy} (T_x^4 - T_y^4) \quad (2.40)$$



- $Q_I$ : Calor total perdido por irradiação (W);
- $Q_{I,F}$ : Calor perdido por irradiação frontal do painel (W);
- $Q_{R,I}$ : Calor perdido por irradiação da parte inferior do painel (W);
- $\sigma$ : Constante de Stefan–Boltzmann ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ );
- $\varepsilon$ : Emissividade;
- $F_{xy}$ : Fator de vista (Dado tabelado).

O calor perdido por evaporação depende do fator de evaporação, da área das placas e da variação de pressão caso exista dispersor de fluido, conforme equação 2.41. A temperatura local, velocidade do vento e umidade relativa são fatores que influenciam diretamente na eficiência da perda de calor por evaporação.

$$Q_E = e \cdot A_p \cdot (P_s - P_d) \cdot l \quad (2.41)$$

Em que:

- $Q_E$ : Calor perdido por evaporação (W);
- $e$ : Fator de evaporação ( $\text{kg m}^2/\text{s}$ );
- $l$ : Calor latente (J);
- $P_s$ : Pressão parcial do dispersor (Pa);
- $P_d$ : Pressão parcial (Pa).

Conforme analisada nesta seção a radiação solar produz a elevação da temperatura dos painéis, reduzindo assim a eficiência do módulo fotovoltaico, desta forma a próxima seção busca analisar e integralizar o que existe de mais relevante na literatura a respeito do tema.

### 2.10.2 Influência da temperatura

Definida como o estado de agitação térmica das partículas que constituem um corpo, a temperatura tem grande relevância ao longo de todo processo de conversão fotovoltaica, impactando na eficiência de geração e na vida útil dos componentes expostos à variação térmica. Deste modo, na busca por mitigar os efeitos da temperatura, ar e água são comumente usados como fluidos de refrigeração, onde a água se destaca por ter maior capacidade de

resfriamento, porém sua demanda pode ser um impeditivo de implementação. Com isso, a área técnica e científica buscam uma solução para mitigar a influência da temperatura na geração fotovoltaica.

Hadipour et al. (2021) realizou um estudo experimental, comparando os sistemas de refrigeração com pulverizador constante e intermitente de água e um sistema sem refrigeração. Concluiu-se que a refrigeração com o pulverizador constante e intermitente apresentaram pequena variação na geração, porém a pulverização intermitente consome 1/9 de água, com rendimento de 27,7% maior se comparado com o painel sem refrigeração. Por fim, o custo elevado do dispersor de água foi levado em consideração, e o investimento se justifica visto que a vida útil da placa pode ser estendida e os esforços térmicos são mitigados.

Bahaidarah (2016) realizou uma análise empírica do resfriamento dos painéis fotovoltaicos por jatos de água no verão e inverno, inspecionando todo o sistema fotovoltaico, com uma variação térmica máxima de 69,7°C para 35,6°C, culminando com um aumento da potência máxima em 51,5% e da eficiência em 82,6%. Concluindo que o jato de água reduz e mantém uniforme a temperatura da célula fotovoltaica, melhorando os parâmetros de geração.

Jakhar et al. (2017), conectou em um circuito fechado o sistema fotovoltaico a um trocador de calor, tendo o painel como fonte quente e a terra como fonte fria em uma tubulação de 80 metros de comprimento e 3 metros de profundidade interligados a uma bomba, aspergindo água na parte traseira dos painéis. Uma análise exérgica foi realizada em termos de perda e destruição exérgica, assim como a implementação prática de todo o sistema, identificando uma melhora na eficiência e uma promissora proposta para regiões com restrição hídrica.

Firoozzadeh et al. (2019) propõe a utilização de aletas de alumínio na parte traseira dos painéis com o intuito de operar como trocador de calor e privilegiar a passagem de ar, reduzindo a temperatura, aumentando a geração em até 20,2% nos testes empíricos.

Castanheira et al. (2018), implementou um projeto de demonstração de um sistema de refrigeração para centrais fotovoltaicas existentes em Portugal, concebendo um kit de arrefecimento de água para centrais fotovoltaicas já existentes e em funcionamento. Uma grande quantidade de dados e testes foram levantados, e foi identificado que o ciclo de liga e desliga do sistema de arrefecimento afeta a eficiência de geração, com um aumento de 12% a mais ao ano e com um retorno financeiro estimado em 2 anos para os casos analisados.

Fakouriyani et al. (2019) efetuou uma análise experimental do efeito de um sistema de refrigeração na eficiência de painéis fotovoltaicos e sua produção de água pré-aquecida. Composto de um sistema de alta confiabilidade e baixa complexidade, em que a água pré-

aquecida produzida pelo calor absorvido do painel fotovoltaico é conduzida para um aquecedor solar de água que potencializa a elevação da temperatura da água com o intuito de satisfazer a demanda de água quente domiciliar. Tendo como resultado de que a eficiência média do painel fotovoltaico sem o sistema de refrigeração é de 10,9% com a inclusão do sistema de refrigeração a eficiência aumenta para 12,3%. Neste caso a eficiência térmica é de 49,4%, culminando com a eficiência média geral chegando em 61,7%. Desta forma, se o sistema for acoplado a um aquecedor de água a gás em vez do aquecedor de água solar, o período de retorno é obtido em 1,7 anos.

Elnozahy et al. (2015) realizou a análise do desempenho de um sistema fotovoltaico que integra resfriamento e limpeza dos painéis de maneira autônoma, onde uma malha de controle aciona a liberação de água sempre que a temperatura dos painéis exceder determinado limite. Para a operação o sistema consome mensalmente em média 44Wh/mês. Para o resfriamento são liberados 24,6 litros de água por metro quadrado de área do painel e 0,64 l/m<sup>2</sup> para limpeza realizada a cada quatro dias, no período em que o resfriamento não é acionado. As análises térmicas do módulo solar indicam que a temperatura é uniforme em todo o módulo, reduzindo a degradação térmica e aumentando a potência de saída em 30,7%.

Chandrasekar et al. (2013) propõe a utilização de um sistema de resfriamento passivo dos painéis, em que estruturas de pavios de algodão com 7mm de diâmetro montados na parte traseira do módulo em forma de anel circular, com suas extremidades livres mergulhadas em nanofluido (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e CuO) e água em um reservatório, reduziu a temperatura do módulo em 30% com um ganho de rendimento de 10,4%.

Nižetić et al. (2018) realizou uma avaliação econômico-ambiental das técnicas de resfriamento ativo para painéis fotovoltaicos, identificou que ainda existe uma lacuna a ser preenchida e aperfeiçoada pela literatura. Mostrando que o resfriamento dos painéis é algo necessário, apresentando melhorias entre 10% a 20%. Porém questões como energia para sustentar este sistema, disponibilidade hídrica e riscos de acidificação do solo existem e devem ser mensurados identificando a real viabilidade dos projetos propostos.

Li et al. (2019) analisaram o resfriamento passivo dos módulos fotovoltaicos, modificando a tampa de vidro dos painéis por estruturas ópticas alteradas em escala de micron, atuando como um filtro do espectro luminoso. Visto que, em um semicondutor, apenas a energia dos fótons igual ou maior que a banda de gap pode liberar elétrons, e fótons de baixa energia são usados para aquecer a célula fotovoltaica, desta forma os fótons de subgap devem ser refletidos em vez de absorvidos. Os resultados aferiram um aumento da eficiência entre 2% e

2,5%. Apesar de embrionária, a tecnologia da utilização de filtros óticos apresenta vantagens econômicas e estruturais, visto que nenhum outro equipamento além do sistema fotovoltaico é incorporado ao sistema de conversão.

Conforme exposto pelo tópico, o desempenho do módulo fotovoltaico é fortemente dependente de sua temperatura de operação. A maior parte da energia absorvida pelo módulo é convertida em calor, que normalmente é perdido. Desta forma, apenas parte da radiação é transformada em energia elétrica. Com o aumento da temperatura das placas há uma diminuição da eficiência energética além da redução da vida útil dos painéis causado pelo estresse térmico. Além disso, questões específicas, como localização geográfica e características do clima local, devem ser profundamente analisadas. Desta forma a próxima seção busca analisar a influência eólica, que mitiga os efeitos da temperatura, contribuindo para a geração fotovoltaica.

### **2.10.3 Influência do vento**

Desde a concepção da energia solar, a temperatura se destaca como fator de destaque ao longo deste processo e diversos estudos avaliam o impacto desta variável meteorológica na eficiência energética. Segundo Naghavi et al. (2021), tal variável causa ainda, até 25% de perda na potência de saída, desta forma a busca pela redução da temperatura é de extrema importância. Neste contexto a literatura busca soluções econômicas e tecnicamente viáveis, nas quais se destaca o resfriamento ativo e passivo, sendo o vento o maior contribuinte para a troca de calor entre o módulo fotovoltaico e o ambiente, dado de forma natural ou com auxílio de ventiladores.

Shiravi et al. (2022) identificou por meio do DoE, que para o mesmo fluxo de ar percorrendo os painéis, à medida que a radiação se intensifica a potência gerada é reduzida, concluindo que para aumentar a potência de saída, a velocidade do vento é mais eficaz do que a radiação em determinadas condições de operação.

Gokmen et al. (2016) analisou variáveis como radiação, temperatura e o vento ao longo do ano, identificando um ganho de 3,5% na geração causado pela influência do vento, embasado por algoritmos de maximização. Além disso, foi levantada a questão dos seguidores solares, constatando que o mais viável economicamente é ajustar o ângulo dos painéis ao longo dos meses, estações ou semestres do ano. Concluindo que o vento existe independentemente de ser considerado ou não e é relevante na conversão fotovoltaica e não deve ser ignorado.

Kim et al. (2019) propõe painéis solares com dutos de ventilação interno, realizando experimentos sob as condições da ISO 9806:2017 (denominada Sistemas solares térmicos - Avaliação do desempenho de coletores solares para aquecimento de fluido) constatando que à medida que a média da vazão de ar aumentou de 60 m<sup>3</sup>/h para 200 m<sup>3</sup>/h, a eficiência térmica também aumentou de 29% para 42%. Os resultados comprovaram que a temperatura do módulo fotovoltaico diminuiu à medida que a taxa de fluxo de entrada aumentava, evitando assim a redução de potência do módulo fotovoltaico, conseqüentemente melhorando a eficiência elétrica.

Sarhaddi et al. (2010) propôs um modelo térmico e elétrico aprimorando conceitos de parametrização apresentados na literatura especializada, identificando uma eficiência térmica, elétrica e geral de 17,18%, 10,01% e 45%, respectivamente com a passagem de ar entre as células solares e o material isolante.

Naghavi et al. (2021) estudou o efeito da transferência de calor por convecção natural sobre os módulos fotovoltaicos do telhado, experimental e numericamente. Avaliando o impacto da distância entre o telhado e os painéis fotovoltaicos, encontrando uma variação de 5°C com 200mm de entreferro e ganho de 4% de eficiência.

Khan et al. (2020) e Shahsavari et al. (2021) analisaram as dimensões ideais de aletas que operam como trocadores de calor que potencializam seus efeitos com a passagem do ar identificando uma relação entre a refrigeração e a eficiência das células.

Gokmen et al. (2016) explorou a identificação de locais adequados para a construção de usinas solares, privilegiando localidades com alta intensidade dos ventos, realizando uma análise de caso. Estudo análogo foi realizado por Jaszczur et al. (2021), em que o ângulo do painel foi alterado, concluindo que tal inclinação contribui de forma irrisória no resfriamento da placa solar.

Zerhouni et al. (2014) desenvolveu a modelagem de células fotovoltaicas policristalina usando o DoE, tendo temperatura e radiação solar como variáveis de interesse foi possível realizar o rastreamento do ponto de máxima potência com o auxílio do software Moddle.

Glick et al. (2020a) desenvolveu a primeira investigação controlada de transferência de calor e fluxo de ar em grande escala identificando variações de até 45% no coeficiente de transferência de calor por convecção, com base na direção, velocidade do vento e inclinação dos painéis, culminando com um acréscimo de 5% na geração.

Segundo Glick et al. (2020b) para sistemas de grande escala existem significativa turbulência causada pela disposição dos painéis que são descritas pela equação de Navier-Stokes com média de Reynolds (equação 2.42).

$$\overline{u}_j \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \overline{u'_i u'_j} \right] - F_i \quad (2.42)$$

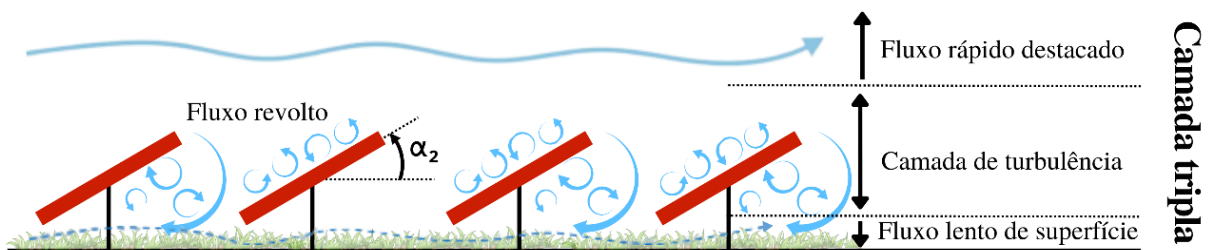
Em que:

- $\rho$  é a densidade;
- $p$  é a pressão;
- $F_i$  é a força aplicada pelos painéis no fluido;
- $u, v, w$  Correspondem às velocidades nas direções x, y e z respectivamente.

A barra superior indica a média do conjunto.

Transportando a teoria da equação 2.42 para a prática, temos que a variação do ângulo de inclinação pode produzir três regimes de fluxo, em que cada posição altera a transferência de calor por condução (GLICK et al., 2020b). A primeira, contém três camadas de fluxo, acima do painel se destaca o fluxo rápido, vórtices atrás dos painéis, fluxo lento abaixo do painel com o menor coeficiente de transferência de calor por convecção, conforme representado pela Figura 2.19. O fluxo lento de superfície é causado pelo atrito da corrente de ar com superfície do solo, a qual ganha intensidade conforme a altitude, já a turbulência se concentra nas superfícies dos painéis, culminando numa baixa taxa de transferência de calor.

Figura 2.19 – Influência da inclinação dos painéis na distribuição de calor e fluxo de ar em camada tripla.

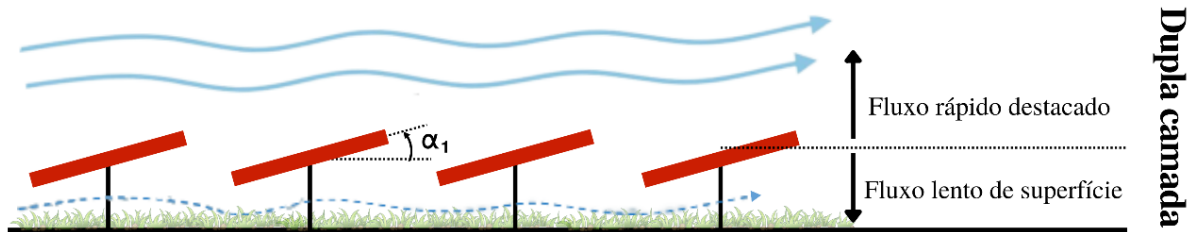


Fonte: Adaptada de Glick et al. (2020b).

A segunda corrente de ar (Figura 2.20) possui duas camadas com fluxo rápido acima dos painéis e lento abaixo, apresentando um aumento do coeficiente de transferência de calor

por convecção em comparação com o fluxo de três camadas em função da inexistência de turbulência.

Figura 2.20 – Influência da inclinação dos painéis na distribuição de calor e fluxo de ar em camada dupla

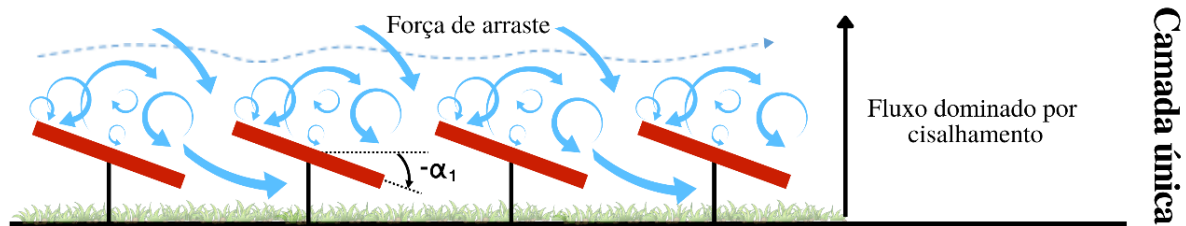


Fonte: Adaptada de Glick et al. (2020b).

A terceira corrente de ar (Figura 2.21) apresenta uma única camada, que consiste em um fluxo denominado por cisalhamento, com o elevado coeficiente de transferência de calor.

Turbulências de significativa intensidade removem calor da parte superficial do painel, a inclinação do painel interagindo com a corrente de ar culmina com fluxo de ar de maior intensidade na parte inferior do painel contribuindo de forma significativa na transferência de calor em ambas as superfícies, além de colaborar na remoção de sedimentos.

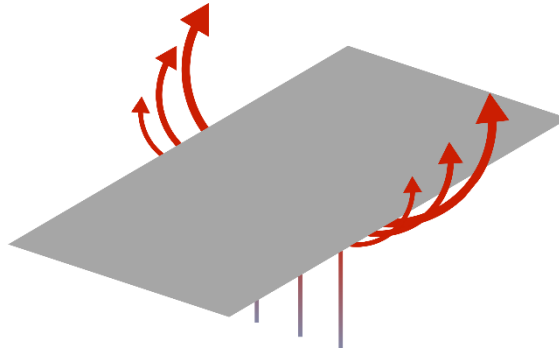
Figura 2.21 – Influência da inclinação dos painéis na distribuição de calor e fluxo de ar em camada única



Fonte: Adaptada de Glick et al. (2020b).

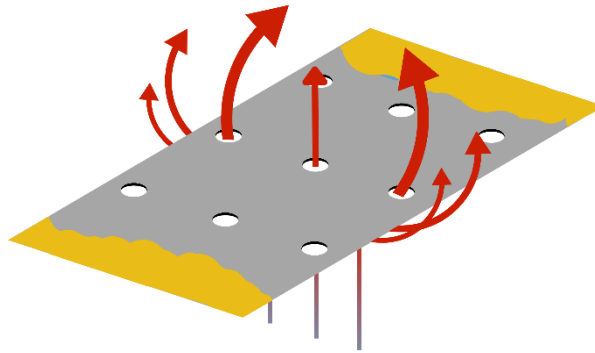
Abd-Elhady et al. (2018) propõe a perfuração dos painéis como técnica na mitigação dos esforços térmicos, privilegiando a passagem de ar e a convecção natural, permitindo que a camada quente de ar sob o painel suba por esses orifícios, criando correntes naturais que resfriam o painel, conforme Figura 2.22 e 2.23. Experimentos e simulações foram realizados, concluindo a validade da proposta, identificando que existem um diâmetro e número de furos ideal para cada tipo de projeto.

Figura 2.22 – Painel inteiriço sem passagem de ar para resfriamento da placa



Fonte: Adaptado de Abd-Elhady et al. (2018).

Figura 2.23 – Painel perfurado com passagem de ar para resfriamento da placa



Fonte: Adaptado de Abd-Elhady et al. (2018).

