

Jornandes Dias da Silva
Thiago Maciel da Silva

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS
ENERGÉTICOS PARA A PRODUÇÃO DE
ENERGIA E ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DE
UM MÓDULO FOTOVOLTAICO**

Jornandes Dias da Silva
Thiago Maciel da Silva

Análise Estatística de Parâmetros Energéticos para a Produção de Energia e Estimativa da Eficiência
de um Módulo Fotovoltaico

1ª ed.

Piracanjuba-GO
Editora Conhecimento Livre
Piracanjuba-GO

1ª ed.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Jornandes Dias da
S586A Análise Estatística de Parâmetros Energéticos para a Produção de Energia e Estimativa
da Eficiência de um Módulo Fotovoltaico
/ Jornandes Dias da Silva. Thiago Maciel da Silva. – Piracanjuba-GO

Editora Conhecimento Livre, 2024

95 f.: il

DOI: 10.37423/2024.edcl1041

ISBN: 978-65-5367-567-4

Modo de acesso: World Wide Web

Incluir Bibliografia

1. estatística 2. ,produção-de-energia 3. ,módulo-fotovoltaico I. Silva, Jornandes Dias da II. Silva,
Thiago Maciel da III. Título

CDU: 620

<https://doi.org/10.37423/2024.edcl1041>

O conteúdo dos artigos e sua correção ortográfica são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

EDITORIA CONHECIMENTO LIVRE

Corpo Editorial

MSc Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior

MSc Humberto Costa

MSc Thays Merçon

MSc Adalberto Zorzo

MSc Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno

PHD Willian Douglas Guilherme

MSc Andrea Carla Agnes e Silva Pinto

MSc Walmir Fernandes Pereira

MSc Edisio Alves de Aguiar Junior

MSc Rodrigo Sanchotene Silva

MSc Adriano Pereira da Silva

MSc Frederico Celestino Barbosa

MSc Guilherme Fernando Ribeiro

MSc. Plínio Ferreira Pires

MSc Fabricio Vieira Cavalcante

PHD Marcus Fernando da Silva Praxedes

MSc Simone Buchignani Maigret

Dr. Adilson Tadeu Basquerote

Dra. Thays Zigante Furlan

MSc Camila Concato

PHD Miguel Adriano Inácio

MSc Anelisa Mota Gregoleti

PHD Jesus Rodrigues Lemos

MSc Gabriela Cristina Borborema Bozzo

MSc Karine Moreira Gomes Sales

Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares

MSc Pedro Panhoca da Silva

MSc Helton Rangel Coutinho Junior

MSc Carlos Augusto Zilli

MSc Euvaldo de Sousa Costa Junior

Dra. Suely Lopes de Azevedo

Dr. Francisco Odecio Sales

MSc Ezequiel Martins Ferreira

MSc Eliane Avelina de Azevedo Sampaio

MSc Carlos Eduardo De Oliveira Gontijo

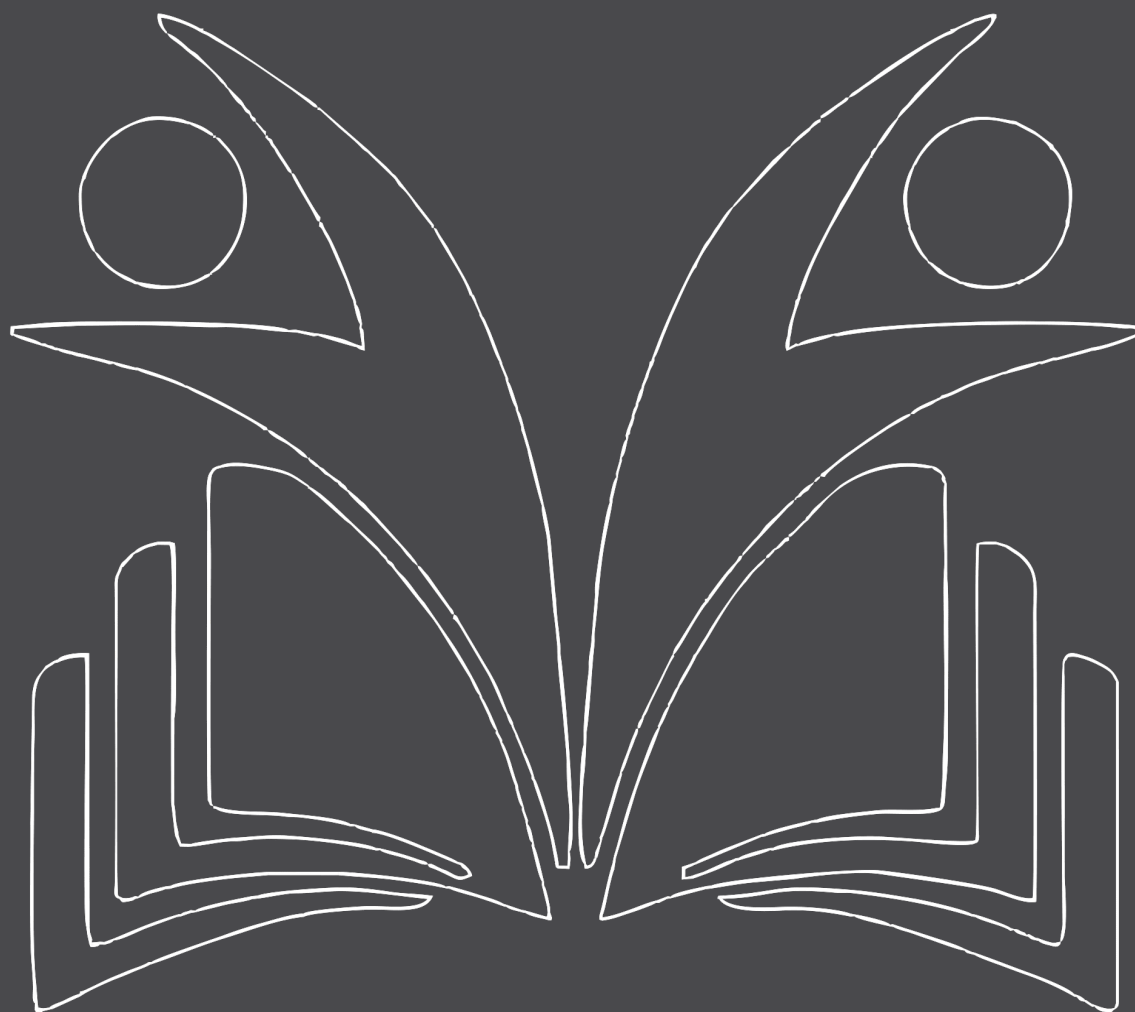
Dr. Rodrigo Couto Santos

Dra. Milena Gaion Malosso

PHD Marcos Pereira Dos Santos



10.37423/2024.edcl1041



PREFÁCIO

A produção de energia e a eficiência de módulos fotovoltaico são parâmetros potencial no campo da energia solar. Dados de 01 de janeiro de 2021 a 31 de dezembro de 2021 foram utilizados através de metodologias diretas e inversas para elaboração de métricas a serem utilizadas na observação dos dados estimados. Na contextualização foi apresentado a importância do estudo em energia fotovoltaica, além de mostrar o potencial das cidades escolhidas para este estudo, também a evolução tecnológica que está acontecendo, com módulos fotovoltaicos mais eficientes a cada dia e os desafios dos atuais módulos de placas solares. Na metodologia foram apresentadas as métricas que seriam utilizadas, as grandezas observadas e as metodologias escolhidas. Foram observadas as cidades de Salvador e Natal, os dados foram obtidos através do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As grandezas utilizadas foram: radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. A partir dessas grandezas foram geradas equações, gráficos e dados esperados de produção de energia e eficiência do módulo fotovoltaico ao longo do dia e do ano. No final foi realizado a comparação dos dados esperados com os medidos, além da comparação entre as cidades e seus meses com maiores potenciais de geração de energia solar.