## 2.11 Parametrização matemática das variáveis meteorológicas

Trabalhos, como o de Gokmen et al. (2016), buscam definir o ângulo de inclinação ideal para o aproveitamento fotovoltaico. Dentre a maioria desses estudos, há consenso de que a inclinação igual à latitude do local é a mais recomendada para regiões ensolaradas e com iluminação direta. Por outro lado, a utilização de superfícies inclinadas é o método mais indicado para regiões de clima nublado, privilegiando a iluminação difusa e refletida.

O cálculo da radiação do feixe é puramente geométrico e bastante direto para que não haja diferença entre os modelos, desta forma, segundo Gokmen et al. (2016) a radiação do feixe em uma superfície inclinada pode ser calculada com as seguintes equações 2.43 e 2.44:

$$G_{\beta,b} = G_b \cdot \frac{a}{b} \quad (2.43)$$



$$\frac{a}{b} = \frac{\max(0, \cos \theta)}{\max(0.087, \cos \theta_z)} \quad (2.44)$$

Em que:

- $G_b$ : Radiação do feixe horizontal;
- $\theta$ : Ângulo de incidência;
- $\theta_z$ : Ângulo zenital.

A radiação difusa é calculada pela equação 2.45, dada por:

$$G_{\beta,d} = G_d \left[ (1 - F_1) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad (2.45)$$

Em que:

- $G_d$ : Radiação difusa horizontal;
- $\beta$ : Ângulo de inclinação;
- $F_1$  e  $F_2$ : Coeficientes derivados estatisticamente, que, segundo Gokmen et al. (2016) variam conforme o valor do ângulo zenital, claridade do céu e índices de brilho que são dados pelo estudo de Perez et al. (1990).

A radiação refletida no solo é dada pela equação 2.46, em que  $\rho$  é a refletância do solo.

$$G_{\beta,r} = (G_b + G_d) \cdot \rho \cdot \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.46)$$

Assim, a somatória das três componentes, feixe, radiação difusa e refletida no solo culminam com radiação total, dada pela equação 2.47.

$$G_{\beta} = G_{\beta,b} + G_{\beta,d} + G_{\beta,r} \quad (2.47)$$

Segundo Gokmen et al. (2016) a equação 2.48 é amplamente utilizada pela literatura para análise de regiões com pouco vento ou ambiente controlado, a equação 2.49 é mais precisa pois considera os parâmetros da velocidade do vento e o tipo de montagens.

$$T_c = T_a + \left( \frac{T_{noct} - 20}{800} \right) \cdot G_\beta \quad (2.48)$$

$$T_c = T_a + \omega \cdot \left( \frac{0.32}{8.91 + 2V_f} \right) \cdot G_\beta \quad (2.49)$$

Em que:

- $T_a$ : Temperatura ambiente;
- $G_\beta$ : Plano de radiação do arranjo;
- $\omega$ : Coeficiente de montagem e configuração dos painéis;
- $V_f$ : Velocidade do vento;

A velocidade do vento pode variar conforme a altura e é parametrizada pela equação 2.50 e complementada pela equação 2.51.

$$\frac{V_f}{V_{ref}} = \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^n \quad (2.50)$$

$$n = \frac{0.37 - 0.0881 \ln(V_{ref})}{1 - 0.0881 \ln\left(\frac{Z_{ref}}{10}\right)} \quad (2.51)$$

Em que:

- $Z_{ref}$ : Altura de referência medida a partir do solo;
- $Z$ : Altura em metros;
- $V_{ref}$ : Velocidade do vento conhecida na altura de referência.

Segundo Gokmen et al. (2016), a conversão fotovoltaica, conectada à rede ou autônoma, depende de diversos parâmetros, dentre eles se destacam a eficiência do módulo, material das células e características do inversor. Desta forma, o rendimento do módulo é parametrizado pela equação 2.52 e a potência de saída pela equação 2.53.

$$\eta_{pv} = \eta_{inv} \cdot \eta_{perda} \cdot \eta_{ref} \cdot \left( 1 - k_T(T_c - T_{ref}) \right) \quad (2.52)$$

Em que:

- $\eta_{inv}$ : Eficiência do inversor;
- $\eta_{perda}$ : Perdas;
- $\eta_{ref}$ : Eficiência do módulo;
- $k_T$ : Coeficiente de temperatura, dado pela tabela de dados do fabricante;
- $T_c$ : Temperatura de operação do módulo fotovoltaico;
- $T_{ref}$ : Temperatura de referência de operação da placa fotovoltaica (25°C).

$$P_{pv} = \eta_{pv} \cdot A_{pv} \cdot G_{\beta} \quad (2.53)$$

Em que:

- $P_{pv}$ : Potência de pico do arranjo fotovoltaico;
- $A_{pv}$ : Área do painel fotovoltaico;
- $G_{\beta}$ : Radiação solar na superfície inclinada do módulo.

Segundo Gokmen et al. (2016), é importante ressaltar que ao longo do dia a eficiência do inversor varia, apresentando menor rendimento no nascer e pôr do sol. Dessa forma, a curva de eficiência em função da potência, assim como a equação que relaciona essas variáveis e é fornecida pelo fabricante, deve ser levada em consideração.

## 3 Metodologia e estudo de caso

### 3.1 Caracterização das variáveis de interesse

Este tópico tem como objetivo descrever as variáveis de interesse da dissertação, que buscam avaliar os fatores que afetam a geração de energia fotovoltaica. As características geográficas e os dados meteorológicos podem ter um impacto significativo na produção de energia fotovoltaica. Para garantir a melhor eficiência e produção de energia ao longo do tempo, é essencial considerar esses fatores e combiná-los com o DoE, permitindo obter uma compreensão mais completa dos fatores que afetam a geração fotovoltaica e desenvolver soluções mais eficazes para aumentar a eficiência e produção de energia.

### 3.1.1 Caracterização do local de estudo

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o estado de Minas Gerais (MG) está localizado na região sudeste do Brasil entre as latitudes 14°13'57" e 22°55'47" e as longitudes 39°51'24" e 51°02'56", ocupando 582.586 km<sup>2</sup> do território nacional. Constituindo um complexo topográfico com a Serra do Espinhaço, Serra da Canastra e Serra da Mantiqueira, com altitudes que variam de 76 a 2892 m.

Segundo Reboita et al. (2015) a distância entre Minas Gerais e o oceano influencia diretamente para uma maior amplitude no ciclo diurno da temperatura do ar. Com clima de monção, em que ocorre uma reversão sazonal da circulação atmosférica causada pela diferença de aquecimento entre oceanos e continente, além de sua topologia que influencia a direção e intensidade dos ventos.

A região do Sul de Minas apresenta significativa elevação, o que contribui para uma elevada precipitação anual de 1600mm. Além de temperaturas mais baixas, 20°C em média, com variação entre 14°C e 27°C em média ao longo de um ano (REBOITA et al., 2015; GARCIA et al., 2018).

Geograficamente Itajubá está na encosta da serra da Mantiqueira, estendendo-se por 290,45 km<sup>2</sup> de extensão, dos quais 70,70 km<sup>2</sup> compõem a área urbana. Seu ponto mais alto está a 1746 metros e o mais baixo a 830 metros acima do nível do mar. Com topologia ondulada-montanhosa sendo 78% montanhoso, 12% ondulada e 10% plano (PREFEITURA DE ITAJUBÁ, 2018).

A Universidade Federal de Itajubá, Campus Professor José Rodrigues Seabra (Figura 3.1) está localizado na cidade de Itajubá, com latitude 22°30'30" S/longitude 45°24'20" O, com uma elevação de 842 metros (IBGE, 2023).

Figura 3.1 – Foto aérea Campus Professor José Rodrigues Seabra



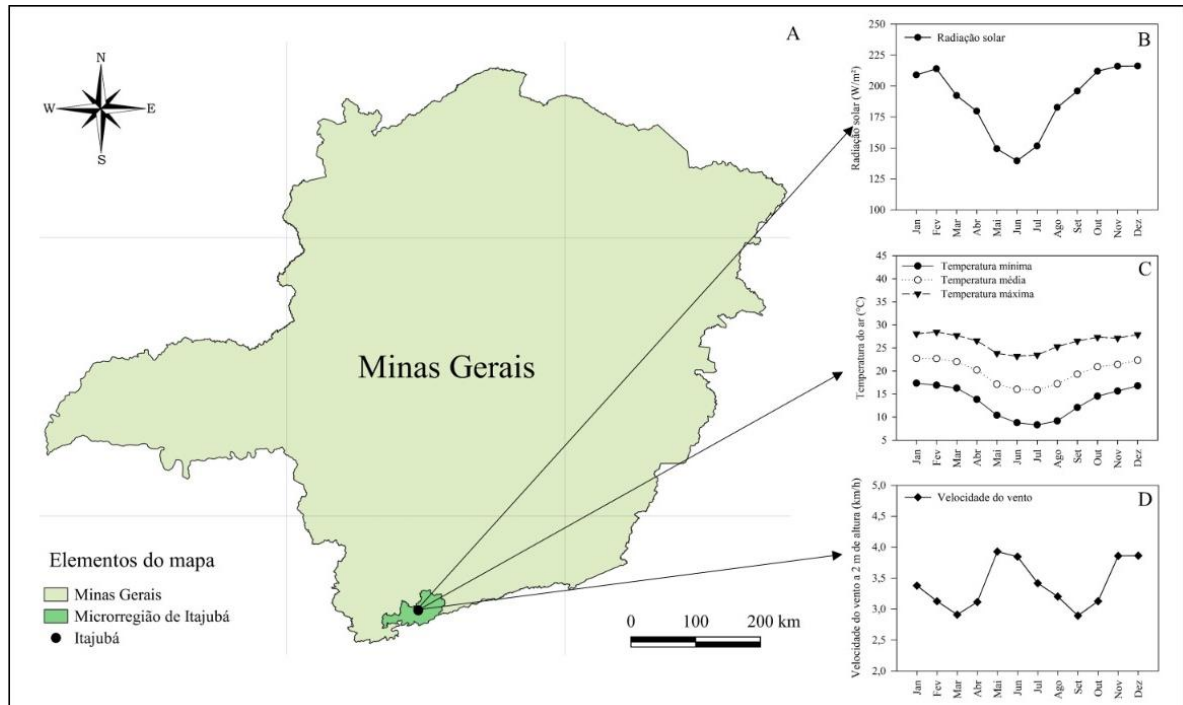
Fonte: Workfly Drones.

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).

### 3.1.2 Caracterização dos dados meteorológicos

Os dados de radiação solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), temperatura mínima, média e máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) e velocidade do vento ( $\text{km}/\text{h}$ ) (Figura 3.2) foram obtidas de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá. Itajubá possui clima subtropical de altitude (Cwa), típico de monção, com duas estações bem definidas: outono/inverno secos (de abril a setembro) e primavera/verão úmido (outubro a março) (MARTINS et al., 2018; FAGUNDES et al., 2021).

Figura 3.2 – Localização da área de estudo e climatologia das variáveis meteorológicas.

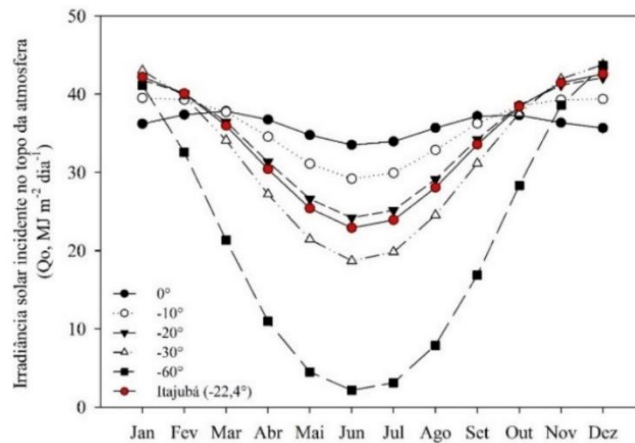


Fonte: Próprio autor, 2023.

A irradiância solar incidente no topo da atmosfera varia de acordo com a latitude, estação do ano e hora do dia (Figura 3.3), portanto, para latitudes entre  $20^{\circ}\text{S}$  a  $30^{\circ}\text{S}$  a variação ocorre entre  $\sim 220,4$  a  $510,4 \text{ W}/\text{m}^2$ , no entanto para Itajubá que se encontra na Latitude:

22°24'46,4" S e Longitude: 45°26'48,94" O a variável fica entre ~266,8 a 493 W/m<sup>2</sup>, Figura 3.3. Enquanto a climatologia da radiação solar, que chega à superfície, em Itajubá varia em média entre ~139,2 a 220,4 W/m<sup>2</sup>.

Figura 3.3 – Variação da irradiância solar incidente no topo da atmosfera ( $Q_0$ ) entre as latitudes e meses do ano



Fonte: Próprio autor, 2023.

Conforme constatado pelos dados obtidos da estação meteorológica, a irradiação solar anual apresenta pequena variação de amplitude ao longo do ano, informação esta que é ratificada pelo Global Solar Atlas (<https://globalsolaratlas.info/map>, 12/03/2023) explicitada pela Figura 3.4 e revalidado pelos dados de Irradiação do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (<http://www.cresesb.cepel.br/>, 12/03/2023), Figura 3.5.

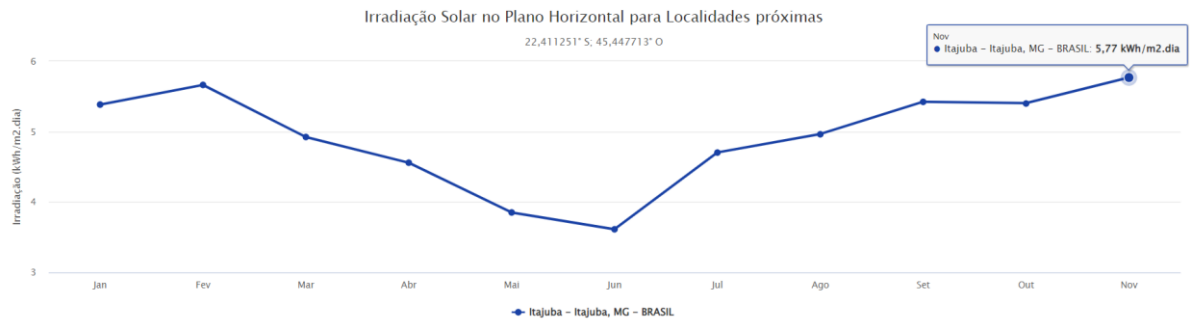
Figura 3.4 – Irradiação Normal no Brasil



Fonte: Global Solar Atlas, 2023.

Figura 3.5 – Irradiação solar em Itajubá-MG

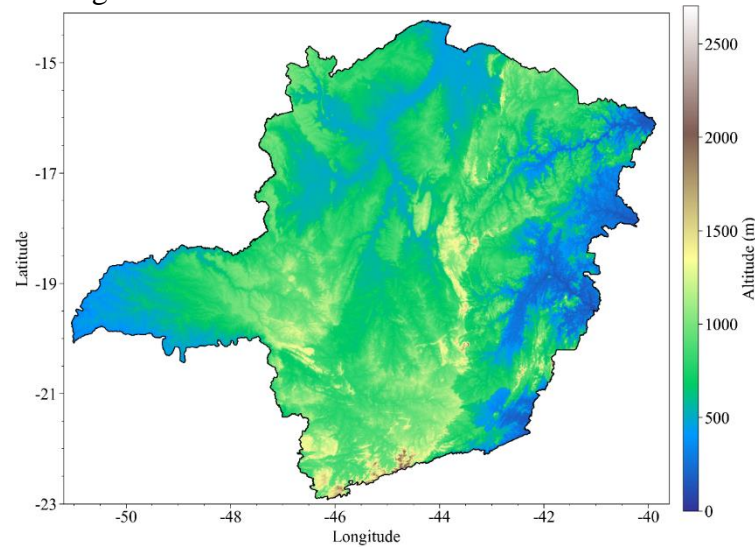
#	Estação	Município	UF	País	Irradiação solar diária média [kWh/m <sup>2</sup> .dia]												Média	Delta			
					Latitude [°]	Longitude [°]	Distância [km]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set			Out	Nov	Dez
1	Itajuba	Itajuba	MG	BRASIL	22,401° S	45,449° O	1,1	5,38	5,68	4,92	4,56	3,85	<b>3,61</b>	3,83	4,70	4,97	5,42	5,40	<b>5,77</b>	<b>4,84</b>	<b>2,16</b>
2	Itajuba	Itajuba	MG	BRASIL	22,5° S	45,449° O	9,9	5,37	5,68	4,93	4,57	3,83	<b>3,57</b>	3,79	4,69	4,96	5,42	5,38	<b>5,81</b>	<b>4,83</b>	<b>2,24</b>
3	Itajuba	Itajuba	MG	BRASIL	22,401° S	45,349° O	10,2	5,28	5,54	4,81	4,47	3,82	<b>3,58</b>	3,82	4,72	4,92	5,35	5,25	<b>5,81</b>	<b>4,76</b>	<b>2,03</b>



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2023.

A temperatura varia bastante no estado de Minas Gerais tal variação ocorre principalmente por influência das diferentes altitudes da topografia (REBOITA et al., 2015). Além disso, a entrada de frentes frias, principalmente na porção sul de Minas Gerais, reduz as temperaturas no inverno e atua na ocorrência de clima temperado (Cwa e Cwb) (GARCIA et al., 2018). Portanto, em Itajubá que se encontra a 850 m de altitude (Figura 3.6) a climatologia da temperatura mínima fica entre 8°C a 17°C, da média entre 15°C a 23°C e máxima entre 23°C a 28.5°C (Figura 3.2).

Figura 3.6 – Altimetria do estado de Minas Gerais



Fonte: Próprio autor, 2023.

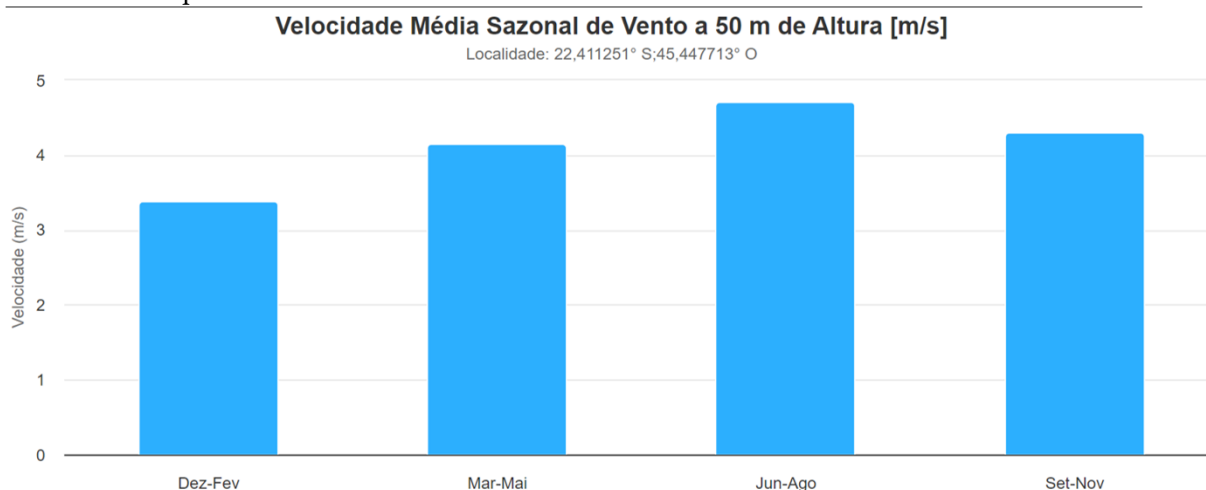
Além disso, a topografia peculiar de Minas Gerais com diferentes complexos topográficos como as serras da Mantiqueira, da Canastra e do Espinhaço favorece o desenvolvimento de circulações de mesoescala, brisa de vale e montanha, que influenciam a

direção e a intensidade do vento (REBOITA et al., 2014; REBOITA et al., 2015). Em Itajubá a velocidade do vento varia 2,52 a 3,96 km/h (Figura 3.2), sendo mais intensos entre setembro a dezembro devido a localização do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, que no verão se encontra mais próxima ao continente, contribuindo então para a maior intensidade dos ventos na região (REBOITA et al., 2015).