Thiago Maciel da Silva

tms@poli.br

Jornandes Dias da Silva

jornandesdias@poli.br

SÍMBOLOS E SIGLAS

EAM	Erro absoluto médio
EE	Eficiência elétrica
GWP	Giga Watts Pico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Intervalo de confiança
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MMQ	Mínimos quadrados
PV	Photovoltaic
PTEC	Potência total de energia contínua
PEE	Produção de energia estimada
QME	Quadrado médio do erro
QM	Total Quadrado médio total
REQM	Raiz quadrada do erro quadrático médio
Si	Silício
SV	Sistema fotovoltaico
TW	Terra Watts

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Energia solar no mundo [17]. 16

Figura 2: Sistema on e off-grid [19]. 18

Figura 3. Paine solar. 20

Figura 4. Efeito fotovoltaico. [25] 20

Figura 5. Monocristalino 20

Figura 6. Policristalino. 20

Figura 7. Silício amorfo. 21

Figura 8. Filmes finos 21

Figura 9. Heliógrafo (Foto: Metereopolo) 22

Figura 10. Actinógrafo (Foto: INPE). 22

Figura 11. (Foto: UNIMETRO). 23

Figura 12. Funcionamento de um módulo fotovoltaico. [25] 23

Figura 13. Modelo de regressão linear simples 25

Figura 14. Modelo de regressão não linear. 26

Figura 16: Irradiação solar Salvador - BA 2021. 38

Figura 17. Temperatura ambiente Salvador – BA. 38

Figura 18. Velocidade do vento Salvador – BA. 39

Figura 19. Radiação solar primeiro trimestre Salvador. 40

Figura 20. Radiação solar segundo trimestre Salvador. 40

Figura 21. Radiação solar terceiro trimestre Salvador. 42

Figura 22. Radiação solar quarto trimestre Salvador. 43

Figura 23. Temperatura ambiente primeiro trimestre Salvador. 44

Figura 24. Temperatura ambiente segundo trimestre Salvador. 45

Figura 25. Temperatura ambiente terceiro trimestre Salvador. 46

Figura 26. Temperatura ambiente quarto trimestre Salvador. 47

Figura 27. Velocidade do vento primeiro trimestre Salvador. 48

Figura 28. Velocidade do vento segundo trimestre Salvador. 49

Figura 29. Velocidade do vento terceiro trimestre Salvador. 50

Figura 30. Velocidade do vento quarto trimestre Salvador. 50

Figura 31. Resultados da radiação solar do mês janeiro ajustados com um 53

Figura 32. Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de terceira ordem. 53

Figura 34. (c) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um modelo de terceira ordem; (d) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de terceira ordem. 58

Figura 35. (a) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um 59

Figura 36. Radiação solar total média do mês e radiação solar total média do dia.....60

Figura 37. Energia verde produzida a partir do módulo fotovoltaico escolhido utilizando a radiação solar total média. 61

Figura 38. a) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para janeiro. b) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para outubro. 63

Figura 39. a) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para janeiro. b) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para outubro. 64

Figura 40: Irradiação solar Natal - RN 2021. 64

Figura 41. Temperatura ambiente Natal - RN 2021. 65

Figura 42. Velocidade do vento Natal - RN 2021. 65

Figura 43. Radiação solar primeiro trimestre Natal. 66

Figura 44. Radiação solar segundo trimestre Natal. 67

Figura 45. Radiação solar terceiro trimestre Natal. 68

Figura 46. Radiação solar quarto trimestre Natal. 69

Figura 47. Temperatura ambiente primeiro trimestre Natal. 70

Figura 48. Temperatura ambiente segundo trimestre Natal. 71

Figura 49. Temperatura ambiente terceiro trimestre Natal. 72

Figura 50. Temperatura ambiente quarto trimestre Natal. 73

Figura 51. Velocidade do vento primeiro trimestre Natal. 74

Figura 52. Velocidade do vento segundo trimestre Natal. 75

Figura 53. Velocidade do vento terceiro trimestre Natal. 76

Figura 54. Velocidade do vento quarto trimestre Natal. 78

Figura 55. (a) Resultados da radiação solar do mês fevereiro ajustados com um 80

Figura 56. (c) Resultados da radiação solar do mês fevereiro ajustados com um 81

Figura 57. (a) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um 82

Figura 58. (a) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um 83

Figura 59. Radiação solar total média do mês e radiação solar total média do dia... 84

Figura 60. Energia verde produzida a partir do módulo fotovoltaico escolhido utilizando a radiação solar total média. 85

Figura 61. i) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para fevereiro. j) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para outubro. 86

Figura 62. a) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para fevereiro. b) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para outubro. 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correlação das equações de temperatura de T_b em função do EAM.	30
Tabela 2. Especificações do módulo fotovoltaico FU 300P da marca Sun Data.	31
Tabela 3. Características técnicas módulo fotovoltaico FU 300P da Sun Data.	31
Tabela 4. Cidades com maiores PIB do Nordeste.	34
Tabela 5. Radiação (W/m^2) - Salvador – BA.	35
Tabela 6. Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$) - Salvador – BA.	35
Tabela 7. Velocidade do vento (m/s) - Salvador – BA.	37
Tabela 8. Radiação (W/m^2) – Natal – RN.	37
Tabela 9. Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$) – Natal – RN.	41
Tabela 10. Velocidade do vento (m/s) – Natal – RN.	43
Tabela 11. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do primeiro semestre de 2021 para Salvador.	45
Tabela 12. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do segundo semestre de 2021 para Salvador.	47
Tabela 13. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o primeiro semestre de 2021 para Salvador.	49
Tabela 14. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o segundo semestre de 2021 para Salvador.	51
Tabela 15. Parâmetros estatísticos para a média de velocidade do vento para o primeiro semestre de 2021 para Salvador.	52
Tabela 16. Parâmetros estatísticos para a média da velocidade do vento para o segundo semestre de 2021 para Salvador.	54
Tabela 17. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira	67
Tabela 18. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta	58

Tabela 19. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira 66

Tabela 20. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta 68

Tabela 21. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do primeiro semestre de 2021 para Natal. 71

Tabela 22. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do segundo semestre de 2021 para Natal. 72

Tabela 23. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o primeiro semestre de 2021 para Natal. 72

Tabela 24. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o segundo semestre de 2021 para Natal. 76

Tabela 25. Parâmetros estatísticos para a média de velocidade do vento para o primeiro semestre de 2021 para Natal. 79

Tabela 26. Parâmetros estatísticos para a média da velocidade do vento para o segundo semestre de 2021 para Natal. 80

Tabela 27. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira 81

Tabela 28. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta 83

Tabela 29. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira 83

Tabela 30. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta 87

Tabela 31. Dados estatísticos regressão polinomial Salvador – outubro. 87

Tabela 32. Dados estatísticos regressão polinomial Natal – outubro. 88

Tabela 33. Dados estatísticos regressão linear Salvador – outubro. 88

Tabela 34. Dados estatísticos regressão linear Natal – outubro. 89

Sumário

CAPÍTULO 1.....	12
1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÕES.....	12
CAPÍTULO 2.....	14
2.1. ENERGIA DO SOL.....	14
2.2. ENERGIA DO SOL ABSORVIDA PELA TERRA	14
2.3. ENERGIA SOLAR	15
2.4. CÉLULA FOTOVOLTAICA E SUA EFICIÊNCIA	18
2.5. INMET	22
2.6. RADIAÇÃO SOLAR EM SALVADOR E NATAL	23
CAPÍTULO 3.....	25
3.1. METODOLOGIA E MODELAGEM MATEMÁTICA	25
3.2. MODELO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	26
3.3. MODELO DE REGRESSÃO POLINOMIAL	27
3.4. PROBLEMA INVERSO LINEAR	27
3.5. MÉTRICAS ESTATÍSTICAS.....	28
3.6. TEMPERATURA NO VERSO DA CÉLULA.....	29
3.7. TEMPERATURA DENTRO DA CÉLULA	30
3.8. EFICIÊNCIA DA CÉLULA	30
3.9. POTÊNCIA DE SAÍDA DA CÉLULA	32
3.10. ANÁLISE DE INCERTEZA	32
CAPÍTULO 4.....	34
4.1. CIDADES ESCOLHIDAS	34
4.2. SALVADOR - BA.....	37
4.2.1. SALVADOR - BA	39
4.2.2. DADOS MEDIDOS TEMPERATURA AMBIENTE	42
4.2.3. DADOS MEDIDOS VELOCIDADE DO VENTO	48
4.2.4. VALIDAÇÃO POR COMPARAÇÃO	51

4.2.4.1. PRIMEIRO SEMESTRE (JANEIRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM 52

4.2.4.2. PRIMEIRO SEMESTRE (JANEIRO): MODELO DE QUARTA ORDEM..... 53

4.2.4.3. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM..... 55

4.2.4.4. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE QUARTA ORDEM 57

4.3. RADIAÇÃO TOTAL E MÉDIA DA RADIAÇÃO POR DIA..... 58

4.4. PRODUÇÃO DE ENERGIA 59

4.5. COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS 60

4.6. EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO 61

4.7. NATAL - RN 63

4.7.1. DADOS MEDIDOS DA RADIAÇÃO SOLAR 65

4.7.2. DADOS MEDIDOS TEMPERATURA AMBIENTE 69

4.7.3. DADOS MEDIDOS VELOCIDADE DO VENTO 73

4.7.4. VALIDAÇÃO POR COMPARAÇÃO 77

4.7.4.1. PRIMEIRO SEMESTRE (FEVEREIRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM 77

4.7.4.2. PRIMEIRO SEMESTRE (FEVEREIRO): MODELO DE QUARTA ORDEM..... 79

4.7.4.3. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM..... 80

4.7.4.4. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE QUARTA ORDEM 82

4.7.4.5. RADIAÇÃO TOTAL E MÉDIA DA RADIAÇÃO POR DIA..... 83

4.7.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA 83

4.7.6. COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS 84

4.7.7. EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO 85

CAPÍTULO 5..... 87

5.1. CONCLUSÕES 87

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÕES

As fontes de energia renovável têm um alto significado positivo no meio ambiente, na economia e na política mundial. A energia solar pode ser considerada como uma fonte renovável para suprir as demandas energéticas e controlar as mudanças globais do clima. Energia solar fotovoltaica é definida como a conversão direta a partir da energia da radiação solar em eletricidade através do efeito fotovoltaico, de forma que este efeito ocorre em materiais especiais, denominados semicondutores que fundamenta uma célula fotovoltaica [1-3]. De acordo com os átomos dos semicondutores, as células podem ser classificadas em cristalinas, que são subdivididas em monocristalinas, multicristalinas e microcristalinas.

A energia solar é a eletricidade gerada usando a radiação solar do sol. Embora a energia solar represente uma pequena porcentagem da produção global de energia, alguns países usam quantidades significativas de energia solar [4]. A China e os Estados Unidos lideram o mundo em capacidade total de energia solar, enquanto a Alemanha é um país que obtém uma grande porcentagem de sua eletricidade da energia solar.

Um sistema fotovoltaico (SV) é composto por um ou mais painéis solares combinados com um inversor e outro hardware elétrico e mecânico que usa a energia do sol para gerar eletricidade [5]. Os sistemas fotovoltaicos podem variar muito em tamanho, desde pequenos telhados ou sistemas portáteis até grandes usinas de geração em escala de utilidade.

Uma célula fotovoltaica é composta por muitas camadas de materiais, cada uma com uma finalidade específica. A camada mais importante de uma célula fotovoltaica é a camada semicondutora especialmente tratada. Um semicondutor é um elemento ou composto que conduz eletricidade sob algumas condições, mas não em outras. Essa propriedade de não ser um bom isolante nem um bom condutor torna os semicondutores úteis para controlar a corrente elétrica [6]. A condutividade elétrica de um semicondutor depende de uma variedade de condições incluindo corrente aplicada, intensidade da radiação infravermelha, radiação ultravioleta e luz visível na superfície [7]. O fato de os semicondutores terem quatro elétrons em sua camada de valência significa que eles formam ligações covalentes perfeitas com quatro átomos vizinhos. Isso cria uma estrutura de rede cristalina. Nesta rede pura, nenhum elétron livre pode conduzir corrente. Por causa disso, um verdadeiro semicondutor

é formado quando há impurezas em alguma estrutura cristalina, e são essas impurezas que conferem ao material suas propriedades distintas.

A geração solar fotovoltaica tem aumentado nos últimos anos devido às emissões de gases do efeito estufa para o meio ambiente. Este aumento de emissões de gases exigirá uma mudança na produção de energia em relação aos combustíveis fósseis. O uso de energia renovável, como a energia solar e a energia eólica, é uma opção de energia limpa para fins de geração de eletricidade. A energia solar pode ser convertida em eletricidade usando uma célula fotovoltaica (PV). A célula PV pode converter a energia do fóton na forma de sinais elétricos. Este método de geração de energia não prejudica o ecossistema e, portanto, os sistemas de geração de energia PV estão se tornando populares para geração em pequena escala, bem como para produção em grande escala.

Levantando toda a importância dos sistemas fotovoltaicos e o impacto que a energia solar poderá causar no futuro do país, buscou-se prever a geração solar em nas cidades Salvador e Natal através dos dados obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de radiação, temperatura do ambiente e velocidade do vento para o ano de 2021. Com os dados foram realizados estudos experimentais de teor quantitativo cada valor se aproxima da média, utilizando o desvio padrão de 95%, desconsiderando os erros sistemáticos e aleatórios (calibração dos dispositivos de medição etc.). Após a análise houve a análise inversa de um mês de cada semestre de cada cidade, posteriormente a comparação e análise desses meses entre si, obtendo dados como eficiência, temperatura do módulo fotovoltaico e produção de energia esperado.

CAPÍTULO 2

2.1. ENERGIA DO SOL

O Sol é uma estrela no centro do nosso sistema solar. A energia do Sol é vital para a vida na Terra. Não só permite que a vida exista, mas também é a fonte da maior parte da energia que os humanos usam. A energia solar para a Terra é significativa, mesmo depois de passar por centenas de quilômetros da atmosfera terrestre. A radiação solar que atinge a Terra tem uma quantidade significativa de energia [8]. A energia solar para a Terra, na superfície da atmosfera superior, é de cerca de 1367 W/m², Levando em conta o fato de que apenas metade da Terra está voltada para o Sol.

A luz solar, também conhecida como radiação solar, refere-se à luz recebida na Terra que se originou do Sol. Esta luz representa uma porção do espectro eletromagnético que inclui luz infravermelha, luz visível e luz ultravioleta. Cerca de metade da radiação está na porção visível do espectro solar, com a maior parte do restante na seção do infravermelho próximo com uma quantidade comparativamente pequena no espectro ultravioleta [9]. A luz do sol que incide sobre a superfície da Terra foi filtrada através da atmosfera, com parte da radiação ultravioleta sendo absorvida. A radiação que não é absorvida pela atmosfera pode produzir um bronzado ou queimaduras solares.

2.2. ENERGIA DO SOL ABSORVIDA PELA TERRA

A quantidade média de energia do sol absorvida pela Terra é cerca de 70% da energia incidente e está quantidade de energia pode ser usada como energia solar nas usinas solares térmicas ou células fotovoltaicas. A irradiância solar total é a potência máxima fornecida à superfície da terra, assumindo que o caminho da luz incidente é perpendicular a essa superfície [10]. Devido ao fato de a Terra ser uma esfera, apenas lugares próximos ao equador aproxima-se desse ângulo perpendicular. Em todos os outros locais da Terra, a luz solar que entra depende de algum ângulo. Com esse ângulo decrescente, a irradiância solar média também é reduzida [11]. Para explicar isso, o nível de irradiância solar é reduzido pela metade, deixando uma irradiância solar média final de aproximadamente:

$$I_{sc} = 340 \frac{W}{m^2} \quad (2.1)$$

O valor da Equação (2.1) representa a irradiância solar média que atinge a atmosfera externa da Terra e, portanto, ainda não levam em conta as perdas por reflexão e absorção.

A quantidade de 1000 W/m^2 é considerada como um valor padrão de radiação, chamada "um sol", e pode ser usada como padrão para testar e avaliar células fotovoltaicas e painéis solares. Embora essa quantidade de energia seja bastante significativa, isso não significa que a energia solar possa fornecer facilmente toda a nossa energia primária. Os problemas com a energia solar incluem dias nublados e a falta de uma maneira razoável de armazenar o "excesso" de energia coletada em dias ensolarados. Embora a energia solar seja um tipo importante de fonte de energia renovável, é importante investigar as vantagens e desvantagens desse tipo de energia.

Uma observação importante quanto ao potencial da energia é notada quando se mensura a quantidade de energia que o sol fornece todos os dias à Terra, seria suficiente para alimentar toda demanda energética diária do planeta diversas vezes.

Em 2010 o consumo do mundo foi 13 TW (Terra Watts), a estimativa é que esse número chegue a 30 TW em 2050. A superfície da Terra recebe cerca de 3×10^{24} joules por ano, ou seja, $9,5 \times 10^4$ TW de energia solar, cerca de 10.000 vezes a mais do que toda população terrestre consome [12].

2.3. ENERGIA SOLAR

A energia solar é a eletricidade gerada usando a radiação solar do sol. Embora a energia solar represente uma pequena porcentagem da produção global de energia, alguns países usam quantidades significativas de energia solar [13-16]. A China e os Estados Unidos lideram o mundo em capacidade total de energia solar, enquanto a Alemanha é um país que obtém uma grande porcentagem de sua eletricidade da energia solar [17]. Veja a

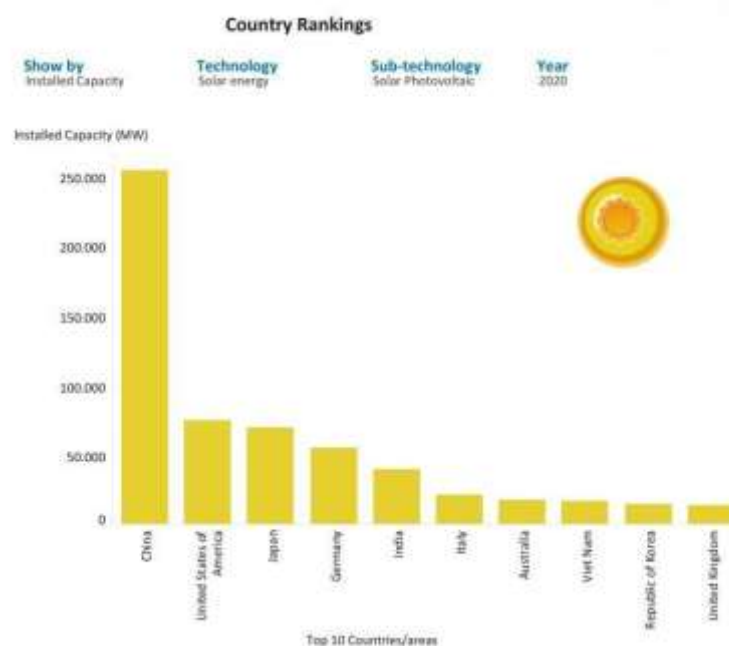


Figura 1: Energia solar no mundo [17].