Conforme constatado pelos dados obtidos da estação meteorológica da UNIFEI, a velocidade do vento a 2 m apresenta pequena variação ao longo do ano, dado esse que é revalidado pelo CRESESB para ventos a 50 m, conforme Figura 3.7.

Figura 3.7 – Velocidade do vento a 50 m em Itajubá-MG

Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
Velocidade média do vento	m/s	3,39	4,15	4,71	4,31	4,14
Fator c		3,83	4,68	5,3	4,87	4,67
Fator k		2,23	2,46	2,68	2,23	2,32
Densidade de potência	W/m <sup>2</sup>	41	70	96	85	73



Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica, 2023.

### 3.1.3 Caracterização da geração

O campus José Rodrigues Seabra da UNIFEI tem investido em energia fotovoltaica ao longo do tempo, culminando em uma potência instalada de 1MWp ao final de 2022. Em 2013, um projeto conjunto entre a UNIFEI e CNPq resultou na instalação de 27,44 kWp no Centro de Estudos em Qualidade da Energia e Proteção Elétrica (QMAP). Em 2019, em parceria com o MEC, foram investidos R\$2.492.541,88 na compra de 33 usinas fotovoltaicas de 18,48 kWp cada, totalizando aproximadamente 610kWp.



Os painéis solares foram distribuídos da seguinte forma: 396,6 kWp foram instalados nos Blocos ISEE (O Instituto de Sistemas Elétricos e Energia) e IESTI (Instituto de Engenharia de Sistemas e Tecnologia da Informação), sob a administração do IEM (Instituto de Engenharia Mecânica); 147,8 kWp foram instalados nos Blocos X1 e X2, sob a administração do PRG (Pró-Reitoria de Graduação); e 92,4 kWp foram instalados no Bloco K. Esses blocos foram escolhidos por serem locais de aulas, tornando o ambiente de estudo também um laboratório.

Em 2021, a UNIFEI recebeu um novo investimento de R\$2,1 milhões, que foram utilizados para incrementar mais 350 kWp de potência e construir um laboratório para a operação e manutenção do sistema fotovoltaico. Com isso, o campus alcançou uma potência instalada de 1MWp (NE-SFV, 2022).

Como objeto específico de estudos, o QMAP possui 112 módulos fotovoltaicos da Yingli Solar (YL245P-29b) de 245 W totalizando uma potência instalada de 27,44 kWp. Estruturalmente os painéis têm inclinação de 23° e desvio azimutal de -5° com características específicas expostas abaixo, conforme Silva (2020):

Fabricante: Yungli Solar,

Modelo: YL245P-29b,

Módulo composto por 60 células policristalinas,

Dimensão do módulo = 1,65 m × 0,99 m × 0,04 m,

Potência máxima (P<sub>max</sub>) = 245 Wp,

Tensão Máxima de Potência (V<sub>mp</sub>) = 30,2 V,

Corrente de potência máxima (I<sub>mp</sub>) = 8,11 A,

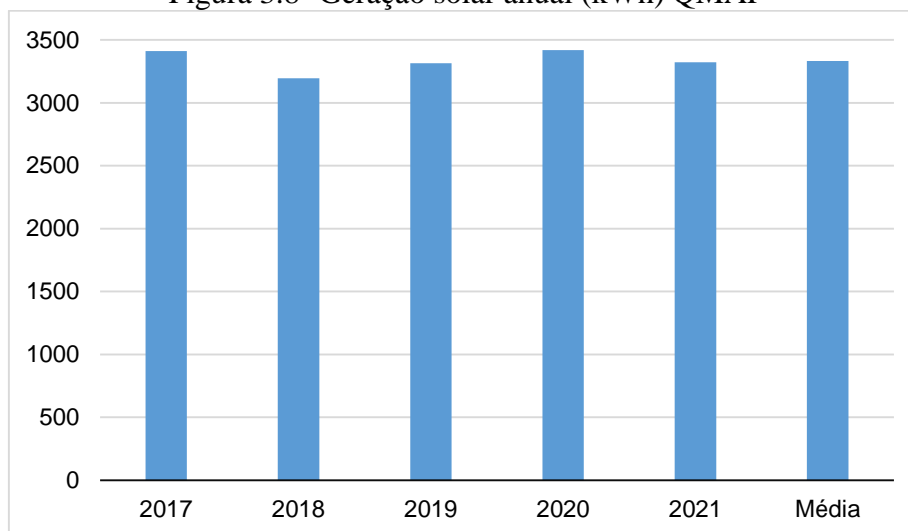
Tensão de circuito aberto (V<sub>oc</sub>) = 37,8 V,

Corrente de curto-circuito (I<sub>sc</sub>) = 8,63 A,

Coefficientes de temperatura de P<sub>max</sub> = -0,45%/°C.

Os dados de geração do QMAP, apresenta pequena variação com média anual de 38,86 MWh, com produção média mensal de 3,33MWh, conforme exibido pela Figura 3.8.

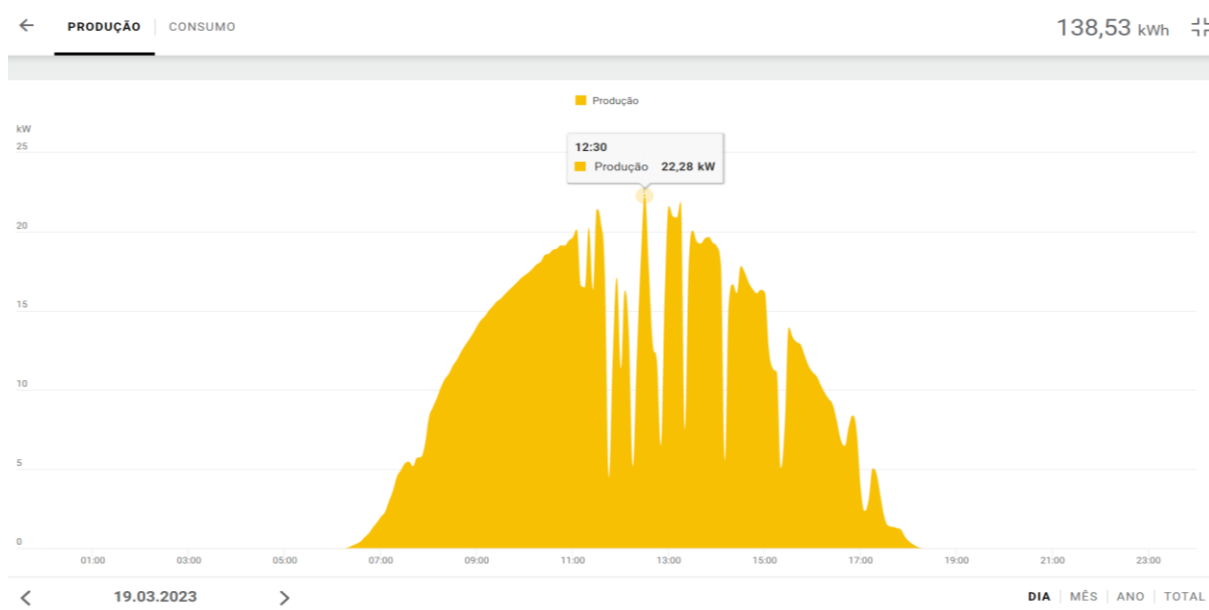
Figura 3.8- Geração solar anual (kWh) QMAP



Fonte: Solar.Web, 2023.

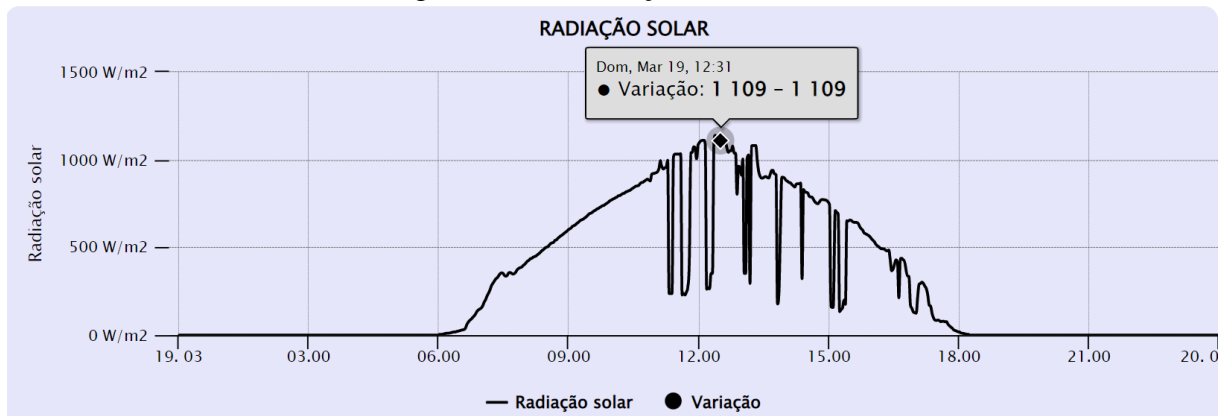
É importante salientar a concordância entre as informações de geração de energia fotovoltaica do QMAP, acessíveis pela plataforma Froniuselo (<https://www.solarweb.com>), e os dados de radiação solar obtidos pela estação meteorológica automática (<https://meteorologia.unifei.edu.br>). Tal concordância é claramente evidenciada pelas Figuras 3.9 e 3.10, e tem um papel crucial na garantia da confiabilidade dos dados analisados na próxima seção, uma vez que diferentes fontes de informação convergem para os mesmos valores.

Figura 3.9 – Geração solar diária QMAP



Fonte: Solar.Web, 2023.

Figura 3.10 – Radiação solar diária



Fonte: Meteorologia Unifei, 2023.

### 3.2 Análise de dados

O DoE pode ser utilizado em diversas áreas, possibilitando planejamento, análises, modelagem e otimização de experimentos, com inferência e economia na experimentação, desta forma seu uso é interessante pela capacidade de simular com uma pequena série temporal de dados.

Em sua maioria, os estudos encontrados na literatura, como citados na seção 2.10, realizaram testes em ambiente controlado (laboratórios), verificando dessa forma a influência das variáveis meteorológicas na geração fotovoltaica por meio do DoE. Portanto, este estudo se diferencia em considerar uma situação real de campo, ou seja, os dados aqui utilizados derivam de observações meteorológicas próxima a área de estudo e sujeitos a toda e qualquer variação das condições meteorológicas.

Nesse sentido, este estudo de caso foi realizado em seis etapas:

- Etapa I: Foi analisada a correlação entre os dados de potência gerada e os dados de quatro variáveis meteorológicas: radiação solar, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento. A análise foi realizada com uma longa série temporal de 2499 dados (anexo A).
- Etapa II: O número de dados da Etapa I foi reduzido para 188 dados (Anexo B) e o DoE foi implementado, de forma que o método conseguisse encontrar erros e ruídos entre as variáveis e a potência gerada.
- Etapa III a V: A análise entre os dados das variáveis meteorológicas e a potência gerada foi realizada de forma a encontrar um modelo mais simples e robusto, com a menor quantidade de dados possíveis, que é a ideia principal do método do DoE, 20 dados

(Anexo C). Para isso, foram removidos ruídos e variáveis de baixa significância, a fim de encontrar o ponto ótimo de geração.

- Etapa VI: Por fim, priorizou-se nesta etapa análise e investigação de um modelo o mais simples possível, com baixa quantidade de dados e elevada confiabilidade na predição.

### 3.2.1 Etapa I

Esta etapa visa balizar e servir como parâmetro para a implementação do DoE, com base em 2499 dados meteorológicos e de geração solar advindos da estação meteorológica automática da UNIFEI e da geração fotovoltaica do QMAP, conforme explicitado na seção 2.12 desse estudo caracterização das variáveis de interesse.

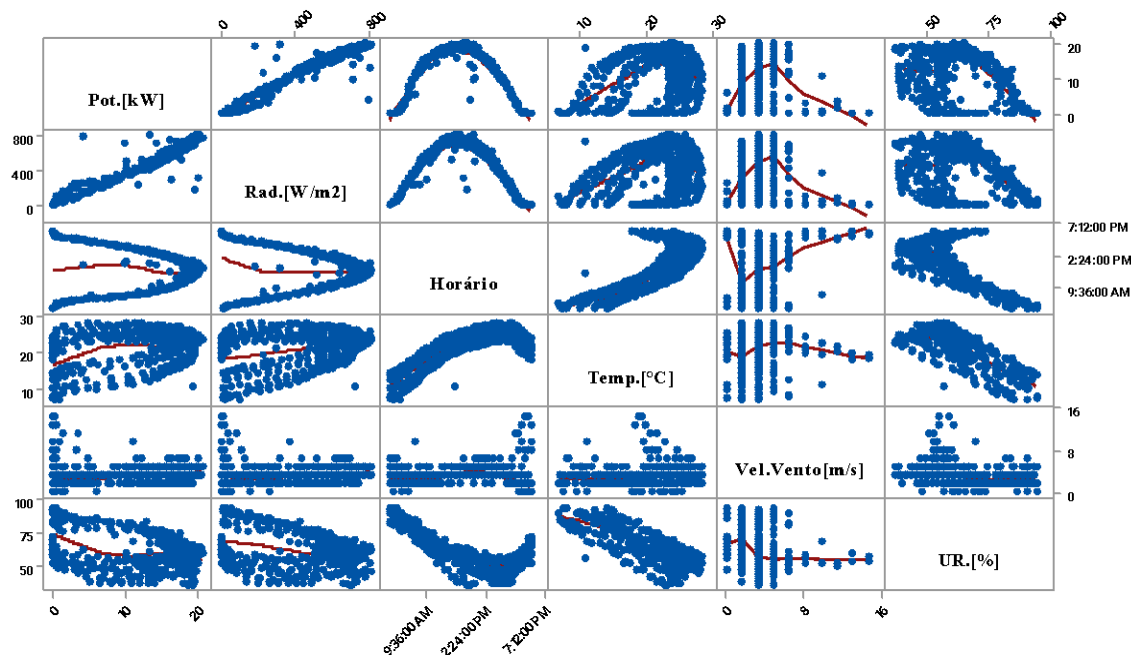
Preliminarmente a correlação (Tabela 3.1) e a matriz de dispersão (Figura 3.11) apresentam a correlação entre a potência, horário e as quatro variáveis meteorológicas. O coeficiente de correlação varia entre -1 e +1, sendo 1 uma relação linear perfeita e 0 a inexistência de correlação. Desta forma, como já se previa, a radiação solar influencia significativamente a potência, seguida pela temperatura que impacta de forma moderada e o horário de forma insignificante. Enquanto, a velocidade do vento e o horário tendem a zero, indicando que não existe uma relação linear forte entre as 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 a correlação indica associações estatísticas entre as variáveis, mas não fornece informações sobre causalidades.

Tabela 3.1 – Tabela de correlação

	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

Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.11 – Matriz de correlação entre a potência gerada, horário e variáveis meteorológicas considerando uma longa série temporal

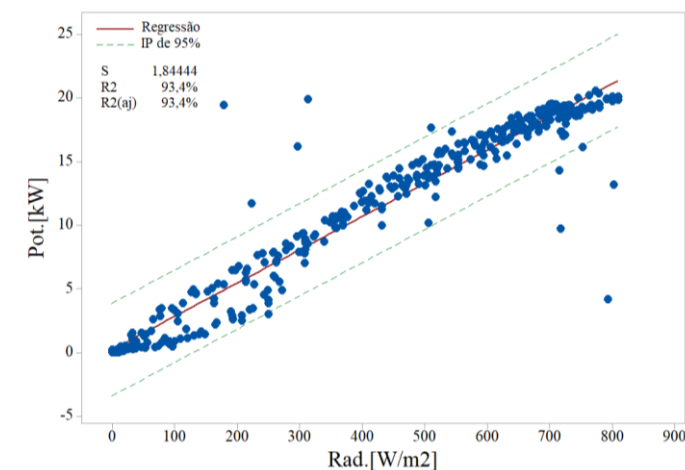


Fonte: Próprio autor, 2023.

Como a radiação solar apresentou correlação com a potência gerada (0,966), foi possível determinar que existe associação entre a resposta, potência, e o termo, radiação solar, e tal relação é estatisticamente significativa (Figura 3.12). Evidenciando desta forma que existe uma alta correlação entre potência e radiação, pelo valor de  $R^2$  ( $R^2(\text{aj}) = 93,4\%$ ) em que o modelo de regressão linear se adequa a curva de dados, culminando com um intervalo de predição (IP) de 95%. De forma complementar, pela equação de primeiro grau gerada é possível estimar a potência gerada por diferentes valores de radiação solar com 95% de confiança.

Figura 3.12 – Gráfico de regressão, potência em função da radiação solar

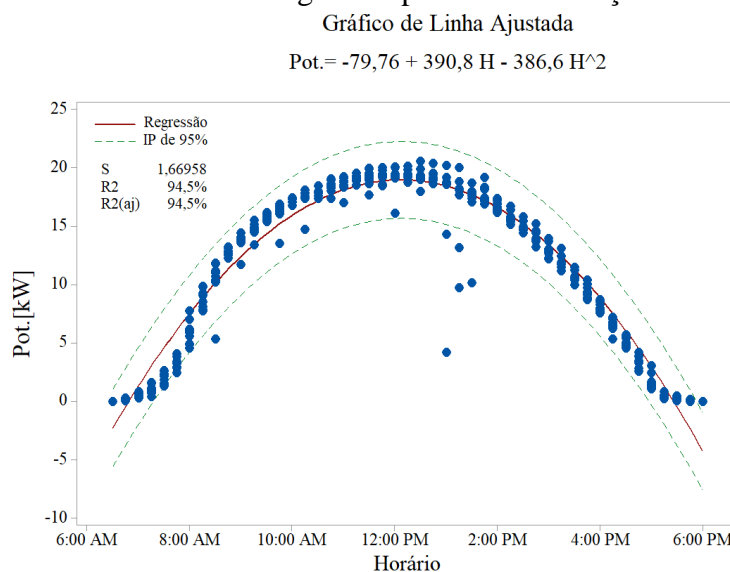
Gráfico de Linha Ajustada  
Pot = 0,2063 + 0,02615 Rad.



Fonte: Próprio autor, 2023.

Ao analisar a potência em função do horário, o fator de correlação linear tende a zero (correlação = -0,070), porém pela característica específica da geração fotovoltaica, evidenciada pela matriz de correlação (Figura 3.11) é possível verificar pela primeira linha e terceira coluna a correlação quadrática entre ambas, evidenciando uma curvatura no modelo matemático. Portanto, existe uma forte correlação quadrática, com  $R(aj)$  de 94,5% em um IP de 95%, como evidenciado pela Figura 3.13.