Um painel solar, ou módulo solar, é um componente de um sistema fotovoltaico. Eles são construídos a partir de uma série de células fotovoltaicas dispostas em um painel. Eles vêm em uma variedade de formas retangulares e são instalados em combinação para gerar eletricidade [18]. Os painéis solares, às vezes também chamados de fotovoltaicos, coletam energia do Sol na forma de luz solar e a convertem em eletricidade que pode ser usada para abastecer residências ou empresas. Esses painéis podem ser usados para complementar a eletricidade de um edifício ou fornecer energia em locais remotos.

Por mais que pareça uma tendência recente, a produção (ou conversão) de energia solar em energia elétrica foi observada em 1839, pelo físico francês Edmond Becquerel, onde ele percebeu que duas placas de latão imersas em um eletrólito líquido (solução de selênio) produziam eletricidade quando expostas à luz solar. O fenômeno foi batizado de efeito fotovoltaico [19].

Charles Fritts, um inventor americano, em 1883, produziu a primeira bateria solar feita com folhas de selênio, baseando no efeito fotovoltaico. A eficiência alcançada foi de 1%, mesmo assim provou ao mundo que poderia obter energia elétrica sem a combustão de combustíveis fósseis.

Em 1954 nos Estados Unidos, através da Bell Labs foi desenvolvida a primeira célula solar base de silício, a célula alcançou a eficiência de 6%. [19]. Os principais eventos na história da energia solar:

- Efeito Fotovoltaico (1839);
- Efeito Fotovoltaico estudado em sólidos (1870);

- Construção da primeira célula fotovoltaica (1880);
- Início das pesquisas para aplicações práticas (1950);
- Primeira célula de silício (1954);
- Estudo de novas aplicações (1973).

Quando se elencam as desvantagens da energia solar podemos citar:

- A tecnologia atual não chegou a patamares satisfatórios, a eficiência média de uma célula fotovoltaica é baixa. Para se ter uma ideia, com base nos dados anteriores, se em 2000 todo o Estados Unidos fosse coberto por placas solares iriam conseguir gerar apenas 10% da energia consumida naquele ano [19].
- Outro fator é o financeiro, por mais que nos últimos anos incentivos fiscais (isenção de taxas) e o aumento do custo com energia elétrica tenham sido fatores que ajudaram a fomentar o mercado de energia solar, ainda não é acessível (e em alguns casos nem rentável) para os consumidores de baixa renda. O tempo de retorno médio varia entre 6 e 10 anos (16% a 10% a.a.), que não é uma taxa ruim já que a atual garantia dos fabricantes, garante um tempo útil de 20-25 anos (seguindo as recomendações do manual);
- Uma desvantagem levantada por várias é a impossibilidade de gerar energia à noite, logo o cliente teria que armazenar um banco de baterias para armazenar o excesso de energia gerado a noite e utilizar no período noturno, gerando mais um gasto, uma vez que essas baterias precisam ser substituídas com frequência e precisam ser armazenadas em locais adequados, outra observação é que o uso de baterias não condiz com a ideia de “energia limpa” defendida por muitos incentivadores da energia solar;
- Vale ressaltar que a eficiência das placas (que já não são altas, entre 15-25%) é afetada por posicionamento das placas, sombras, nuvens, sujeiras, então o cliente precisa ficar atento;
- Em 2012 a ANEEL aprovou a resolução nº 482 instituindo o sistema solar on grid
- Figura 2), onde o cliente fica ligado à rede, o excesso de energia se transforma em crédito e durante a noite o cliente consome energia da rede. O usuário paga uma tarifa básica (para os gastos com distribuição, encargos etc.). Uma característica interessante do sistema é que o sistema solar não necessariamente precisa estar próxima residência, mas sim está no mesmo CPF. E não se pode esquecer que o sistema on-grid (na rede), desliga o cliente quando não tem

tensão na rede da empresa distribuidora para proteger os funcionários e outros clientes da mesma rede por tensão de retorno e outros fatores.

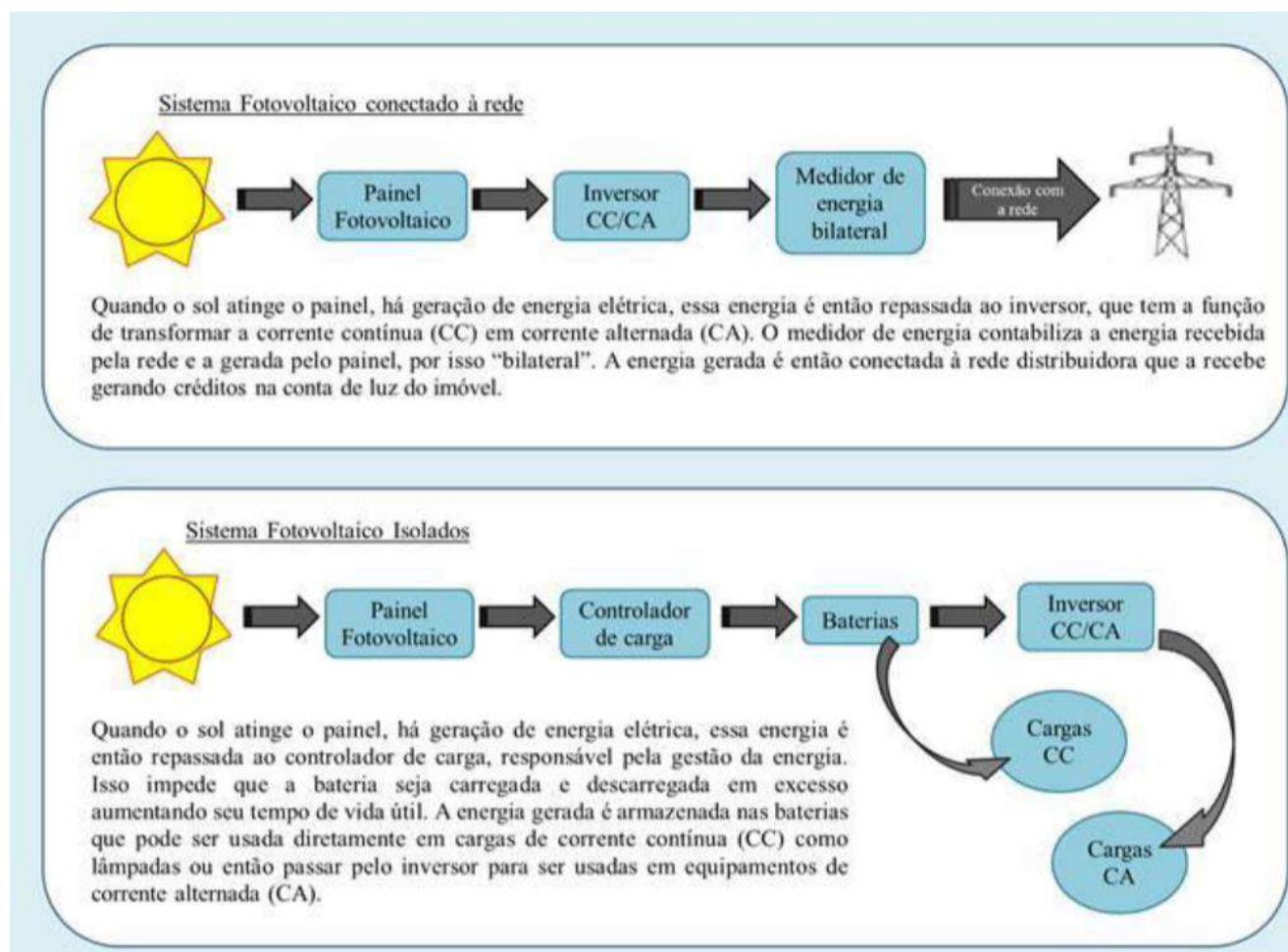


Figura 2: Sistema on e off-grid [19].

2.4. CÉLULA FOTOVOLTAICA E SUA EFICIÊNCIA

Uma célula fotovoltaica (Figura 3) é composta por muitas camadas de materiais, cada uma com uma finalidade específica. A camada mais importante de uma célula fotovoltaica é a camada semicondutora especialmente tratada. Um semicondutor é um elemento ou composto que conduz eletricidade sob algumas condições, mas não em outras. Essa propriedade de não ser um bom isolante nem um bom condutor torna os semicondutores úteis para controlar a corrente elétrica [20]. A condutividade elétrica de um semicondutor depende de uma variedade de condições incluindo corrente aplicada, intensidade da radiação infravermelha, radiação ultravioleta e luz visível na superfície.



Figura 3. Paine solar.

O fato de os semicondutores terem quatro elétrons em sua camada de valência significa que eles formam ligações covalentes perfeitas com quatro átomos vizinhos. Isso cria uma estrutura de rede cristalina. Nesta rede pura, nenhum elétron livre pode conduzir corrente [21]. Por causa disso, um verdadeiro semicondutor é formado quando há impurezas em alguma estrutura cristalina, e são essas impurezas que conferem ao material suas propriedades distintas.

O material mais utilizado nas células fotovoltaicas é o silício (Si) por suas propriedades semicondutoras [22]. Benefícios como quantidade disponível (segundo maior elemento mais abundante na terra) e baixo custo de fabricação fomentam a escolha do material. Ele é explorado sob diversas formas: monocristalino, policristalino e amorfo. [23]

Também estão sendo testados outros materiais alternativos como as células de filmes finos, pois seu processo de fabricação requer menor custo, infelizmente também refletindo na sua baixa eficiência energética quando comparada com as células de silício convencional. [23]

A célula funciona com base no efeito fotovoltaico, ela é construída com material semicondutor (material com características entre um condutor e um isolante). O silício tem uma aparência próxima a areia e é o semicondutor utilizado na placa solar utilizada no presente estudo. O cristal puro de silício não possui elétrons livres, sendo considerado um mal condutor, por isso é realizada a mistura de outros elementos em pequenas quantidades, a esse processo se dá o nome de dopagem.

Se a dopagem do silício for realizada com o fósforo, o material resultante obtido tem elétrons livres de carga negativa, denominando silício tipo N. Se a dopagem for utilizando o boro, o material obtido tem cargas positivas, obtendo o silício tipo P. [23]

Postos em camadas intercalares, o silício P e N (Figura 4), formam um campo elétrico após a incidência de luz, proporcionando o ambiente necessário para o desenvolvimento do efeito fotovoltaico nas células de silícios, convertendo energia solar em energia elétrica por meio de um condutor. A corrente

gerada vai ter interferência da eficiência do sistema e da quantidade de luz que está incidindo sobre. Lembrando que esse efeito não armazena energia.

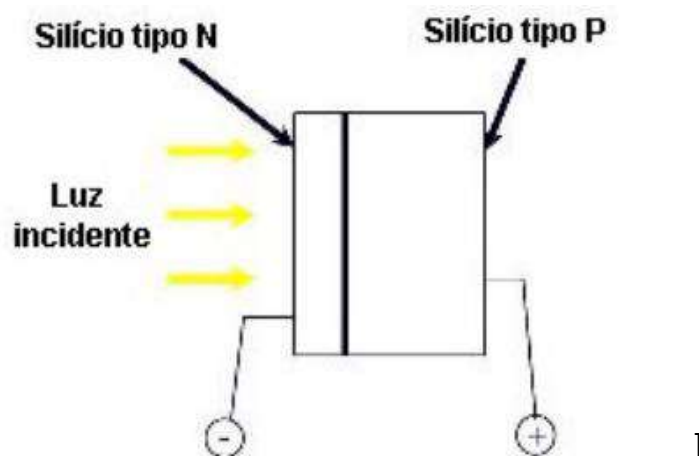


Figura 4. Efeito fotovoltaico. [25]

Tipos de células de silício podem ser encontradas nas Figura 5, Figura 6, Figura 7 e A Figura 9 [23 e 24].

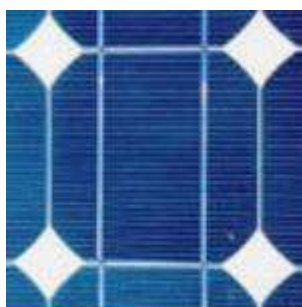


Figura 5. Monocristalino: são obtidas em fornos especiais, com uma eficiência média de 12% e espessura de 0,4 a 0,5mm².

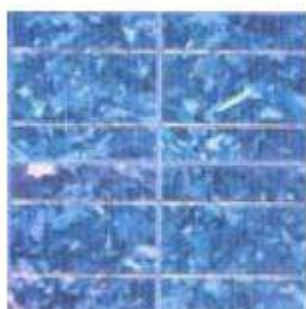


Figura 6. Policristalino: obtidas por fusão de silício puro em moldes especiais, é menor que a monocristalina. Por uma menor tolerância ao calor quando comparada com o monocristalino, sua eficiência média também é menor.

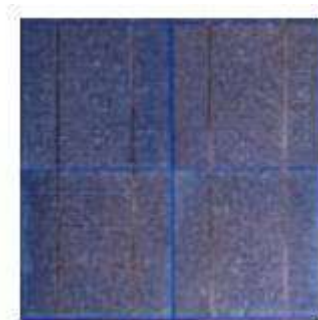


Figura 7. Silício amorfo: com eficiência média entre 5% e 7%, é obtida por deposição de camadas finas de silício sobre vidro ou metal.



Figura 8. Filmes finos

A Figura 9 de Filmes finos são desenvolvidas em laboratório, atualmente, pelo alto custo de produção, seu uso é voltado para sistemas especiais (satélites etc.). Alguns exemplos: disseleneto de cobre e índio (CIS), alcançando 18% de eficiência e o silício amorfo hidrogenado (a-Si) utilizado em calculadoras, relógios ou equipamentos com baixo consumo de energia.

Se tratando de eficiência das células fotovoltaica, quando há a conversão de energia, solar para elétrica, boa parte da energia inicial é perdida no processo. Quanto mais energia útil está disponível depois da transformação, mais a célula é eficiente. A eficiência é proposta por testes padronizados em sua fabricação, depende fatores como condições geográficas, material da construção, tempo de uso etc. [26]. Embora algumas células solares experimentais tenham alcançado eficiências próximas a 50% [27], a maioria das células comerciais está abaixo de 30% [28].

Como exemplo de células com alta eficiência, são as células baseadas em perovskita de haleto metálico, alcançando até 25% de eficiência na conversão de energia (solar para elétrica). [29]

2.5. INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é uma instituição federal responsável por prover informações e análises sobre meteorologia, clima, radiação, velocidade do vento e outros dados recolhidos em suas estações meteorológicas. Os dados de radiação disponíveis no INMET são calculados através dos maquinários tecnológicos instalados nas estações meteorológicas, que são formados por 3 equipamentos de aferição, do tempo e da radiação no campo terrestre, o Heliógrafo, que serve para medir o número de horas em que o sol brilha diretamente na superfície, o Actinógrafo, que registra continuamente a energia solar que chega à região e o Piranômetro, que acumula a energia solar incidente ao longo do dia [30].

O heliógrafo (Figura 10) mede o total de horas de brilho solar em um determinado dia. Pode-se resumir de forma que o equipamento meça o período em que o brilho do Sol não foi encoberto por uma nuvem. [31]



Figura 10. Heliógrafo (Foto: Metereopolo)

O actinógrafo (Figura 11) faz o registro da Radiação Solar Total medindo assim a energia. Onde a radiação solar total é a soma da Radiação Solar Direta (que vem diretamente do disco solar) com a Radiação Solar Difusa (espalhada pelos gases e aerossóis da atmosfera) [32-33]. O heliógrafo e o actinógrafo não medem a mesma coisa, mas se complementam na observação da radiação solar e são equipamentos necessários para estimar os parâmetros das estações do INMET que foram observados.



Figura 11. Actinógrafo (Foto: INPE).

O último equipamento utilizado para observar os dados solares é o piranômetro (Figura 12), usado para medir radiação solar em uma superfície plana, também faz a medição da densidade de fluxo da radiação solar (W/m^2). [34].



Figura 12. (Foto: UNIMETRO).

2.6. RADIAÇÃO SOLAR EM SALVADOR E NATAL

O Brasil apresenta um potencial enorme quando o assunto é energia renovável, destacando a eólica e a solar [35]. A região nordeste inclusive hoje, alcançou a autossuficiência com a energia eólica, com 15GWP (Giga Watts Pico) de potência instalada, uma vez que o consumo médio da região nordeste está em torno de 11GWP [36].

Um dos maiores desafios de hoje é acompanhar a demanda energética, ao mesmo tempo que o consumo cresce. E por mais que a base da matriz energética seja baseada em energia renovável, a

maior parte provém de fontes hidroelétricas (62.5% [37]). Em termos de comparação, temos 3,9% de geração solar e 1% de eólica, apesar de todo o potencial disponível.

Ocupando uma área de 4.354km², com 13 municípios a região metropolitana de Salvador (com 4 milhões de habitante) enfrenta os desafios do aumento de demanda energética [37]. E por estar localizada na região tropical, possui um grande potencial a ser aproveitado com a energia solar. Lembrando que a localização geográfica é um dos itens que causam impacto na geração de energia solar, outros como a eficiência da célula e posicionamento em relação a linha do Equador (para um melhor aproveitamento da radiação global difusa) auxiliam na produção de energia.

Em termos recentes, observou-se a evolução sazonal dos valores médios diários das componentes da radiação solar para Salvador com uma média mensal de radiação solar com máximo em torno de 25 MJm-2dia-1 em janeiro (verão) e mínimo de 15 MJm-2dia-1 em junho (inverno/chuvoso). Este resultado demonstra o potencial de uso da energia solar na cidade Salvador, pois a maior demanda de energia no Brasil ocorre no período de verão [37]. O pico de consumo observado nos últimos anos para as áreas urbanas ocorreu entre às 13h e 15h [37]. Pelo histórico observado no estudo provou-se que Salvador tem um potencial de energia solar pouco aproveitado quando comparado com a potência instalada e a potência consumida. A cidade foi uma das escolhidas para o estudo presente.