Figura 3.13 – Gráfico de regressão potência em função do horário



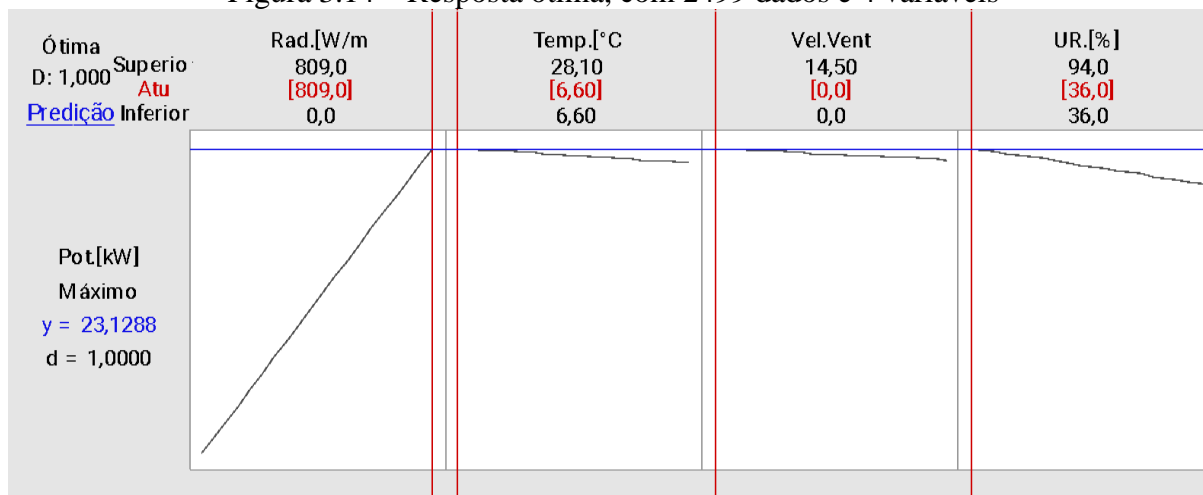
Fonte: Próprio autor, 2023.

A partir da análise gráfica de regressão linear, que relaciona a potência em função da radiação solar (Figura 3.12), é possível estabelecer pontos importantes para otimização, conforme Figura 3.14. Assim como, a regressão da potência em função do horário possui o formato de parábola com concavidade para baixo, indicando a existência de um ponto de máxima potência (Figura 3.14). Ou seja, esse ponto representa o ponto ideal para a obtenção da maior potência possível no sistema em situação real de campo. Além disso, essa representação permite identificar o ponto ótimo de geração com base na radiação solar, temperatura, velocidade do vento e umidade relativa. Dessa forma, mesmo sabendo que a radiação solar é a variável de maior correlação e influência na potência gerada, é fundamental considerar não apenas o fator solar para obter o máximo rendimento e eficiência, mas também as demais variáveis, uma vez que o sistema fotovoltaico opera em diferentes condições ambientais.

Portanto, por meio da análise do gráfico linear de regressão, 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 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 3.14 – Resposta ótima, com 2499 dados e 4 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

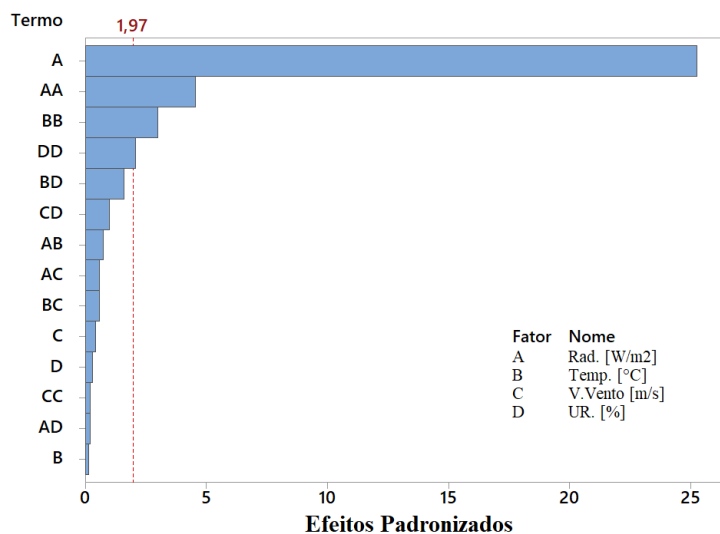
A compreensão dessa primeira etapa permite uma melhor otimização do sistema, visando maximizar a potência gerada e alcançar a eficiência energética desejada, porém com um elevado número de dados, desta forma as próximas etapas buscam mitigar o número de informações com confiabilidade e predição, que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

### 3.2.2 Etapa II

Essa 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, potência gerada.

De forma preliminar o gráfico de Pareto (Figura 3.15), compara a magnitude relativa e a significância dos efeitos principais quadráticos e interações. Com isso, também é possível identificar a radiação solar como efeito significativo, de primeira e segunda ordem, temperatura e umidade com menor significância, porém ambos com efeitos quadráticos, indicando que a relação entre tais fatores e a resposta segue uma linha curva, conforme a Figura 3.20. Enquanto demais variáveis não apresentam interações e efeitos significativos na potência gerada Figuras 3.18 e Figura 3.19.

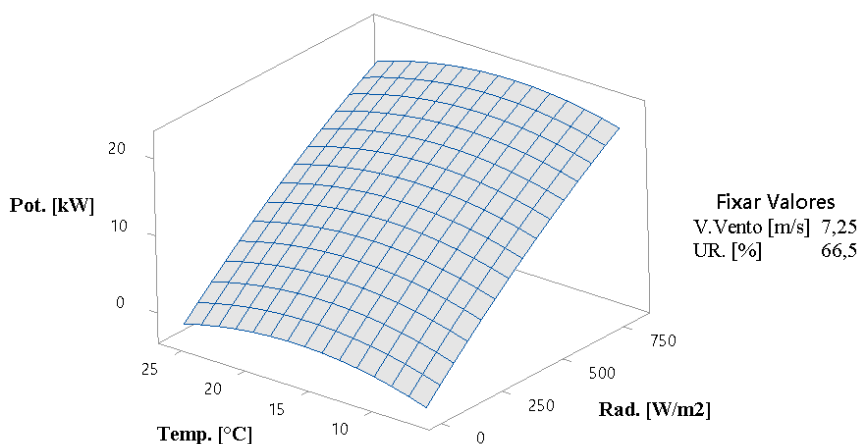
Figura 3.15 – Gráfico de Pareto com 188 dados e 4 variáveis  
(a resposta é Pot. [kW];  $\alpha = 0,05$ )



Fonte: Próprio autor, 2023.

Já pela superfície de resposta (Figura 3.16) e contorno (Figura 3.17) 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. Assim como é possível visualizar pelas superfícies de resposta (Figura 3.18 e 3.19) que temperatura e umidade apresentaram efeitos de baixa significância. Desta forma, é possível chegar ao resultado similar a Etapa I, em que o ponto ótimo de potência é  $y = 22,8241$  kW, com radiação solar de 809 W/m<sup>2</sup>, temperatura em 13,54°C, velocidade do vento igual a 14,5 m/s e umidade relativa de 81%.

Figura 3.16 – Gráfico de Superfície em função da potência, radiação solar e temperatura, com 188 dados e 4 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.



Figura 3.17 – Gráfico de Contorno da potência em função da temperatura e radiação solar, com 188 dados e 4 variáveis

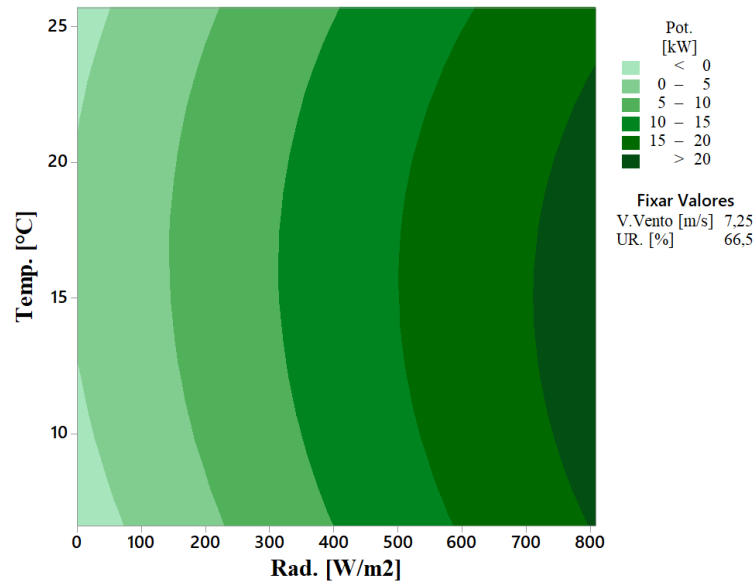


Figura 3.18 – Gráfico de Superfície da potência em função da umidade relativa e radiação solar, com 188 dados e 4 variáveis

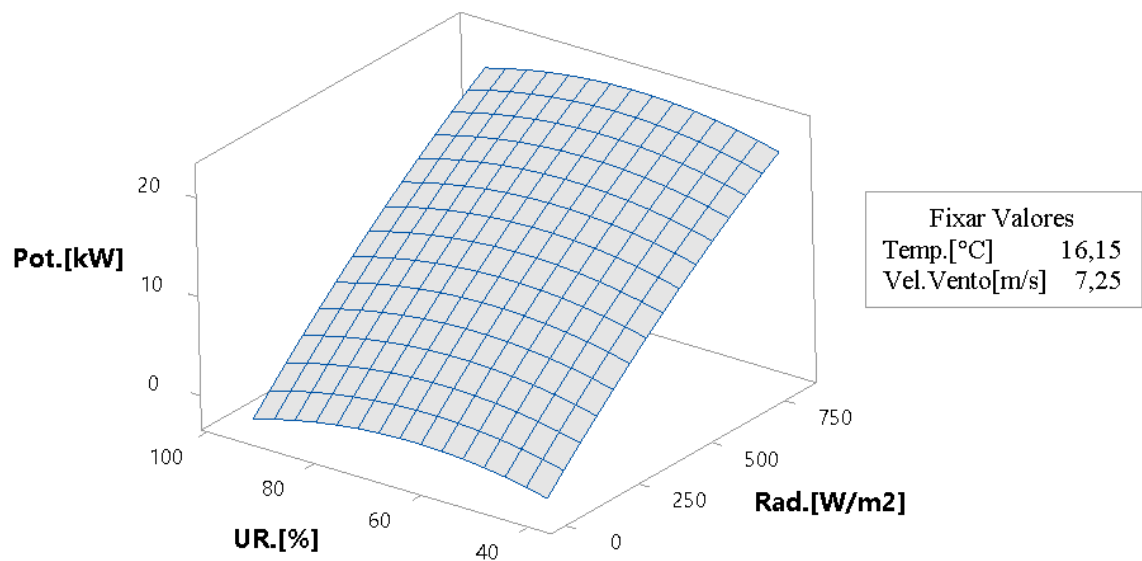
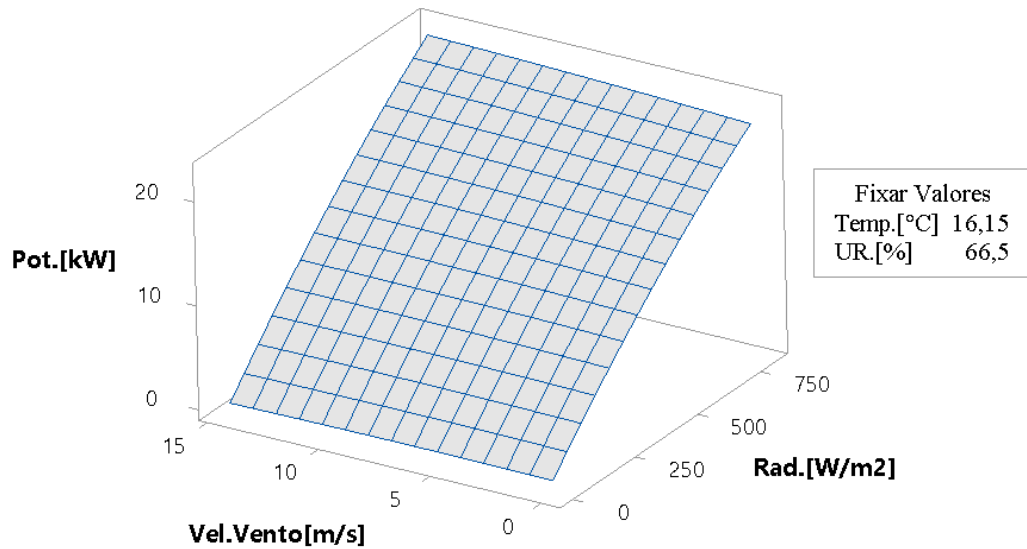
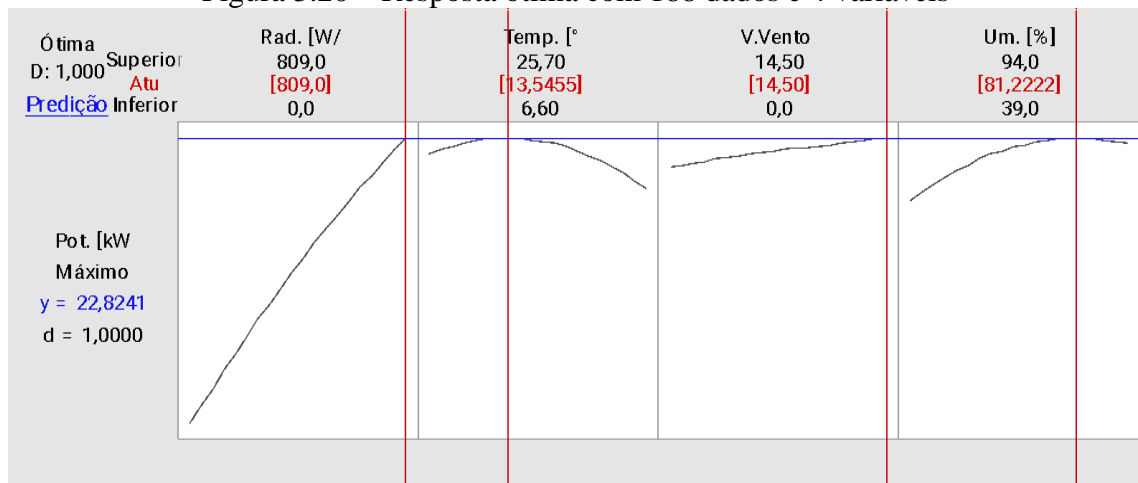


Figura 3.19 – Gráfico de Superfície da potência em função da velocidade do vento e radiação solar, com 188 dados e 4 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.20 – Resposta ótima com 188 dados e 4 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

A convergência entre as duas primeiras etapas, demonstra a validade do DoE para este tipo de problema, apesar das intermitências das variáveis meteorológicas. O elevado número de dados inviabiliza estudos práticos, desta forma a próxima etapa realiza a mesma análise, porém reduzindo drasticamente o número de dados, mantendo a mesma predição.

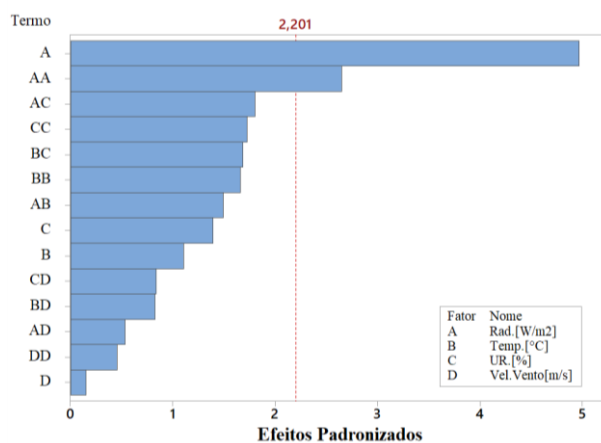
### 3.2.3 Etapa III

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,  $2^4$  pontos fatoriais e 2 pontos centrais sendo necessário 26 dados, conforme discutido na seção 2.8.

O resultado obtido então apresenta significativa discrepância do observado na Etapa I e II, conforme explicitado pela figura 3.23. Pelo gráfico de Pareto (Figura 3.21) 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 3.15. 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 3.11).

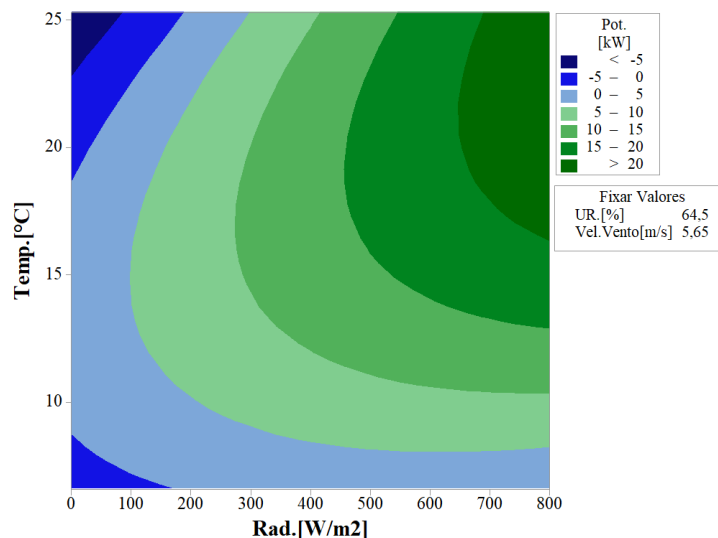
A tabela de coeficientes codificados (Tabela 3.2), corrobora com a constatação de que a velocidade do vento e umidade relativa estão poluindo os resultados, pois apresentam elevado VIF (*Variance Inflation Factor*), Vel. Vent (VIF de 31,15) e UR[%] (VIF = 101,91). O que indica a presença de multicolinearidade 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.

Figura 3.21 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 4 variáveis  
(a resposta é Pot.[kW];  $\alpha = 0,05$ )



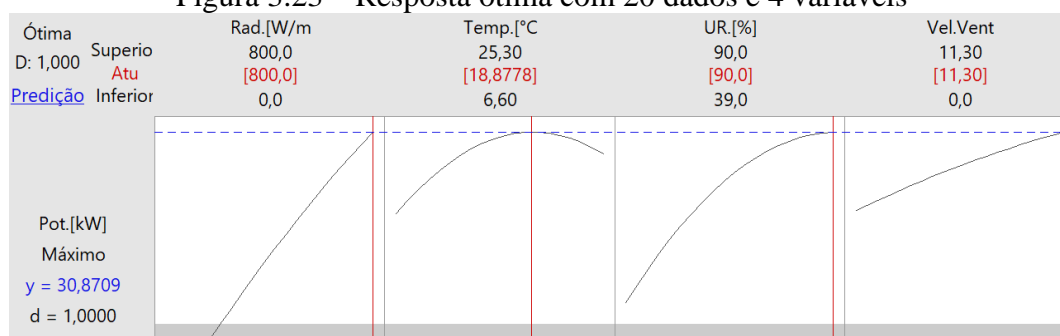
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.22 – Gráfico de contorno da potência em função da temperatura e radiação, com 20 dados e 4 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.23 – Resposta ótima com 20 dados e 4 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 3.2 – 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/m <sup>2</sup> ]	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/m <sup>2</sup> ]*Rad.[W/m <sup>2</sup> ]	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/m <sup>2</sup> ]*Temp.[°C]	7,52	5,03	1,49	0,163	167,94
Rad.[W/m <sup>2</sup> ]*UR.[%]	9,67	5,35	1,81	0,098	166,02
Rad.[W/m <sup>2</sup> ]*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

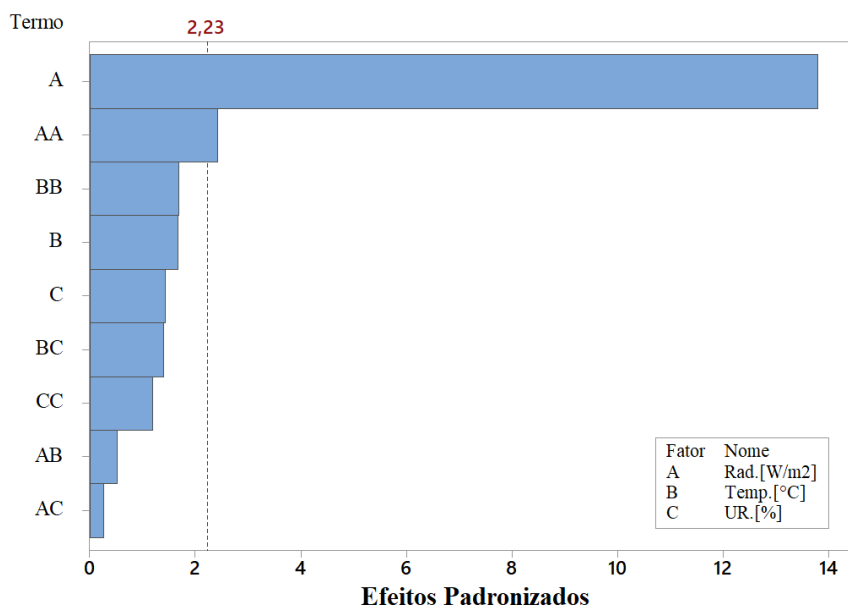
Fonte: Próprio autor, 2023.