Natal–RN foi a segunda cidade observada. Está localizada no nordeste brasileiro que apresenta elevado potencial de geração solar face com altos índices de radiação solar durante todo o ano, com valores superiores até mesmo aos registrados em regiões montanhosas da Bolívia [38]. A região metropolitana de Natal consiste em dez municípios, com 1.5 milhão de pessoas, sendo a 16ª região mais populosa do país [38]. Durante os anos de 2001 a 2007 foi observado um clima quente-úmido, com temperatura média em torno de 26°C, ventos moderados predominante de Sudeste, inclusive reitera-se que os ventos do Rio Grande do Norte são os melhores do Brasil para geração solar [40]. Pelo fato de ser uma cidade próxima à linha do equador, apresenta aproximadamente 2.184,80 horas anuais de insolação.

Durante o período observou-se que o pico de radiação solar ocorre em todos os meses antes das 12h00. Nos meses de janeiro, fevereiro, março e junho os picos ocorreram após 11h40, enquanto nos demais os picos ocorreram entre 10h55 e 11h30 (hora local). Nos meses de outubro a fevereiro ocorreram as maiores médias, sendo também os melhores meses para a produção de energia solar. Os meses de junho e julho apresentaram os menores valores fato que pode ser atribuído à estação das chuvas, onde índice de umidade é mais alto que nos outros meses do ano [38].

CAPÍTULO 3

3.1. METODOLOGIA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Um modelo físico representa uma construção física cujos fenômenos físicos deste modelo físico podem ser modelados aplicando modelo matemático. A modelagem matemática é uma ferramenta estabelecida em ciências para estudar previsão de fenômenos complexos dos modelos físicos. Diferentes aspectos dos modelos matemáticos são considerados como questões desafiadoras para solução de tais modelos matemáticos para interpretar os resultados e prever as respostas do modelo físico.

Com base no funcionamento do módulo fotovoltaico (Figura 13) um modelo de regressão polinomial foi proposto para ajustar os dados experimentais, dependendo das variáveis do tempo (hora do dia).

$$y_i = \alpha_0^{(k)} + \alpha_1^{(k)} t_i + \alpha_2^{(k)} t_i^2 + \alpha_3^{(k)} t_i^3 + \dots + \alpha_m^{(k)} t_i^m + \varepsilon_i; i=0,1,2,3,\dots,m \quad (3.1)$$

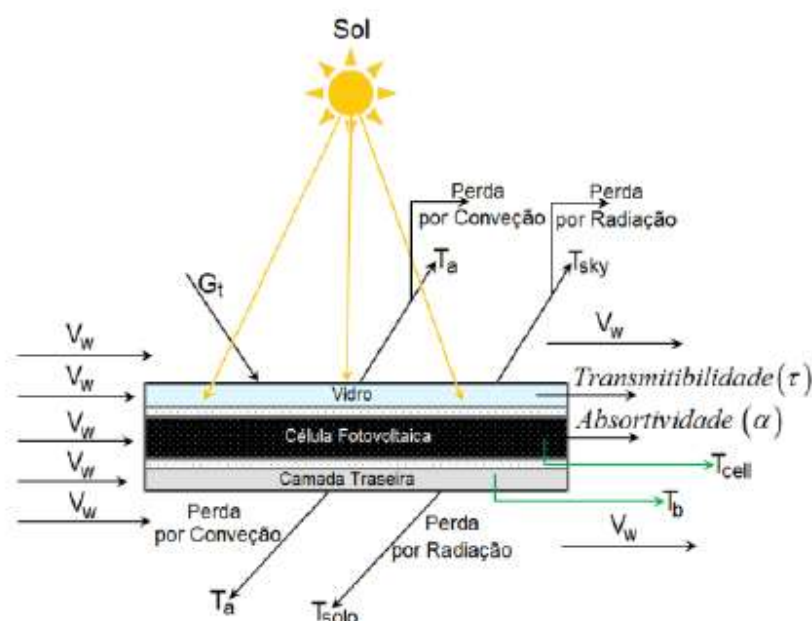


Figura 13. Funcionamento de um módulo fotovoltaico. [25]

Na Equação (1), $\alpha_m^{(k)}$ relatam um conjunto de parâmetros desconhecidos e/ou taxas do modelo proposto (Equação (1)). Estes parâmetros desconhecidos e/ou taxas têm um papel importante sobre a resposta. Os valores numéricos destes parâmetros têm um impacto direto sobre a resposta com efeito positivo ou negativo. Por outro lado, t_i relata o tempo (variável independente ou explicativa). A

relação entre y_i e t_i não é uma relação perfeita e, portanto, um erro aleatório (ε_i) está associado a esta relação com esperança $E[\varepsilon_i/t_i]$ igual a 0 e variância $V[\varepsilon_i/t_i]$ igual a σ^2 (variância constante).

Tabela 1. Conjuntos de funções contínuas.

Funções Contínuas $g_m(t_m)$	Funções Contínuas $g_m(t_m)$
$g_1(t_i) = 1,0$	$g_4(t_i) = t_i^3$
$g_2(t_i) = t_i$	$\vdots$
$g_3(t_i) = t_i^2$	$g_m(t_m) = t_m^n$

A Equação (1) pode ser reescrita usando as funções contínuas da Tabela (3.1.). As funções contínuas $g_1(t_0)$, $g_2(t_1)$, $g_3(t_2), \dots, g_m(t_m)$ são linearmente independente e a Equação (1) é reescrita como uma função de tais funções contínuas como segue.

$$y_i = \alpha_0^{(k)} g_1(t_i) + \alpha_1^{(k)} g_2(t_i) + \alpha_2^{(k)} g_3(t_i) + \alpha_3^{(k)} g_4(t_i) + \dots + \alpha_m^{(k)} g_m(t_m) + \varepsilon_i \tag{3.2}$$

3.2. MODELO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Definido como uma distribuição Gaussiana, com média $E[Y_i | x_i] = \mu_i = \alpha_0 + \mu_1 x_i$ e variância $V(Y_i | x_i) = V(\varepsilon) = \sigma^2$. Utilizados para descrever comportamentos de variáveis dependentes em relação as variáveis independes, é composto por uma função linear dos coeficientes (α_0 e α_1), uma vez que são elementos do vetor parâmetro α , como pode ser observado na Figura 14. Utilizou-se o modelo de regressão linear através do diagrama de paridade dos dados medidos com os dados previstos da radiação solar (G_t).

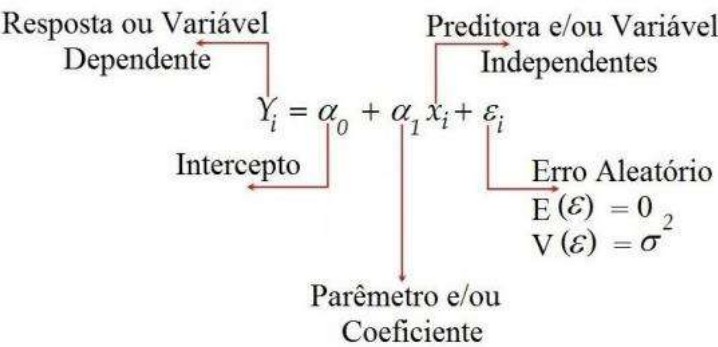


Figura 14. Modelo de regressão linear simples

3.3. MODELO DE REGRESSÃO POLINOMIAL

Da mesma forma que a regressão linear simples, a regressão polinomial está restrita a distribuição gaussiana com média e variância, porém a média assume $E(y | x_i, i = 1, 2, \dots, k) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2^2 + \dots + \alpha_k x_k^k$ e a variância $V(Y_i | x_i) = V(\varepsilon) = \sigma^2$. Tem como objetivo estabelecer uma relação entre a variável explicativa e a resposta (Figura 15). Foi utilizada neste trabalho para validar os dados experimentais da radiação solar através da metodologia dos mínimos quadrados (MMQ) [25].

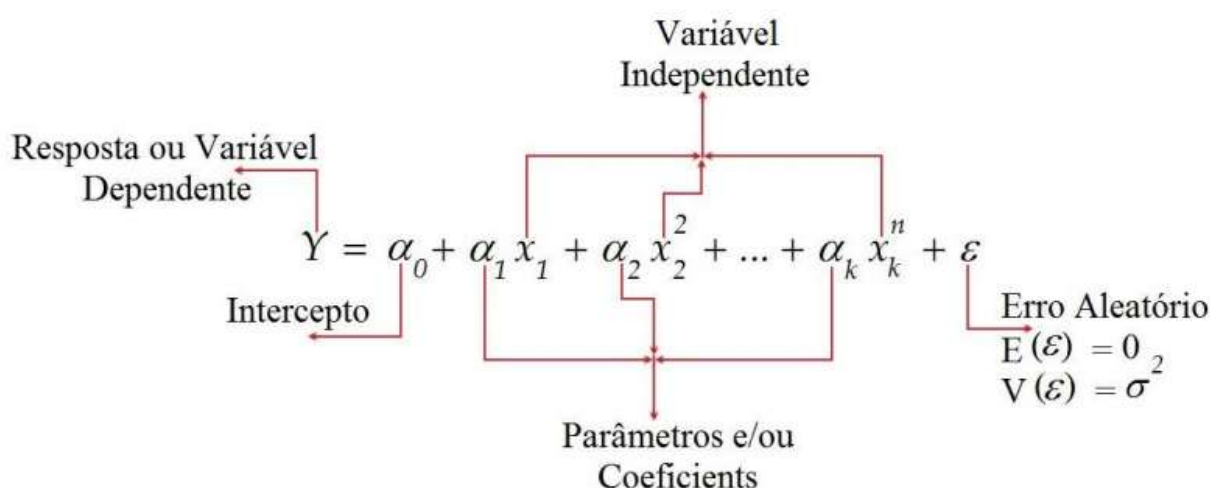


Figura 15. Modelo de regressão não linear.

3.4. PROBLEMA INVERSO LINEAR

Existem muitos métodos de otimização que foram propostos para resolver problemas inversos. Normalmente, os problemas inversos são divididos em três partes: dados experimentais, modelo proposto e parâmetros de estimação. A metodologia de estimação é baseada em minimização aplicando a norma dos mínimos quadrados e pode ser definida como função objetivo. Na abordagem inversa, a função objetivo é um critério para estimar o erro entre os valores calculados e experimentais, e também é usada para verificar se os parâmetros estimados estão próximos dos parâmetros reais. Na verdade, a minimização da função objetivo é buscar os parâmetros ótimos estimados, o que é um problema de estimação de parâmetros em matemática. Neste trabalho, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) tem sido aplicado para obter as equações normais aplicando a função objetivo para G_i como segue.

$$y_i \left[\alpha_0^{(k)}, \alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \dots, \alpha_m^{(k)} \right] = \sum_{i=1}^{n_p} \left[f_i(t_m)^{exp.} - y_i(t_m; p)^{mod.} \right]^2 = \sum_{i=1}^{n_p} \left[f_i(t_m)^{exp.} - \alpha_0^{(k)} g_1(t_i) - \alpha_1^{(k)} g_2(t_i) + \dots + \alpha_m^{(k)} g_m(t_m) \right]^2 \quad (3.3)$$

A partir da Equação (3.5) é possível encontrar as equações normais aplicando a Equação (3.6). A Equação (3.6) é um critério de mínimo do cálculo diferencial e integral e tem como base encontrar as equações normais a partir do MMQ [25].

3.5. MÉTRICAS ESTATÍSTICAS

O coeficiente de Person Rp: “O coeficiente de correlação de Pearson é um teste que mede a relação estatística entre duas variáveis contínuas. Se a associação entre os elementos não for linear, o coeficiente não será representado adequadamente” Bernardino [41]. Onde um valor de 0 indica que não há associação entre as duas variáveis. E um valor maior que 0 indica uma combinação positiva. Onde à medida que o valor de uma variável aumenta, a outra também aumenta. E Um valor menor que 0 indica uma associação negativa. Isto é, à medida que o valor de uma variável aumenta, o valor da outra diminui.

$$R_P = \frac{cov\left(y_i^{Exp.}, y_i^{Pred.}\right)}{\sigma_{y_i^{Exp.}} \sigma_{y_i^{Pred.}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_p} \left[y_i^{Exp.}(t_i) - \bar{y}^{Exp.}(t_i) \right] \left[y_i^{Pred.}(t_i) - \bar{y}^{Pred.}(t_i) \right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} \left[y_i^{Exp.}(t_i) - \bar{y}^{Exp.}(t_i) \right]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_p} \left[y_i^{Pred.}(t_i) - \bar{y}^{Pred.}(t_i) \right]^2}} \quad (3.4)$$

O coeficiente R^2 : também chamado de coeficiente de determinação, representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo. Ele é a soma dos quadrados dos erros (que é a variação que não é explicada pelo modelo) para a soma total dos quadrados (que é a variação total no modelo). É utilizado para determinar se o modelo ajusta bem os dados. Quanto mais alto o valor de R^2 melhor o modelo ajusta seus dados. O valor de R^2 varia entre 0 e 100%. Assim, quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo linear, ou seja, melhor serve para o estudo proposto.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_p} \left[y_i^{Exp.}(t_i) - y_i^{Pred.}\left(t_i, \hat{\alpha}_j^{(k)}\right) \right]^2}{\sum_{i=1}^{n_p} \left[y_i^{Exp.}(t_i) - \bar{y}^{Exp.} \right]^2} \quad (3.5)$$

Coeficiente (Raj)²: O R² ajustado é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo em relação ao número de observações. O R² ajustado é calculado como 1 menos a razão entre o quadrado médio do erro (QME) em relação ao quadrado médio total (QM total).

$$R_{Adj.}^2 = 1 - \frac{(N-1)}{N - (p+1)} (1 - R^2) \quad (3.6)$$

Onde: R² é o coeficiente ajustado, N é a dimensão total da amostra e p é o número de variável independente.

RQEQM (Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio): O erro (ε) é o aspecto mais importante do indicador, define a probabilidade de incerteza, quantificando a capacidade do indicador. Para encontrar o Erro Quadrático Médio, deve-se trabalhar com a soma de todos os resultados tidos como "erros" em relação à previsão inicial e, posteriormente, dividi-los pela quantidade de valores somados [42]. A Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio tem como principal objetivo encontrar a diferença média de um valor e o seu parâmetro inicial:

$$RQEQM = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{i=1}^{n_p} \left[y_i^{Exp.}(t_i) - y_i^{Pred.}(t_i, \hat{\alpha}_j^k) \right]^2} \quad (3.7)$$

3.6. TEMPERATURA NO VERSO DA CÉLULA

Tendo como fator importante na produção de energia a temperatura no verso da célula pode impactar positiva ou negativamente a eficiência do modulo fotovoltaico [42]. A previsão da geração solar será impactada se não for possível prever a temperatura dentro dos limites aceitáveis. Reforça-se que a temperatura dentro do módulo (T_{cell}) é maior que a temperatura no verso da célula (T_b), de forma que T_{cell} poderá ser definida em função de T_b. Essa temperatura maior depende principalmente dos materiais e do fluxo da radiação solar [44].

Um conjunto de três (3) correlações entre as grandezas radiação solar (G_i), temperatura ambiente (T_a) e velocidade do vento (V_w) encontram-se disponíveis na Tabela 1, organizadas em relação ao erro absoluto médio (EAM). Utilizou-se no trabalho a equação com menor EAM para determinar T_b.

Tabela 1. Correlação das equações de temperatura de T_b em função do EAM.

Correlação da temperatura no verso da célula	EAM (°C)	Equações	Fontes
$T_b = T_a + 0,0138G_i(1+0,031T_a)(1-0,042V_w)$	4,05	Equação (3.8)	[46]
$T_b = 1,4T_g + 0,01(G_i - 500) - V^{0,8}$	4,43	Equação (3.9)	[46]
$T_b = 0,899T_a + 0,025G_i - 1,30V_w + 3,12$	4,75	Equação (3.10)	[47]

3.7. TEMPERATURA DENTRO DA CÉLULA

Após definido a temperatura no verso da célula T_b , pode-se definir a temperatura dentro da Tcell visto a correlação entre ambas. Definir a Tcell de forma correta é fundamental para encontrar a eficiência e posteriormente capacidade de produção do módulo fotovoltaico.

A relação de T_{cell} com T_b pode ser expressa através das grandezas observadas anteriormente [48] como segue:

$$T_{cell}(t) = 1,08 T_a + 0,0226 G_i - 1,83 V_w + 4,22$$

(3.11)

Por outro lado, a relação de Tcell com T_b pode também ser expressa da seguinte forma [49] como segue:

$$T_{cell} = T_b + \frac{G_l}{G_{ref.}} \Delta T_{G_{ref.}}; 2^{\circ}C < \Delta T_{G_{ref.}} < 3^{\circ}C$$

(3.12)

3.8. EFICIÊNCIA DA CÉLULA

Tem-se como eficiência a capacidade de transformação da energia solar em energia elétrica através do efeito fotovoltaico [49]. A eficiência da célula (η_{cell}) pode ser considerada como uma função linear decrescente da temperatura da célula, definida conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde η_{ref} , é a eficiência de referência do módulo escolhido, β_{ref} é o parâmetro de referência do módulo escolhido, também denominado coeficiente de temperatura P_{max} (%°C) [50 - 51], T_{cell} é a temperatura da célula e T_{ref} a temperatura de referência.

$$\eta_{cell} = \eta_{ref}.[1 - \beta_{ref}.(T_{cell} - T_{ref})]$$

(3.13)

O módulo solar escolhido para o estudo foi o FU 300P da marca Sun Data [48], as especificações constam na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Especificações do módulo fotovoltaico FU 300P da marca Sun Data.

Potência do módulo (P_{max})	W	300
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	V	45,05
Corrente de curto circuito	A	8,74
Tensão de potência máxima (V_{mpp})	V	36,49
Corrente de potência máxima (I_{mpp})	A	8,23
Eficiência do módulo	%	15,48
Coeficiente de temperatura I_{sc}	% / °C	0,0474
Coeficiente de temperatura V_{oc}	% / °C	-0,285
Coeficiente de temperatura P_{max}	% / °C	-0,37
Temperatura normal do módulo (NMOT)	°C	45
Temperatura de funcionamento	°C	De -40 a + 85

- η_{ref} foi definida como 15,48%;
- β_{ref} foi definida como - 0,37;
- T_{ref} foi definida como 25°C.