### 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 (Figura 3.11). E como o método DoE possibilita trabalhar com infimidade de variáveis, foi realizado a redução do número de dados com a redução da variável velocidade vento, por tanto, agora trabalhando com 20 dados, sendo 3 fatores, culminando com  $2^3$  pontos fatoriais e 2 pontos centrais (seção 2.8), voltamos a ter um resultado semelhante às Etapas I e II, em que a interação entre radiação solar e temperatura são significativos (Figura 3.24). Entretanto, ao definir os pontos ótimos nessa condição os valores não se assemelham e a potência gerada não atinge seu máximo (Figura 3.27).

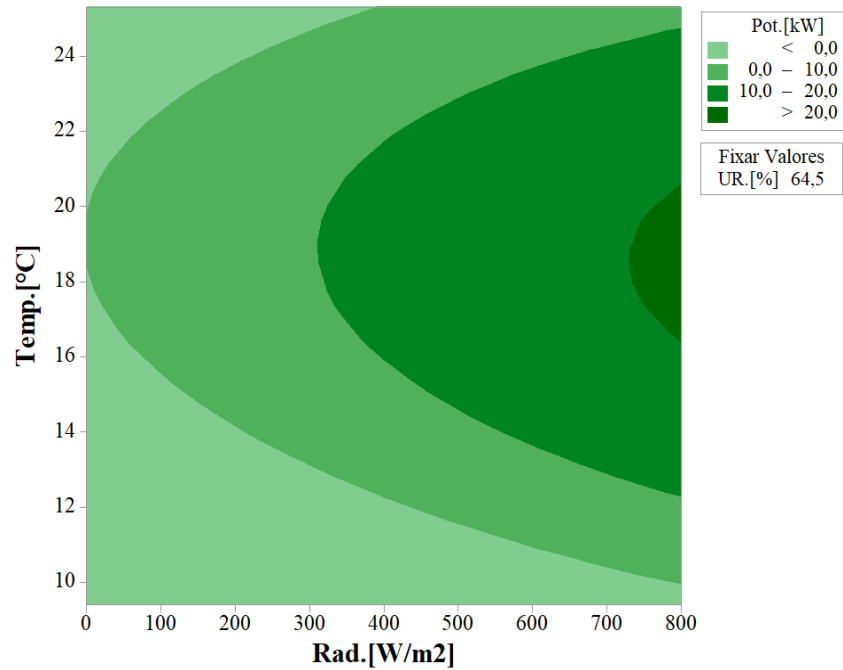
Com isso, ao verificar a Tabela 3.3 é possível identificar que as variáveis temperatura e umidade relativa apresentam valores de VIF consideravelmente altos, indicando novamente a presença de multicolinearidade entre essas variáveis independentes. Tal multicolinearidade pode afetar a interpretação dos 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.

Figura 3.24 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 3 variáveis  
(a resposta é Pot.[kW];  $\alpha = 0,05$ )



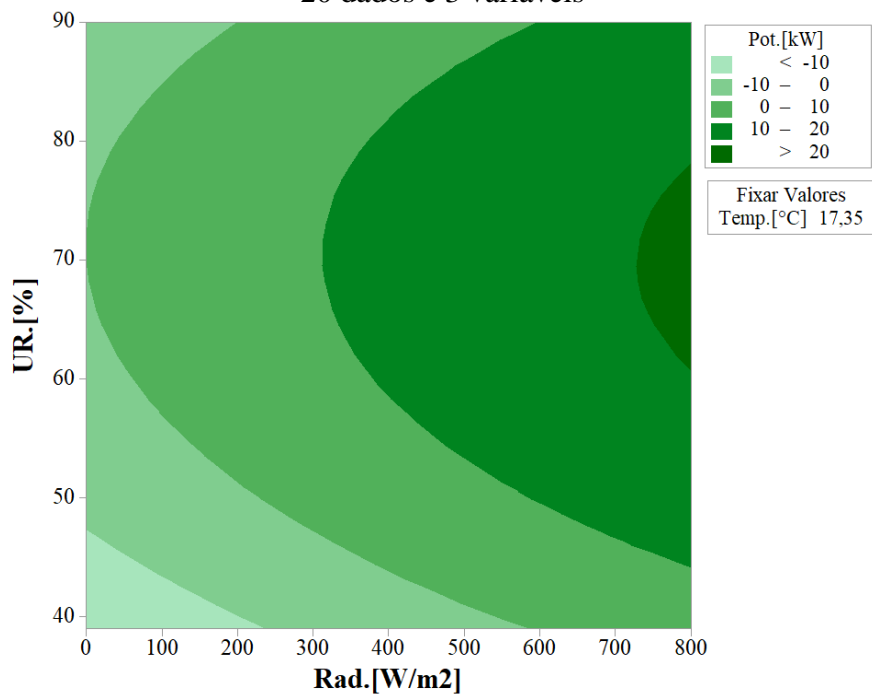
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.25 – Gráfico de contorno da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 3 variáveis



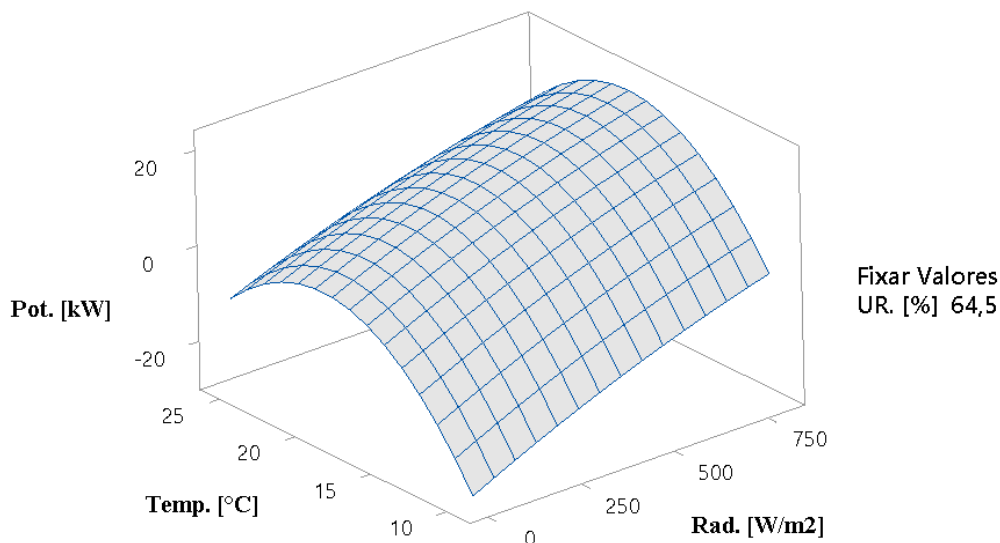
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.26 – Gráfico de contorno da potência em função da umidade e radiação solar, com 20 dados e 3 variáveis



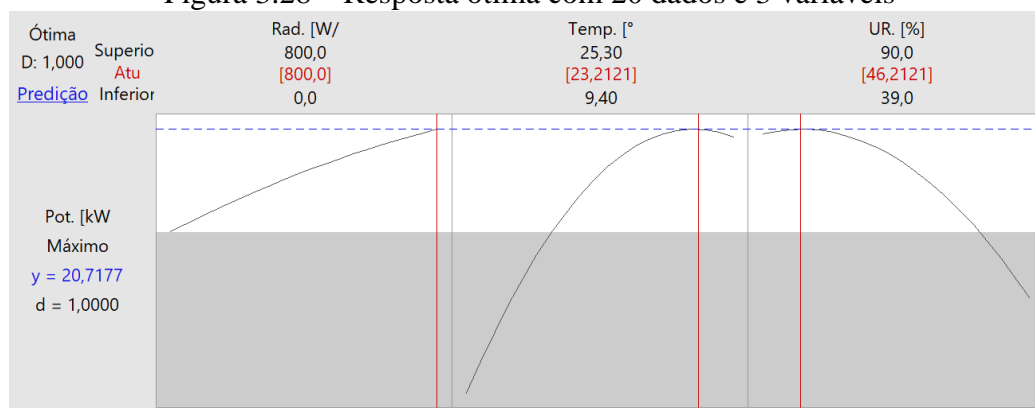
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.27 – Gráfico de superfície da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 3 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.28 – Resposta ótima com 20 dados e 3 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Tabela 3.3 – 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

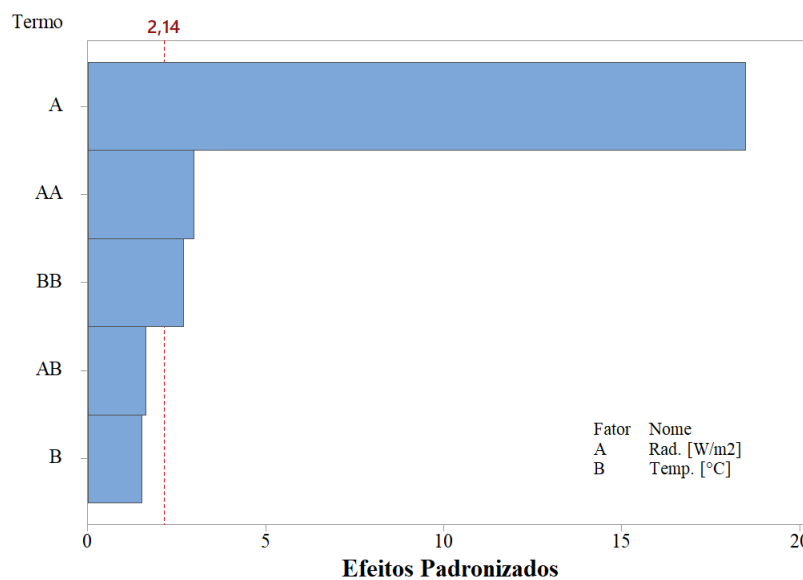
Fonte: Próprio autor, 2023.

### 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, conforme seção 2.8, porém por questões de conservadorismo do método, foram utilizados 20 dados, abrindo margens 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 (Figura 3.29). Também é possível identificar uma tendência de linearidade entre radiação solar e potência gerada pelo gráfico de superfície (Figura 3.30), assim como uma temperatura intermediária de operação de 15°C é identificado pelo gráfico de contorno (Figura 3.31) e explicitado pela resposta ótima,  $y = 21,67 \text{ kW}$ ,  $\text{Rad} = 800 \text{ W/m}^2$  e  $\text{Temp} = 15,3^\circ\text{C}$  (Figura 3.32).

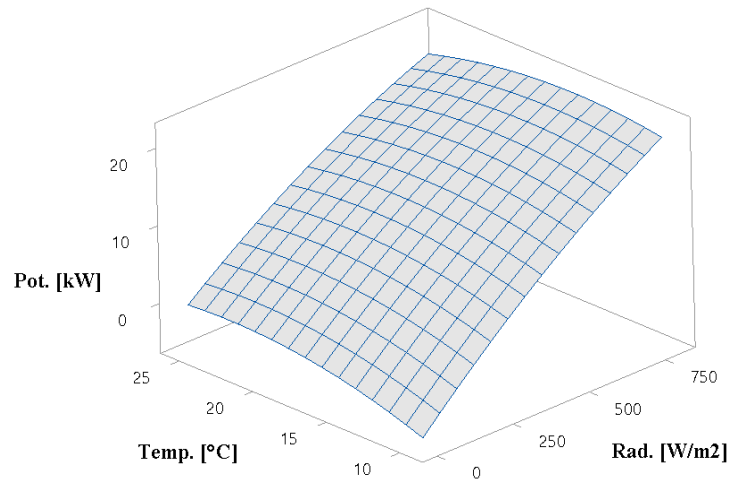
Figura 3.29 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 2 variáveis  
(a resposta é Pot. [kW];  $\alpha = 0,05$ )



Fonte: Próprio autor, 2023.

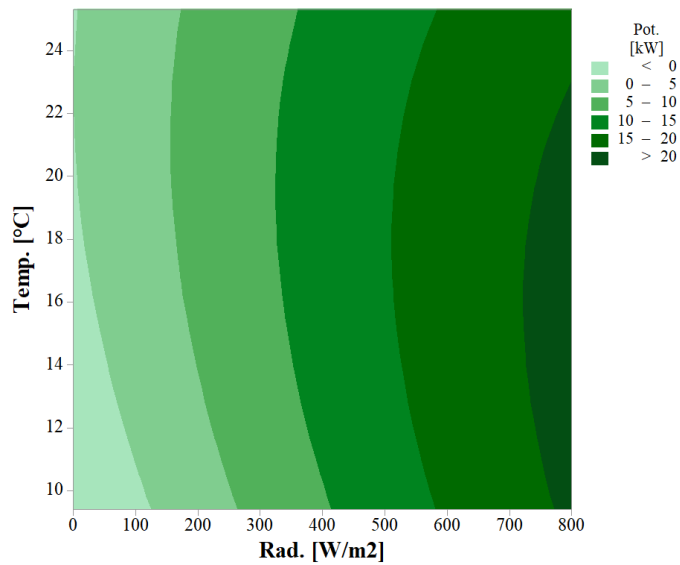


Figura 3.30 – Gráfico de superfície da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 2 variáveis



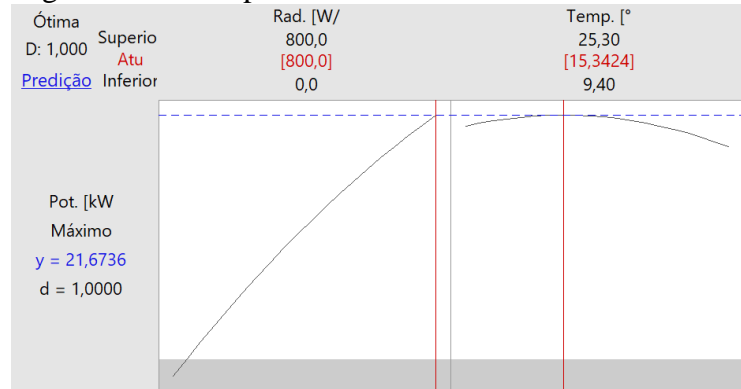
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.31 – Gráfico de contorno da potência em função da temperatura e radiação solar, com 20 dados e 2 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.32 – Resposta ótima com 20 dados e 2 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Embasado pela tabela de coeficientes codificados (Tabela 3.4), é possível obter a equação da potência em função da radiação solar e temperatura (equação 3.1) da área de estudo. Resguardada pelo sumário do modelo (Tabela 3.5) é possível constatar que o estudo apresenta um ótimo ajuste ( $R^2=99,32\%$ ), assim com elevado coeficiente de previsão ( $R^2\text{-predi}=98,59\%$ ).

Tabela 3.4 – Coeficientes Codificados, com 2 variáveis

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	12,038	0,323	37,25	0,000	
Rad.[W/m2]	11,153	0,603	18,48	0,000	5,89
Temp.[°C]	0,699	0,459	1,52	0,150	4,74
Rad.[W/m2]*Rad.[W/m2]	-1,632	0,549	-2,98	0,010	1,48
Temp.[°C]*Temp.[°C]	-1,781	0,663	-2,69	0,018	3,32
Rad.[W/m2]*Temp.[°C]	-1,604	0,977	-1,64	0,123	7,11

Fonte: Próprio autor, 2023.

$$P = 12,038 + 11,153R + 0,699T - 1,632R^2 - 1,781T^2 - 1,604RT \quad (3.1)$$

Tabela 3.5 – Coeficientes de determinação

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,586649	99,32%	99,08%	98,59%

Fonte: Próprio autor, 2023.

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 em um modelo robusto, visto que a colinearidade pode causar estimativas de parâmetros instáveis, modelos não confiáveis e capacidade preditiva fraca.

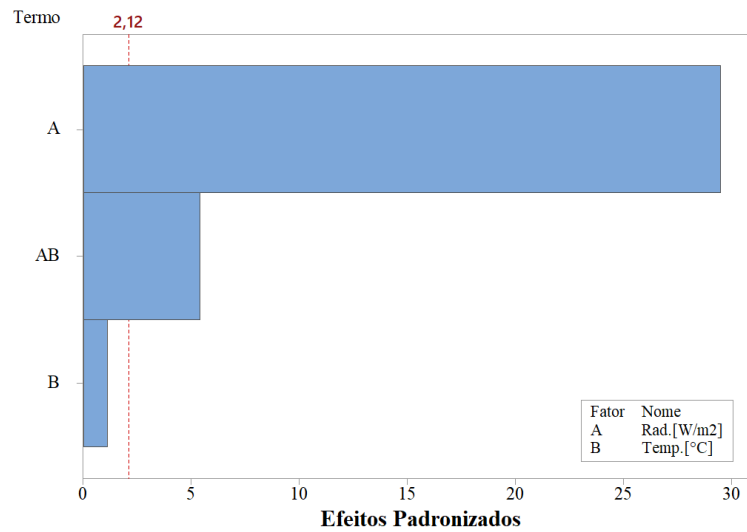
### 3.2.6 Etapa VI

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 (seção 2.5). Para esse modelo com 2 variáveis são necessários apenas 4 dados de potência gerada, cabe ressaltar que não há grau de liberdade para se identificar erros nessa análise, desta forma será

utilizado os mesmos 20 dados da Etapa V na busca por um modelo mais robusto, preditivo e confiável estatisticamente.

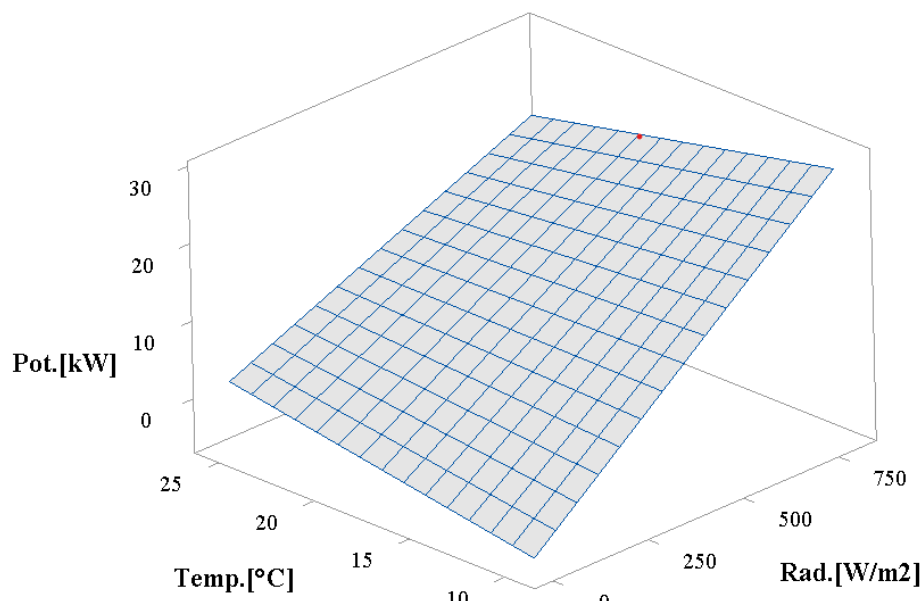
O gráfico de Pareto (Figura 3.33), evidencia o efeito principal e a forte interação entre os fatores, o gráfico de superfície (Figura 3.34) e contorno (Figura 3.35) se aproximam do gráfico construído na Etapa V, porém com forma mais regular, o que simplifica o modelo, facilitando análises, sem perda de confiabilidade.

Figura 3.33 – Gráfico de Pareto com 20 dados e 2 variáveis  
(a resposta é Pot.[kW];  $\alpha = 0,05$ )



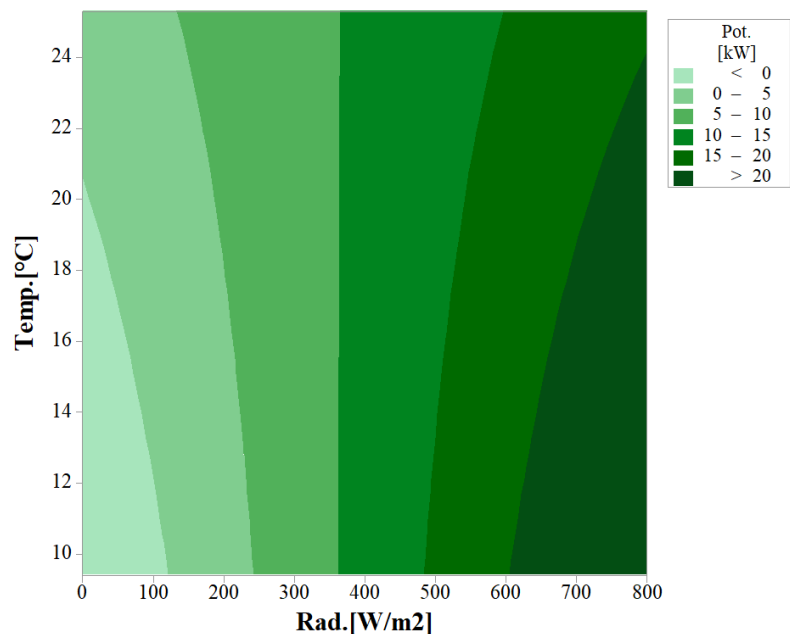
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.34 – Gráfico de superfície da potência em função da temperatura e radiação, com 20 dados e 2 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.35 – Gráfico de contorno da potência em função da umidade e radiação solar, com 20 dados e 2 variáveis



Fonte: Próprio autor, 2023.

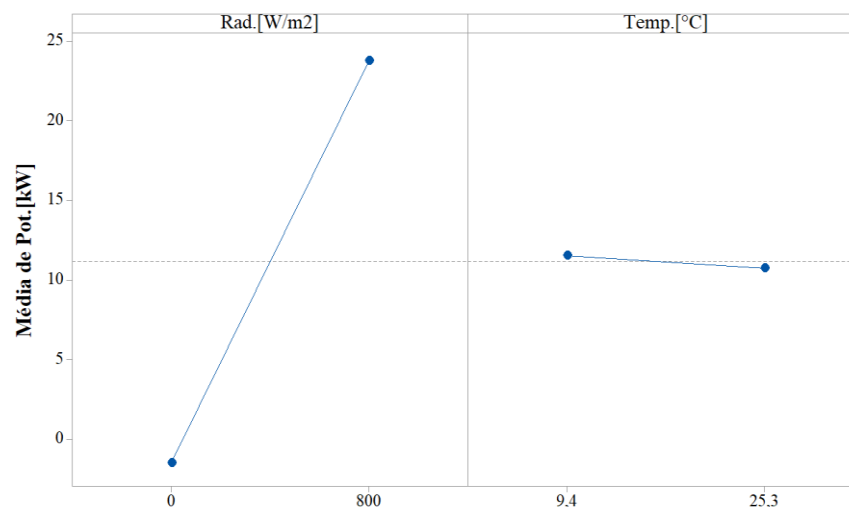
A tabela de coeficientes codificados (Tabela 3.6), converge para a teoria discutida na seção 2.10 em que a radiação solar apresenta coeficiente positivo para a radiação solar e negativo para a temperatura e sua interação com a radiação solar, demonstrando um efeito antagônico das variáveis, que é verificado pelo gráfico de fatores, Figura 3.36. Tais constatações são corroboradas pelo baixo valor do Valor-P e do VIF, indicando elevada confiabilidade neste modelo mais simplista.

Tabela 3.6 – 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/m2]	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/m2]*Temp.[°C]	-7,938	-3,969	0,737	-5,39	0,000	2,61

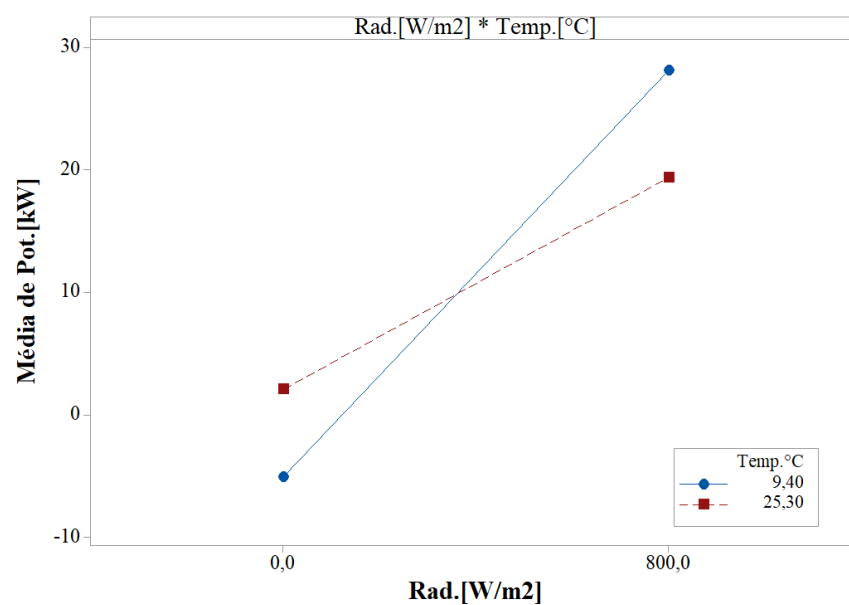
Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.36 – Gráfico de efeitos principais da potência em função da radiação e temperatura



Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.37 – Gráfico de interação da potência em função da radiação e temperatura



Fonte: Próprio autor, 2023.

Comparando essa análise com a Etapa V o desvio padrão residual teve seu valor elevado (Tabela 3.7), o que já era esperado, visto 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 3.2).

Tabela 3.7 – Coeficientes de determinação

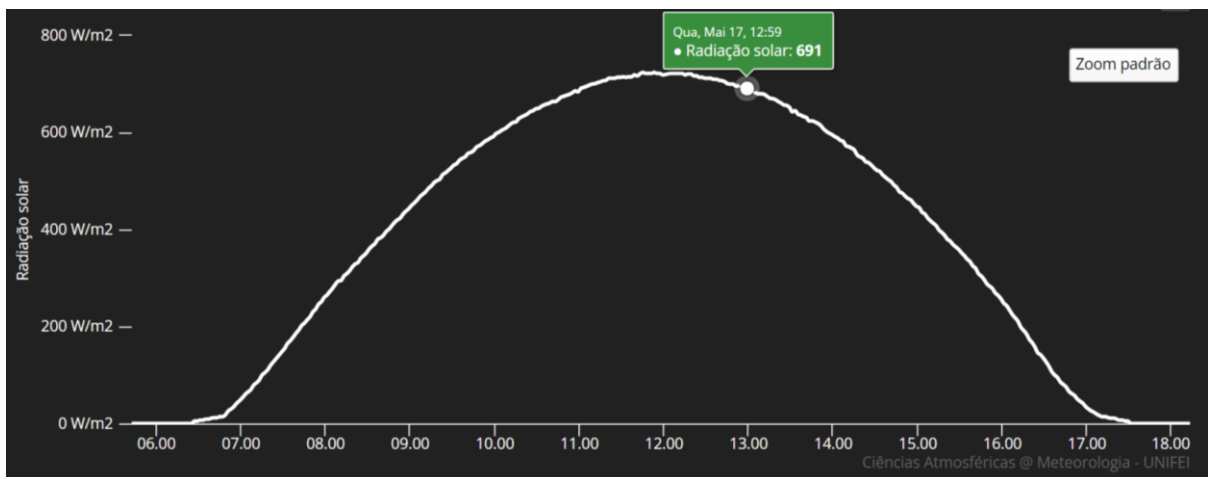
S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,729095	98,80%	98,58%	98,04%

Fonte: Próprio autor, 2023.

$$P = -9,25 + 0,05317 R + 0,4494 T - 0,001248 R * T \quad (3.2)$$

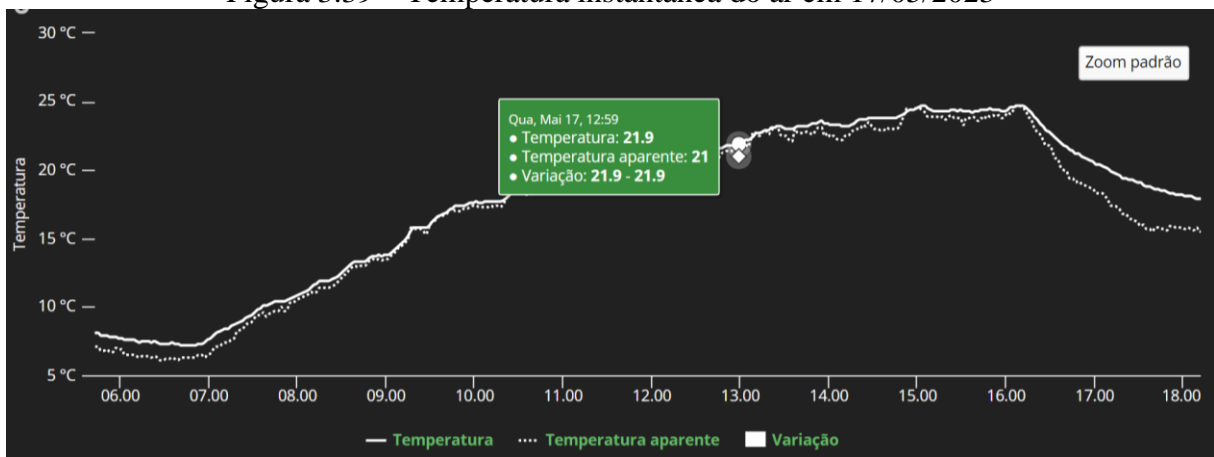
Com o objetivo de verificar a validade do modelo de forma empírica, foi escolhido o dia 17/05/2023. Os dados de radiação solar e temperatura do ar foram registrados pela estação meteorológica automática, enquanto os dados de geração foram obtidos pelo WebSolar, com intervalo de 15 minutos entre as medidas. (Figura 3.38, Figura 3.39 e Figura 3.40).

Figura 3.38 – Radiação solar em 17/05/2023



Fonte: Meteorologia Unifei, 2023.

Figura 3.39 – Temperatura instantânea do ar em 17/05/2023



Fonte: Meteorologia Unifei, 2023.

Figura 3.40 – Geração fotovoltaica em 17/05/2023



Fonte: Solar.Web, 2023.

Os dados foram tabulados conforme tabela 3.8, e posteriormente, substituí-se os valores de temperatura e radiação solar na equação 3.2 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 (Figura 41).

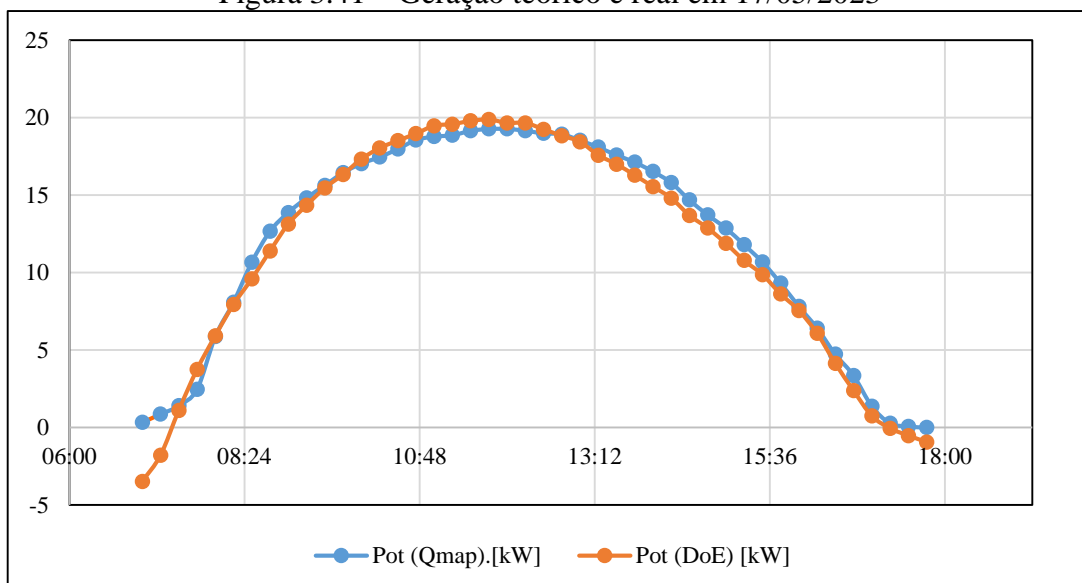
Tabela 3.8 – Geração teórico e real em 17/05/2023

Horário	Pot.(Qmap)[kW]	Rad.[W/m <sup>2</sup> ]	Temp.[°C]	Pot.(DoE)[kW]	Diferença [kW]
07:00	0,33	53	7,70	-3,48	3,81
07:15	0,86	100	6,60	-1,79	2,65
07:30	1,41	148	9,40	1,11	0,30
07:45	2,46	207	10,40	3,74	-1,28
08:00	5,87	260	10,80	5,92	-0,05
08:15	8,09	309	11,90	7,94	0,15
08:30	10,66	352	12,40	9,59	1,07
08:45	12,67	401	13,30	11,39	1,28
09:00	13,88	450	13,80	13,13	0,75
09:15	14,82	490	15,20	14,34	0,48
09:30	15,63	527	15,90	15,46	0,17
09:45	16,45	563	17,20	16,33	0,12
10:00	17,04	598	17,60	17,32	-0,28
10:15	17,46	622	17,70	18,04	-0,58
10:30	17,98	649	18,70	18,52	-0,54
10:45	18,56	668	19,00	18,97	-0,41
11:00	18,79	691	19,40	19,48	-0,69

11:15	18,87	705	20,10	19,58	-0,71
11:30	19,16	714	20,20	19,79	-0,63
11:45	19,28	724	20,60	19,89	-0,61
12:00	19,28	719	20,80	19,66	-0,38
12:15	19,17	719	20,80	19,66	-0,49
12:30	18,99	712	21,30	19,25	-0,26
12:45	18,94	701	21,60	18,83	0,11
13:00	18,54	691	21,90	18,45	0,09
13:15	18,10	671	22,80	17,58	0,52
13:30	17,59	652	23,10	17,00	0,59
13:45	17,13	624	23,20	16,29	0,84
14:00	16,53	596	23,40	15,55	0,98
14:15	15,81	564	23,30	14,81	1,00
14:30	14,69	522	23,80	13,70	0,99
14:45	13,73	487	23,80	12,87	0,86
15:00	12,87	448	24,50	11,88	0,99
15:15	11,80	399	24,30	10,79	1,01
15:30	10,69	359	24,40	9,87	0,82
15:45	9,32	304	24,40	8,62	0,70
16:00	7,82	257	24,40	7,55	0,27
16:15	6,42	192	24,40	6,08	0,34
16:30	4,73	127	22,80	4,14	0,59
16:45	3,36	76	21,40	2,38	0,98
17:00	1,38	30	20,40	0,75	0,63
17:15	0,28	12	19,70	-0,05	0,33
17:30	0,07	5	19,10	-0,52	0,59
17:45	0,00	0	18,50	-0,94	0,94

Fonte: Próprio autor, 2023.

Figura 3.41 – Geração teórico e real em 17/05/2023



Fonte: Próprio autor, 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. Isso, devido à fácil modelagem matemática, que possibilita a otimização de resultados com um pequeno conjunto de dados levando a economia de recursos, com elevada confiabilidade estatística e robusta predição.

A dissertação abordou os métodos de maior relevância do DoE, identificou na literatura os fatores de influência na geração fotovoltaica, assim como estudos correlatos, porém em quase sua totalidade estudos teóricos ou realizados em condições controladas. Desta forma foi feita uma análise da geração fotovoltaica utilizando dados de geração do QMAP-UNIFEI (28kWp) e informações meteorológicas da estação meteorológica da UNIFEI em um ambiente aberto, sem controle e exposto ao tempo, submetido a todas as variações meteorológicas do local.

Segundo estudos preliminares realizados com 2499 dados as variáveis de maior relevância foram radiação solar, temperatura ambiente, velocidade do vento e umidade relativa do ar, tais constatações foram definidas como etapas I. Pela característica da interação entre as variáveis e a geração o método de Superfície de Resposta foi considerado o mais apropriado para esse estudo, devido às suas interações de maior ordem, assim a Etapa II do estudo foi refeito com 188 dados, verificando a validade do modelo e sua convergência com a realidade. As etapas III e IV identificaram que a velocidade do vento e umidade relativa se apresentavam como ruídos no modelo, desta forma ambas foram removidas do estudo e a necessidade de dados para o modelo foi reduzida para 26 e 20 dados respectivamente. A Etapa V poderia ser feita com apenas 10 dados, porém por conservadorismo matemático foram utilizados 20 dados, culminando em um modelo com ótimo ajuste, porém um modelo ainda passível de simplificação, desta forma foi realizado um ajuste fino com base no Fatorial Completo na Etapa VI. Para a última etapa foram necessários apenas 4 dados de potência, entretanto foram utilizados os mesmos 20 dados da Etapa V, dando elevado grau de liberdade para se definir erros, que se mostraram insignificante ao final, desta forma foi finalizando o modelo com elevado coeficiente de determinação e previsibilidade ( $R^2= 98,8\%$  e  $R^2\text{-pred}=98,4$ ), com baixa colinearidade e parametrizado por uma equação simples e de grau um.

Os resultados obtidos corroboram com a 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 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 utilizada 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, painel flutuante em água, temas que podem ser aprofundados e explorados por novos estudos na busca pelo aperfeiçoamento da geração solar. Em suma, esta dissertação 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

- ABSOLAR. Infográfico. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2022/01/2022.01.11-Infografico-ABSOLAR-nº-39.pdf>>. Acesso em: 17 junho 2023.
- ABD-ELHADY, M. S.; SERAG, Z.; KANDIL, H. A. An innovative solution to the overheating problem of PV panels. **Energy conversion and management**, v. 157, p. 452-459, 2018.
- AGATHOKLEOUS, R. A.; KALOGIROU, S. A. Status, barriers and perspectives of building integrated photovoltaic systems. **Energy**, v. 191, p. 116471, 2020.
- 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.
- BOX, G. E. P.; BEHNKEN, D. W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. *Technometrics*, v. 2, n. 4, p. 455-475, 1960.
- 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.
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Velocidade do vento. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 05 maio 2023.
- CHAICHAN, M. T.; KAZEM, H. A. Experimental analysis of solar intensity on photovoltaic in hot and humid weather conditions. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 7, n. 3, p. 91-96, 2016.
- CHANDRASEKAR, M.; SURESH, S.; SENTHILKUMAR, T. Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures. **Energy Conversion and Management**, v. 71, p. 43-50, 2013.
- CHARLES, J. P.; HANNANE, F.; EL-MOSSAOUI, H.; ZEGAOU, A.; NGUYEN, T. V.; PETIT, P.; AILLERIE, M. Faulty PV panel identification using the Design of Experiments (DoE) method. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 57, p. 31-38, 2014.
- CORNELL, J. A. Experiments with mixtures: a review. **Technometrics**, v. 15, n. 3, p. 437-455, 1981.
- DOEHLERT, D. H. Uniform shell designs. *Journal of the Royal Statistical Society. Applied Statistics*, v. 19, n. 3, p. 231-239, 1970.

ELNOZAHY, A.; RAHMAN, A. K. A.; ALI, A. H. H.; ABDEL-SALAM, M.; OOKAWARA, S. Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning. **Energy and Buildings**, v. 88, p. 100-109, 2015.

FAKOURIYAN, S.; SABOOHI, Y.; FATHI, A. Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production. **Renewable Energy**, v. 134, p. 1362-1368, 2019.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; DE SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; DOS SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 181-191, 2018.

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.

FAGUNDES, F.F.A.; REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B. A model for predicting the initial development of two native forest species under current and future climates. **Environmental and Experimental Botany**, v. 192, p. 104662, 2021.

GALIL, Z.; KIEFER, J. Comparison of Box-Draper and D-optimum designs for experiments with mixtures. **Technometrics**, v. 19, n. 4, p. 441-444, 1977.

GARCIA, S. R.; SANTOS, D. F.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Aspectos climatológicos associados ao cultivo da oliveira (*Olea europaea* L.) em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 188-209, 2018.

GLICK, A.; ALI, N.; BOSSUYT, J.; RECKTENWALD, G.; CALAF, M.; CAL, R. B. Infinite photovoltaic solar arrays: Considering flux of momentum and heat transfer. **Renewable Energy**, v. 156, p. 791-803, 2020b.

GLICK, A.; SMITH, S. E.; ALI, N.; BOSSUYT, J.; RECKTENWALD, G.; CALAF, M.; CAL, R. B. Influence of flow direction and turbulence intensity on heat transfer of utility-scale photovoltaic solar farms. **Solar Energy**, v. 207, p. 173-182, 2020a.

Global Solar Atlas. Radiação solar. Disponível em: <<https://globalsolaratlas.info/download/pakistan>>. Acesso em: 19 janeiro 2023.

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.

GOUPY, J. L. **Pratiquer les plans d'expériences**. Dunod, 2005.

GOUPY, J. **Plans d'expériences: les mélanges** [Experiences plans: the mixtures]. Collection technique et ingénierie, p. 285, 2000.

GOUPY, J. **Plans d'expériences pour surfaces de réponse**. Dunod, 1999.

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.

HAMDI, R. T. A.; HAFAD, S. A.; KAZEM, H. A.; CHAICHAN, M. T. Humidity impact on photovoltaic cells performance: A review. **International Journal of Recent Engineering Research and Development (IJRERD)**, v. 3, n. 11, p. 27-37, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Área territorial brasileira 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

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, 2020.

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, 2020.

KHAN, S.; WAQAS, A.; AHMAD, N.; MAHMOOD, M.; SHAHZAD, N.; SAJID, M. B. Thermal management of solar PV module by using hollow rectangular aluminum fins. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 12, n. 6, p. 063501, 2020.

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, 2013.

KOSHAL, R. S. Application of the method of maximum likelihood to the improvement of curves fitted by the method of moments. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 96, n. 2, p. 303-313, 1933.

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.

LI, H.; ZHAO, J.; LI, M.; DENG, S.; AN, Q.; WANG, F. Performance analysis of passive cooling for photovoltaic modules and estimation of energy-saving potential. **Solar Energy**, v. 181, p. 70-82, 2019.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, p.129-156, 2018.

Meteorologia Unifei. **Estação meteorológica.** Disponível em: <<https://meteorologia.unifei.edu.br/>>. Acesso em: 05 maio 2023.

Meteorologia Unifei. **Estação meteorológica.** Disponível em: <<https://meteorologia.unifei.edu.br/>>. Acesso em: 08 junho 2023.

MOZZO, G. Plan quadratique gigogne. **Revue de statistique appliquée**, v. 38, n. 3, p. 23-34, 1990.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. **Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments.** John Wiley & Sons, 2009, 856p.

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.

NIŽETIĆ, S.; GIAMA, E.; PAPADOPOULOS, A. M. Comprehensive analysis and general economic-environmental evaluation of cooling techniques for photovoltaic panels, Part II: Active cooling techniques. **Energy Conversion and Management**, v. 155, p. 301-323, 2018.

PEREZ, R.; INEICHEN, P.; SEALS, R.; MICHALSKY, J.; STEWART, R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar energy**, v. 44, n. 5, p. 271-289, 1990.

PILLET, M. **Introduction aux plans d'expériences par la méthode Taguchi.** Les éditions d'organisation, 1992.

PLACKETT, R. L.; BURMAN, J. Peter. The design of optimum multifactorial experiments. **Biometrika**, v. 33, n. 4, p. 305-325, 1946.

PNE. **Plano Nacional de Energia 2050** - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.

POIRIER, J. **Analyse de la variance et de la régression.** Plans d'expérience. Ed. Techniques Ingénieur, 1993.

RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; SAYED, E. T.; ELSAID, K.; CHAE, K. J.; WILBERFORCE, T.; OLABI, A. G. Environmental impacts of solar energy systems: A review. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 141989, 2021.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206-226, 2015.

REBOITA, M. S.; ASSIREU, A.; SILVA, L. C.; RIOS, N. Evidências de Circulação de Brisa Vale-Montanha na Serra da Mantiqueira: Cidade de Itajubá, MG. **Ciência e Natura**, v. 36, p. 61-71, 2014.

RECHTSCHAFFNER, R. L. Saturated fractions of 2 n and 3 n factorial designs. **Technometrics**, v. 9, n. 4, p. 569-575, 1967.

ROQUEMORE, K. G. Hybrid designs for quadratic response surfaces. **Technometrics**, v. 18, n. 4, p. 419-423, 1976.

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.

Solar.Web. Geração fotovoltaica. Disponível em: <<https://www.solarweb.com/>>. Acesso em: 01 maio 2023.

Solar.Web. Geração fotovoltaica. Disponível em: <<https://www.solarweb.com/>>. Acesso em: 08 junho 2023.

SHAHSAVAR, A.; JHA, P.; ARICI, M.; KEFAYATI, G. A comparative experimental investigation of energetic and exergetic performances of water/magnetite nanofluid-based photovoltaic/thermal system equipped with finned and unfinned collectors. **Energy**, v. 220, p. 119714, 2021.

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.

SILVA, T. C. **Estudo da implantação de uma miniusina solar fotovoltaica na UNIFEI: aspectos técnicos, econômicos e exergéticos**. 2021. 220 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal De Itajubá, Itajubá.

SWEERTS, B.; PFENNINGER, S.; YANG, S.; FOLINI, D.; VAN DER ZWAAN, B.; WILD, M. Estimation of losses in solar energy production from air pollution in China since 1960 using surface radiation data. **Nature Energy**, v. 4, n. 8, p. 657-663, 2019.

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.

YESILDAL, F.; OZAKIN, A. N.; YAKUT, K. Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 25, p. 100983, 2022.

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



**Anexo A**

Etapa I - 2499 Dados

<b>Horário</b>	<b>Pot.[kW]</b>	<b>Rad.[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Temp.[°C]</b>	<b>Vel.Vento[m/s]</b>	<b>UR.[%]</b>
6:30	0,01	11	12,1	1,6	91
6:45	0,26	33	12,1	1,6	92
7:00	0,84	91	13,1	1,6	89
7:15	1,63	142	13,9	1,6	85
7:30	2,62	193	14,1	1,6	86
7:45	4,09	250	14,9	1,6	83
8:00	7,77	308	15,9	1,6	80
8:15	9,83	357	15,9	3,2	80
8:30	11,81	410	16,8	3,2	78
8:45	13,18	464	17,9	1,6	73
9:00	14,41	519	18,2	3,2	68
9:15	15,49	554	19,2	1,6	68
9:30	16,10	591	19,3	4,8	66
9:45	16,87	624	20,1	3,2	63
10:00	17,40	663	20,7	3,2	63
10:15	18,06	694	21,4	1,6	58
10:30	18,46	719	21,8	3,2	59
10:45	18,93	747	22,1	3,2	56
11:00	19,09	768	22,4	3,2	56
11:15	19,50	779	22,9	3,2	56
11:30	19,89	791	22,9	3,2	61
11:45	19,75	800	23,5	3,2	53
12:00	20,03	800	23,3	4,8	53
12:15	19,83	809	23,7	4,8	46
12:30	19,35	773	23,3	4,8	43
12:45	19,54	778	24,4	3,2	47
13:00	19,19	763	24,3	3,2	46
13:15	18,81	745	24,8	4,8	45
13:30	18,69	724	24,9	4,8	46
13:45	18,15	696	24,8	4,8	44
14:00	17,17	664	24,2	6,4	46
14:15	16,69	631	24,8	3,2	44
14:30	15,45	594	24,6	4,8	44
14:45	14,43	554	25,0	4,8	47
15:00	13,67	506	24,8	4,8	44
15:15	12,45	471	24,9	4,8	47
15:30	11,24	431	25,7	3,2	43
15:45	10,05	369	25,4	3,2	46
16:00	8,57	309	25,3	3,2	45
16:15	7,17	262	25,3	3,2	45
16:30	5,70	214	25,4	3,2	49
16:45	4,20	163	25,3	1,6	46
17:00	3,04	105	24,3	8,0	52
17:15	0,84	39	22,6	9,7	53

17:30	0,44	14	21,7	8,0	56
17:45	0,18	0	21,2	8,0	57
18:00	0,00	0	20,6	8,0	59
6:30	0,00	11	12,1	6,4	90
6:45	0,25	33	12,1	3,2	90
7:00	0,65	91	12,6	3,2	89
7:15	1,54	142	13,2	1,6	87
7:30	2,59	193	14,0	3,2	85
7:45	3,85	250	14,1	3,2	85
8:00	6,99	308	14,8	3,2	84
8:15	9,78	357	15,9	1,6	79
8:30	11,75	410	16,4	1,6	79
8:45	13,08	464	16,7	1,6	77
9:00	14,06	519	17,4	1,6	78
9:15	15,12	554	18,4	1,6	73
9:30	15,86	591	18,7	1,6	72
9:45	16,55	624	19,6	1,6	70
10:00	17,27	663	19,9	3,2	70
10:15	17,77	694	20,9	1,6	66
10:30	17,34	719	21,2	3,2	64
10:45	18,62	747	21,1	4,8	64
11:00	19,21	768	21,8	3,2	66
11:15	19,21	779	22,1	3,2	63
11:30	19,92	791	22,3	4,8	63
11:45	20,02	800	22,8	3,2	63
12:00	20,09	800	23,1	4,8	65
12:15	20,10	809	23,3	3,2	63
12:30	20,57	773	23,3	4,8	60
12:45	20,35	778	23,9	3,2	64
13:00	20,21	763	24,2	4,8	59
13:15	19,98	745	24,4	4,8	59
13:30	17,08	724	24,9	4,8	60
13:45	18,31	696	24,8	6,4	58
14:00	16,95	664	25,0	3,2	54
14:15	15,47	631	25,1	3,2	56
14:30	14,63	594	25,3	3,2	54
14:45	14,59	554	25,8	3,2	56
15:00	13,95	506	25,8	3,2	53
15:15	13,11	471	26,1	3,2	50
15:30	9,94	431	25,3	4,8	47
15:45	10,37	369	25,7	3,2	46
16:00	8,72	309	25,9	3,2	48
16:15	7,04	262	25,4	3,2	47
16:30	5,55	214	25,8	1,6	49
16:45	3,87	163	26,1	1,6	48
17:00	2,43	105	25,7	1,6	53
17:15	0,36	39	24,4	0,0	56
17:30	0,17	14	22,9	1,6	63

17:45	0,03	0	21,9	1,6	64
18:00	0,00	0	20,7	0,0	70
6:30	0,00	11	13,8	3,2	93
6:45	0,21	25	13,8	4,8	94
7:00	0,49	74	14,5	3,2	91
7:15	1,11	120	15,1	4,8	88
7:30	2,32	167	15,7	3,2	87
7:45	3,43	225	16,2	4,8	84
8:00	6,18	NULL	16,4	NULL	85
8:15	9,26	NULL	NULL	NULL	NULL
8:30	11,15	NULL	NULL	NULL	NULL
8:45	12,57	NULL	NULL	NULL	NULL
9:00	13,57	NULL	NULL	NULL	NULL
9:15	14,51	NULL	NULL	NULL	NULL
9:30	15,37	552	19,9	1,6	76
9:45	16,02	589	20,7	1,6	75
10:00	16,74	619	21,7	1,6	69
10:15	17,43	652	21,9	3,2	67
10:30	17,92	679	22,4	3,2	66
10:45	18,28	701	22,9	3,2	66
11:00	18,49	717	23,4	3,2	62
11:15	18,87	737	23,9	1,6	62
11:30	18,94	747	24,4	3,2	62
11:45	19,25	763	24,4	3,2	62
12:00	19,08	756	24,7	4,8	63
12:15	19,44	766	24,7	4,8	64
12:30	19,90	313	24,9	6,4	61
12:45	19,43	178	24,8	4,8	59
13:00	4,17	793	24,4	3,2	63
13:15	13,17	802	25,6	3,2	61
13:30	10,16	506	25,4	4,8	60
13:45	19,19	715	25,9	3,2	56
14:00	17,35	682	26,1	4,8	56
14:15	16,39	647	26,1	6,4	56
14:30	15,77	613	25,9	6,4	55
14:45	15,19	615	26,4	4,8	55
15:00	12,20	517	26,4	6,4	53
15:15	13,11	501	26,6	3,2	54
15:30	11,49	431	26,3	6,4	58
15:45	9,75	359	26,4	4,8	54
16:00	8,31	285	26,2	4,8	53
16:15	7,06	244	26,1	3,2	52
16:30	5,37	169	26,1	4,8	53
16:45	3,83	113	25,9	3,2	51
17:00	1,66	62	25,8	1,6	53
17:15	0,44	21	25,1	0,0	60
17:30	0,23	9	23,8	1,6	62
17:45	0,01	0	22,7	3,2	62

18:00	0,00	0	21,9	0,0	68
6:30	0,00	9	14,0	1,6	93
6:45	0,18	21	14,0	3,2	92
7:00	0,40	69	14,4	1,6	91
7:15	1,04	109	15,4	1,6	88
7:30	2,17	165	15,8	3,2	87
7:45	3,35	220	16,7	1,6	85
8:00	5,55	267	17,2	1,6	84
8:15	9,07	322	18,0	1,6	82
8:30	10,96	371	18,2	1,6	81
8:45	12,23	415	19,2	1,6	77
9:00	13,66	459	19,9	1,6	77
9:15	14,48	503	20,6	1,6	72
9:30	15,43	547	21,1	1,6	71
9:45	16,21	580	21,3	3,2	72
10:00	16,78	612	22,1	3,2	71
10:15	17,33	643	22,8	1,6	70
10:30	17,62	670	23,2	1,6	68
10:45	18,01	694	23,9	1,6	69
11:00	18,35	714	24,5	3,2	66
11:15	18,51	729	24,8	3,2	63
11:30	18,62	740	24,6	4,8	64
11:45	18,56	742	25,0	3,2	62
12:00	16,11	752	24,8	4,8	58
12:15	19,27	751	25,2	4,8	55
12:30	19,01	744	25,8	4,8	55
12:45	18,90	735	26,3	3,2	59
13:00	18,73	722	26,4	4,8	52
13:15	9,72	717	26,2	4,8	54
13:30	17,98	679	26,2	6,4	55
13:45	17,44	656	26,6	6,4	51
14:00	16,60	626	26,7	4,8	51
14:15	15,78	589	26,9	4,8	51
14:30	14,93	552	26,9	4,8	48
14:45	13,76	510	27,3	3,2	47
15:00	12,86	469	27,4	3,2	48
15:15	11,70	420	27,5	3,2	50
15:30	10,61	376	27,8	3,2	47
15:45	9,26	325	27,7	3,2	45
16:00	8,01	278	27,4	3,2	49
16:15	6,57	216	27,1	3,2	49
16:30	5,03	160	27,1	3,2	51
16:45	3,46	95	27,5	1,6	51
17:00	1,25	51	27,1	1,6	55
17:15	0,31	16	25,7	1,6	56
17:30	0,15	7	24,4	0,0	60
17:45	0,00	0	23,2	1,6	64
18:00	0,00	0	21,8	1,6	69

6:30	0,00	9	14,1	4,8	93
6:45	0,28	30	14,5	1,6	92
7:00	0,75	56	14,9	3,2	91
7:15	1,10	84	15,4	3,2	88
7:30	1,83	118	15,8	3,2	87
7:45	2,96	250	16,4	3,2	86
8:00	4,89	272	16,9	4,8	85
8:15	7,77	241	17,2	3,2	84
8:30	5,31	227	17,1	1,6	85
8:45	12,84	427	18,5	1,6	84
9:00	11,71	223	19,3	1,6	78
9:15	13,42	517	20,1	1,6	77
9:30	16,16	297	21,2	1,6	75
9:45	13,50	475	21,3	1,6	74
10:00	17,35	543	21,6	1,6	75
10:15	14,73	589	22,6	1,6	70
10:30	17,82	679	23,2	3,2	69
10:45	17,35	717	23,5	3,2	68
11:00	16,99	721	23,8	3,2	70
11:15	18,95	738	24,6	3,2	64
11:30	17,66	510	24,8	3,2	62
11:45	18,42	638	24,7	4,8	64
12:00	19,29	721	25,4	3,2	63
12:15	18,76	729	25,6	4,8	61
12:30	17,96	726	25,8	4,8	57
12:45	18,60	649	26,3	3,2	57
13:00	14,30	715	26,3	3,2	57
13:15	17,68	684	26,7	3,2	57
13:30	17,33	661	27,0	3,2	57
13:45	16,86	636	27,3	3,2	54
14:00	16,13	605	27,1	3,2	54
14:15	15,14	573	27,7	1,6	56
14:30	14,43	536	27,8	3,2	54
14:45	13,21	490	27,6	1,6	55
15:00	12,23	457	27,9	3,2	56
15:15	11,17	406	28,1	4,8	53
15:30	9,96	369	28,1	3,2	57
15:45	8,90	309	27,7	4,8	55
16:00	7,55	265	27,8	1,6	56
16:15	6,22	214	28,1	1,6	57
16:30	4,75	153	27,9	3,2	53
16:45	3,28	100	27,7	1,6	59
17:00	1,43	54	27,4	1,6	60
17:15	0,49	30	26,4	1,6	62
17:30	0,37	14	25,2	1,6	65
17:45	0,01	0	24,4	3,2	66
18:00	0,00	0	23,9	0,0	70
6:30	0,00	7	9,9	4,8	91

6:45	0,10	18	9,9	3,2	91
7:00	0,41	47	10,2	4,8	89
7:15	0,43	97	10,8	3,2	88
7:30	1,55	142	10,5	4,8	90
7:45	2,88	192	11,4	1,6	88
8:00	4,53	243	12,2	1,6	85
8:15	7,87	299	12,8	1,6	84
8:30	10,39	352	13,4	1,6	83
8:45	12,47	397	14,2	3,2	81
9:00	13,67	441	14,7	4,8	78
9:15	14,88	487	15,4	3,2	77
9:30	15,81	522	16,2	4,8	74
9:45	16,42	564	16,8	3,2	73
10:00	17,06	591	17,3	3,2	73
10:15	17,54	626	17,9	3,2	68
10:30	17,95	645	18,0	3,2	68
10:45	18,41	671	18,3	3,2	68
11:00	18,84	694	19,3	3,2	65
11:15	18,89	703	20,1	3,2	64
11:30	19,02	721	20,8	1,6	61
11:45	19,17	724	21,2	4,8	58
12:00	19,39	722	21,3	3,2	57
12:15	19,28	728	21,4	4,8	58
12:30	19,15	719	22,4	3,2	56
12:45	19,14	710	22,4	4,8	48
13:00	18,57	686	22,7	3,2	50
13:15	18,16	671	22,7	4,8	47
13:30	17,73	657	22,9	6,4	48
13:45	17,34	624	23,1	4,8	45
14:00	16,61	578	23,5	4,8	44
14:15	15,38	545	23,7	4,8	47
14:30	14,76	515	23,8	3,2	44
14:45	13,90	499	23,8	4,8	42
15:00	13,02	452	24,0	3,2	42
15:15	11,87	406	23,9	4,8	42
15:30	10,45	359	23,8	4,8	42
15:45	8,71	339	23,8	3,2	41
16:00	8,55	278	24,0	3,2	40
16:15	6,77	202	23,8	3,2	41
16:30	4,57	134	23,7	3,2	43
16:45	2,81	77	23,3	1,6	48
17:00	1,51	47	22,7	0,0	47
17:15	0,51	21	21,3	3,2	49
17:30	0,19	7	20,2	1,6	57
17:45	0,02	0	19,1	0,0	62
18:00		0	18,1	0,0	65
6:30	0,00	5	7,1	1,6	84
6:45	0,07	12	6,7	3,2	85

7:00	0,30	37	7,3	3,2	83
7:15	0,86	86	8,2	3,2	78
7:30	1,41	139	9,0	1,6	76
7:45	2,89	207	8,9	4,8	78
8:00	5,97	258	9,6	3,2	79
8:15	8,52	313	10,2	3,2	74
8:30	11,03	367	10,8	9,7	69
8:45	13,20	410	11,6	4,8	68
9:00	14,43	459	12,8	3,2	68
9:15	15,14	496	13,6	1,6	65
9:30	15,98	533	14,6	1,6	63
9:45	16,70	575	14,9	3,2	60
10:00	17,34	605	15,6	3,2	59
10:15	17,83	635	16,3	3,2	53
10:30	18,42	663	16,6	3,2	54
10:45	19,04	682	17,4	3,2	52
11:00	19,17	701	18,4	3,2	47
11:15	19,28	717	19,3	1,6	47
11:30	19,33	724	20,3	3,2	43
11:45	19,37	733	20,7	3,2	43
12:00	19,43	731	21,5	3,2	39
12:15	19,38	728	21,8	1,6	39
12:30	19,11	722	22,2	3,2	40
12:45	19,19	708	22,7	4,8	36
13:00	18,64	694	22,9	3,2	36
13:15	18,15	675	23,3	4,8	37
13:30	17,78	656	23,7	3,2	38
13:45	17,30	NULL	NULL	NULL	NULL
14:00	16,88	NULL	NULL	NULL	NULL
14:15	15,76	NULL	NULL	NULL	NULL
14:30	14,95	NULL	NULL	NULL	NULL
14:45	13,94	487	24,4	3,2	37
15:00	13,00	445	24,6	4,8	37
15:15	11,87	404	24,8	3,2	37
15:30	10,67	362	24,7	4,8	37
15:45	9,36	306	24,7	3,2	37
16:00	7,89	258	24,7	3,2	38
16:15	6,43	197	24,8	3,2	38
16:30	4,94	130	24,6	3,2	39
16:45	3,46	79	24,1	1,6	45
17:00	1,51	32	23,6	0,0	47
17:15	0,27	14	21,3	4,8	50
17:30	0,09	5	20,4	6,4	52
17:45	0,00	0	19,8	8,0	53
18:00	0,00	0	19,3	9,7	52
6:30	0,00	5	7,3	1,6	94
6:45	0,07	14	7,2	0,0	94
7:00	0,33	53	7,7	1,6	94

7:15	0,86	100	6,6	1,6	90
7:30	1,41	148	9,4	0,0	90
7:45	2,46	207	10,4	1,6	87
8:00	5,87	260	10,8	0,0	86
8:15	8,09	309	11,9	1,6	83
8:30	10,66	352	12,4	1,6	83
8:45	12,67	401	13,3	1,6	79
9:00	13,88	450	13,8	1,6	77
9:15	14,82	490	15,2	1,6	73
9:30	15,63	527	15,9	1,6	70
9:45	16,45	563	17,2	1,6	67
10:00	17,04	598	17,6	3,2	66
10:15	17,46	622	17,7	3,2	65
10:30	17,98	649	18,7	3,2	61
10:45	18,56	668	19,0	1,6	62
11:00	18,79	691	19,4	4,8	61
11:15	18,87	705	20,1	3,2	60
11:30	19,16	714	20,2	3,2	60
11:45	19,28	724	10,6	3,2	56
12:00	19,28	719	20,8	4,8	56
12:15	19,17	719	20,8	3,2	52
12:30	18,99	712	21,3	4,8	50
12:45	18,94	701	21,6	4,8	49
13:00	18,54	691	21,9	4,8	48
13:15	18,10	671	22,8	1,6	47
13:30	17,59	652	23,1	3,2	45
13:45	17,13	624	23,2	3,2	45
14:00	16,53	596	23,4	4,8	43
14:15	15,81	564	23,3	3,2	44
14:30	14,69	522	23,8	3,2	41
14:45	13,73	487	23,8	3,2	39
15:00	12,87	448	24,5	3,2	46
15:15	11,80	399	24,3	3,2	41
15:30	10,69	359	24,4	3,2	39
15:45	9,32	304	24,4	3,2	39
16:00	7,82	257	24,4	1,6	39
16:15	6,42	192	24,4	3,2	41
16:30	4,73	127	22,8	6,4	46
16:45	3,36	76	21,4	11,3	50
17:00	1,38	30	20,4	11,3	52
17:15	0,28	12	19,7	12,9	54
17:30	0,07	5	19,1	14,5	54
17:45	0,00	0	18,5	14,5	58
18:00	0,00	0	18,1	12,9	60
6:30	0,00	5	7,8	6,4	83
6:45	0,04	12	7,9	6,4	81
7:00	0,29	35	8,1	6,4	81
7:15	0,73	79	8,2	3,2	83



7:30	1,31	131	8,6	3,2	84
7:45	3,21	190	9,4	3,2	81
8:00	4,85	249	9,8	4,8	79
8:15	7,87	301	10,4	3,2	78
8:30	10,22	348	11,2	1,6	77
8:45	12,50	396	12,1	1,6	75
9:00	13,76	439	12,8	1,6	74
9:15	14,71	480	13,5	1,6	72
9:30	15,56	520	14,4	3,2	67
9:45	16,39	554	15,0	4,8	64
10:00	17,06	588	15,7	1,6	65
10:15	17,55	617	16,4	1,6	63
10:30	17,99	641	17,3	1,6	64
10:45	18,46	666	17,4	3,2	63
11:00	18,73	683	18,2	3,2	60
11:15	19,03	698	18,9	3,2	60
11:30	19,53	703	19,1	3,2	60
11:45	19,49	708	19,6	3,2	61
12:00	19,46	710	19,9	4,8	60
12:15	19,47	700	20,1	4,8	61
12:30	19,26	698	20,8	4,8	60
12:45	19,10	689	20,9	4,8	60
13:00	18,55	671	21,3	4,8	61
13:15	18,21	654	21,8	3,2	58
13:30	17,78	632	21,7	6,4	57
13:45	17,18	605	21,7	4,8	56
14:00	16,35	579	22,2	3,2	57
14:15	15,60	543	22,2	4,8	60
14:30	14,68	510	22,7	4,8	57
14:45	13,69	473	23,1	3,2	55
15:00	12,70	428	23,1	4,8	56
15:15	11,49	387	23,1	3,2	55
15:30	10,37	340	23,2	3,2	55
15:45	9,11	295	23,3	3,2	54
16:00	7,61	232	23,2	3,2	56
16:15	5,32	178	23,2	3,2	55
16:30	4,68	134	23,4	1,6	56
16:45	2,58	65	23,1	1,6	57
17:00	1,07	32	22,5	0,0	59
17:15	0,24	11	21,2	1,6	62
17:30	0,05	0	19,4	3,2	64
17:45	0,00	0	18,8	0,0	71
18:00	0,00	0	17,7	0,0	73

---

**Anexo B**

## Etapa II - 188 Dados

Pot.[kW]	Rad.[W/m <sup>2</sup> ]	Temp.[°C]	Vel.Vento[m/s]	UR.[%]
0,01	11	12,1	1,6	91
0,26	33	12,1	1,6	92
0,84	91	13,1	1,6	89
1,63	142	13,9	1,6	85
2,62	193	14,1	1,6	86
4,09	250	14,9	1,6	83
7,77	308	15,9	1,6	80
9,83	357	15,9	3,2	80
11,81	410	16,8	3,2	78
13,18	464	17,9	1,6	73
14,41	519	18,2	3,2	68
15,49	554	19,2	1,6	68
16,10	591	19,3	4,8	66
16,87	624	20,1	3,2	63
17,40	663	20,7	3,2	63
18,06	694	21,4	1,6	58
18,46	719	21,8	3,2	59
18,93	747	22,1	3,2	56
19,09	768	22,4	3,2	56
19,50	779	22,9	3,2	56
19,89	791	22,9	3,2	61
19,75	800	23,5	3,2	53
20,03	800	23,3	4,8	53
19,83	809	23,7	4,8	46
19,35	773	23,3	4,8	43
19,54	778	24,4	3,2	47
19,19	763	24,3	3,2	46
18,81	745	24,8	4,8	45
18,69	724	24,9	4,8	46
18,15	696	24,8	4,8	44
17,17	664	24,2	6,4	46
16,69	631	24,8	3,2	44
15,45	594	24,6	4,8	44
14,43	554	25,0	4,8	47
13,67	506	24,8	4,8	44
12,45	471	24,9	4,8	47
11,24	431	25,7	3,2	43
10,05	369	25,4	3,2	46
8,57	309	25,3	3,2	45
7,17	262	25,3	3,2	45
5,70	214	25,4	3,2	49
4,20	163	25,3	1,6	46
3,04	105	24,3	8,0	52
0,84	39	22,6	9,7	53

0,44	14	21,7	8,0	56
0,18	0	21,2	8,0	57
0,00	0	20,6	8,0	59
0,00	7	9,9	4,8	91
0,10	18	9,9	3,2	91
0,41	47	10,2	4,8	89
0,43	97	10,8	3,2	88
1,55	142	10,5	4,8	90
2,88	192	11,4	1,6	88
4,53	243	12,2	1,6	85
7,87	299	12,8	1,6	84
10,39	352	13,4	1,6	83
12,47	397	14,2	3,2	81
13,67	441	14,7	4,8	78
14,88	487	15,4	3,2	77
15,81	522	16,2	4,8	74
16,42	564	16,8	3,2	73
17,06	591	17,3	3,2	73
17,54	626	17,9	3,2	68
17,95	645	18,0	3,2	68
18,41	671	18,3	3,2	68
18,84	694	19,3	3,2	65
18,89	703	20,1	3,2	64
19,02	721	20,8	1,6	61
19,17	724	21,2	4,8	58
19,39	722	21,3	3,2	57
19,28	728	21,4	4,8	58
19,15	719	22,4	3,2	56
19,14	710	22,4	4,8	48
18,57	686	22,7	3,2	50
18,16	671	22,7	4,8	47
17,73	657	22,9	6,4	48
17,34	624	23,1	4,8	45
16,61	578	23,5	4,8	44
15,38	545	23,7	4,8	47
14,76	515	23,8	3,2	44
13,90	499	23,8	4,8	42
13,02	452	24,0	3,2	42
11,87	406	23,9	4,8	42
10,45	359	23,8	4,8	42
8,71	339	23,8	3,2	41
8,55	278	24,0	3,2	40
6,77	202	23,8	3,2	41
4,57	134	23,7	3,2	43
2,81	77	23,3	1,6	48
1,51	47	22,7	0,0	47
0,51	21	21,3	3,2	49
0,19	7	20,2	1,6	57

0,02	0	19,1	0,0	62
	0	18,1	0,0	65
0,00	5	7,3	1,6	94
0,07	14	7,2	0,0	94
0,33	53	7,7	1,6	94
0,86	100	6,6	1,6	90
1,41	148	9,4	0,0	90
2,46	207	10,4	1,6	87
5,87	260	10,8	0,0	86
8,09	309	11,9	1,6	83
10,66	352	12,4	1,6	83
12,67	401	13,3	1,6	79
13,88	450	13,8	1,6	77
14,82	490	15,2	1,6	73
15,63	527	15,9	1,6	70
16,45	563	17,2	1,6	67
17,04	598	17,6	3,2	66
17,46	622	17,7	3,2	65
17,98	649	18,7	3,2	61
18,56	668	19,0	1,6	62
18,79	691	19,4	4,8	61
18,87	705	20,1	3,2	60
19,16	714	20,2	3,2	60
19,28	724	10,6	3,2	56
19,28	719	20,8	4,8	56
19,17	719	20,8	3,2	52
18,99	712	21,3	4,8	50
18,94	701	21,6	4,8	49
18,54	691	21,9	4,8	48
18,10	671	22,8	1,6	47
17,59	652	23,1	3,2	45
17,13	624	23,2	3,2	45
16,53	596	23,4	4,8	43
15,81	564	23,3	3,2	44
14,69	522	23,8	3,2	41
13,73	487	23,8	3,2	39
12,87	448	24,5	3,2	46
11,80	399	24,3	3,2	41
10,69	359	24,4	3,2	39
9,32	304	24,4	3,2	39
7,82	257	24,4	1,6	39
6,42	192	24,4	3,2	41
4,73	127	22,8	6,4	46
3,36	76	21,4	11,3	50
1,38	30	20,4	11,3	52
0,28	12	19,7	12,9	54
0,07	5	19,1	14,5	54
0,00	0	18,5	14,5	58

0,00	0	18,1	12,9	60
0,00	5	7,8	6,4	83
0,04	12	7,9	6,4	81
0,29	35	8,1	6,4	81
0,73	79	8,2	3,2	83
1,31	131	8,6	3,2	84
3,21	190	9,4	3,2	81
4,85	249	9,8	4,8	79
7,87	301	10,4	3,2	78
10,22	348	11,2	1,6	77
12,50	396	12,1	1,6	75
13,76	439	12,8	1,6	74
14,71	480	13,5	1,6	72
15,56	520	14,4	3,2	67
16,39	554	15,0	4,8	64
17,06	588	15,7	1,6	65
17,55	617	16,4	1,6	63
17,99	641	17,3	1,6	64
18,46	666	17,4	3,2	63
18,73	683	18,2	3,2	60
19,03	698	18,9	3,2	60
19,53	703	19,1	3,2	60
19,49	708	19,6	3,2	61
19,46	710	19,9	4,8	60
19,47	700	20,1	4,8	61
19,26	698	20,8	4,8	60
19,10	689	20,9	4,8	60
18,55	671	21,3	4,8	61
18,21	654	21,8	3,2	58
17,78	632	21,7	6,4	57
17,18	605	21,7	4,8	56
16,35	579	22,2	3,2	57
15,60	543	22,2	4,8	60
14,68	510	22,7	4,8	57
13,69	473	23,1	3,2	55
12,70	428	23,1	4,8	56
11,49	387	23,1	3,2	55
10,37	340	23,2	3,2	55
9,11	295	23,3	3,2	54
7,61	232	23,2	3,2	56
5,32	178	23,2	3,2	55
4,68	134	23,4	1,6	56
2,58	65	23,1	1,6	57
1,07	32	22,5	0,0	59
0,24	11	21,2	1,6	62
0,05	0	19,4	3,2	64
0,00	0	18,8	0,0	71
0,00	0	17,7	0,0	73

**Anexo C**

Etapa III - 26 dados

<b>Pot.[kW]</b>	<b>Rad.[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Temp.[°C]</b>	<b>Vel.Vento[m/s]</b>	<b>UR.[%]</b>
0,00	0	20,6	8,0	59
0,00	0	9,3	2,0	45
0,86	100	6,6	1,6	90
1,41	148	9,4	0,0	90
2,46	207	10,4	1,6	87
3,36	105	21,4	11,3	50
4,20	163	25,3	1,6	46
5,32	178	23,2	3,2	55
6,42	192	24,4	3,2	41
7,17	262	25,3	3,2	45
8,09	309	11,9	1,6	83
9,32	304	24,4	3,2	39
10,45	359	23,8	4,8	42
11,49	387	23,1	3,2	55
12,47	397	14,2	3,2	81
13,17	440	21,7	3,6	60
13,18	464	17,9	1,6	73
13,60	419	16,4	2,4	75
13,93	466	20,5	3,6	58
14,43	554	25,0	4,8	47
15,49	554	19,2	1,6	68
16,45	563	17,2	1,6	67
17,46	622	17,7	3,2	65
19,49	708	19,6	3,2	61
19,54	746	24,3	6,9	90
20,03	800	23,3	4,8	53

**Anexo D**

Etapa IV a VI - 20 dados

<b>Pot.[kW]</b>	<b>Rad.[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Temp.[°C]</b>	<b>UR.[%]</b>
0,00	0	20,6	59
1,41	148	9,4	90
2,46	207	10,4	87
3,36	105	21,4	50
4,20	163	25,3	46
5,32	178	23,2	55
6,42	192	24,4	41
7,17	262	25,3	45
8,09	309	11,9	83
9,32	304	24,4	39
10,45	359	23,8	42
11,49	387	23,1	55
12,47	397	14,2	81
13,18	464	17,9	73
14,43	554	25,0	47
15,49	554	19,2	68
16,45	563	17,2	67
17,46	622	17,7	65
19,49	708	19,6	61
20,03	800	23,3	53