Tabela 3. Características técnicas módulo fotovoltaico FU 300P da Sun Data.

Dimensões	1957 x 990 x 40 mm
Peso	22,5 kg
Vidro	Temperado transparente com espessura de 3,2 mm
Camada de encapsulação	EVA (acetado-vinilo de etileno)
Células	72 células em silício policristalino, dimensões 156,75x156,75 mm
Chapa posterior	Multi-camadas em poliéster
Armação	Perfil em alumínio anodizado com furos de drenagem
Caixa de junção	De acordo com certificado IEC 62790, homologação IP 68
Cabos e conectores	Comprimento de 900 mm com conectores MC4 compatíveis
Máxima corrente inversa (I_r)	20 A
Tensão máxima do sistema	1000 V (1500 V a pedido)
Cargas max (vento/neve)	5400 Pa (incluindo o fator de segurança de 1,5x)
Classe de proteção	II – Em conformidade com as normas IEC 61730

3.9. POTÊNCIA DE SAÍDA DA CÉLULA

Devido a vários fatores tais como T_{cell} , época do ano, velocidade do vento, temperatura do ambiente, posição geográfica determinar com precisão a produção de energia da célula fotovoltaica é complicado. Inclusive a η^{cell} tende a diminuir com o aumento da T_{cell} [52-54], influenciado diretamente na potência de saída (P_{cell}).

Utilizando o método da Potência Total de Energia Contínua (PTEC), integrando a geração instantânea ao longo do tempo pela área do módulo, consegue-se estimar a produção de energia.

$$P_{cell,i} = A_{cell} \eta_{cell,i} G_i \quad (3.14)$$

$$Q_{pv,i} = A_{pv} G_i \eta_{eff,i} 30 \quad (3.15)$$

3.10. ANÁLISE DE INCERTEZA

Associado geralmente ao conceito de média, desvio padrão e desvio padrão da média, o intervalo de aceitação de um conjunto de valores pode ser obtido de forma simples encontrando a média aritmética, onde a soma dos valores são divididos pela quantidade de valores observados. Neste contexto, média aritmética é um parâmetro para demonstrar quantitativamente o quanto os valores estão espalhados em torno da média.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.16)$$

Porém para experimentos precisos, necessita-se que as medições e valores experimentais estejam próximas ao valor médio. Utiliza-se então uma medida quantitativa de dispersão, o desvio padrão da amostra (σ_A). Quanto maior σ_A , maior é a dispersão de dados em torno da média.

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (3.17)$$

Tratando de incerteza de um conjunto realizado em condições idênticas, além do desvio padrão da amostra, também tem o desvio padrão da média (σ_m), onde um conjunto de medidas tem peso. Quanto maior σ_m , menor é σ_A .

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N-1)}} = \frac{\sigma_A}{\sqrt{N}} \quad (3.18)$$

Outro parâmetro importante para indicar a margem de incerteza é o intervalo de confiança (IC), que é calculado pelo nível de confiança, os mais usados são 90%(t_{90%}), 95%(t_{95%}) e 99%(t_{99%}). Durante o estudo em questão, o intervalo de confiança utilizado foi 95%.

- - Limite de confiança de 90%;

$$IC = \bar{x} \pm t_{90\%} \frac{\sigma_m}{\sqrt{N}}; t_{90\%} = 1,64 \quad (3.19)$$

- Limite de confiança de 95%;

$$IC = \bar{x} \pm t_{95\%} \frac{\sigma_m}{\sqrt{N}}; t_{95\%} = 1,96 \quad (3.20)$$

- - Limite de confiança de 99%;

$$IC = \bar{x} \pm t_{99\%} \frac{\sigma_m}{\sqrt{N}}; t_{99\%} = 2,56 \quad (3.21)$$

CAPÍTULO 4

4.1. CIDADES ESCOLHIDAS

Decidiu-se escolher duas cidades entre as cinco com maiores PIB da região nordeste segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) 2021 [55] no período de 01/01/2021 – 31/12/2021 (ver Tabela 4).

Tabela 4.1. Cidades com maiores PIB do Nordeste.

Cidade	PIB	PIB Per Capita
Fortaleza/CE	R\$ 67.413 mi	R\$ 25.254,44
Salvador/BA	R\$ 63.804 mi	R\$ 22.213,24
Recife/PE	R\$ 54.691 mi	R\$ 33.232,26
São Luís/MA	R\$ 32.104 mi	R\$ 29.135,32
Natal/RN	R\$ 24.856 mi	R\$ 28.113,21

As cidades Fortaleza, Recife e São Luís tiveram dados perdidos ou não coletados devido a panes sistemáticas em suas estações, dessa forma escolheu-se as cidades Salvador – BA e Natal – RN por terem todos os dados disponíveis nas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram obtidos pelas estações meteorológicas: Salvador A401 e Natal A304 [56].

Os dados foram organizados e categorizados respectivamente pelo seu mês e seus horários indicados. Foram calculadas as médias dos horários de cada medição aferida pela estação das 5:00 até as 18:00 horas para radiação. A unidade de medida da radiação disponibilizada pela INMET está em kJ/m^2 , porém a unidade deve ser usada de acordo com o Sistema Internacional de Unidade (SI), que é em W/m^2 , então foi realizada a conversão, dividindo por 3,6.

Após a tratativa dos dados, retirada dos que não seriam utilizados e dos meses prejudicados pelas panes das estações, as tabelas abaixo foram criadas com os dados observados pelo estudo: radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Para Salvador (Tabela , Tabela e Tabela) e para Natal (Tabela , Tabela e Tabela).

Tabela 4.2. Radiação (W/m^2) - Salvador – BA.

Radiação (W/m^2)													
Tempo	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Médias
05:00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
06:00	11,69	5,26	3,18	2,44	1,15	0,08	0,06	0,86	6,23	20,21	24,07	20,81	8,00
07:00	73,37	56,01	47,49	50,51	41,15	30,23	26,02	46,85	61,93	89,66	87,58	88,69	58,29
08:00	275,28	255,13	189,32	178,39	155,86	115,61	103,46	171,10	220,83	331,39	278,55	264,44	211,61
09:00	483,57	480,89	481,64	345,30	352,62	288,58	277,82	397,87	438,24	504,53	392,50	389,71	402,77
10:00	578,95	616,87	667,07	509,67	485,48	422,42	425,18	547,07	574,47	657,80	514,20	503,70	541,91
11:00	710,38	708,19	790,36	568,27	563,19	503,49	510,43	698,70	679,22	720,77	608,83	543,62	633,79
12:00	873,10	779,60	880,53	593,65	616,60	564,74	536,76	760,90	698,70	769,45	687,52	674,14	702,97
13:00	909,72	810,63	882,85	583,75	609,96	539,83	503,29	679,19	653,43	766,15	656,60	659,78	687,93
14:00	804,52	737,87	767,08	523,23	484,11	491,83	454,79	567,52	622,89	655,32	588,15	581,08	606,53
15:00	644,40	604,66	629,62	422,73	394,97	351,82	353,54	490,01	533,44	568,04	459,78	461,25	492,85
16:00	495,98	468,82	447,34	287,78	251,81	228,06	220,37	325,21	362,17	377,75	329,19	333,72	344,02
17:00	255,04	217,04	190,51	104,39	68,43	67,11	64,86	119,97	108,86	85,68	108,02	153,66	128,63
18:00	38,11	34,76	16,95	4,73	1,37	1,20	2,73	5,17	5,82	7,12	11,37	24,89	12,85
Médias	439,58	412,55	428,14	298,20	287,62	257,50	248,52	343,60	354,73	396,70	339,03	335,68	345,16

Tabela 4.3. Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$) - Salvador – BA.

Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)													
Tempo	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Médias
05:00	24,93	25,22	25,05	25,06	24,07	23,81	23,00	22,49	23,40	24,46	24,32	24,74	24,21
06:00	24,76	25,09	24,87	24,97	24,06	23,59	22,95	22,47	23,31	24,51	24,61	24,87	24,17
07:00	25,74	25,89	25,71	25,37	24,47	23,89	22,96	22,90	24,27	25,78	25,73	25,71	24,87
08:00	27,42	27,66	27,77	26,55	25,80	24,88	23,81	23,95	25,81	27,38	26,80	26,95	26,23
09:00	28,47	28,95	28,83	27,33	26,45	25,62	24,80	24,97	26,93	28,35	27,57	27,67	27,16
10:00	29,03	29,80	29,42	28,20	27,06	26,25	25,44	25,58	27,53	28,98	28,19	28,50	27,83
11:00	29,25	30,02	29,96	28,69	27,42	26,44	25,98	26,13	27,79	29,31	28,43	28,73	28,18
12:00	30,01	30,45	30,32	28,58	27,67	26,70	26,05	26,51	27,97	29,31	28,73	28,98	28,44
13:00	30,41	30,75	30,71	28,69	27,84	26,92	25,91	26,60	28,18	29,64	29,01	29,10	28,65
14:00	30,45	30,68	30,79	28,62	27,52	26,86	25,74	26,39	28,21	29,63	29,10	29,06	28,59
15:00	30,00	30,43	30,43	28,23	27,37	26,54	25,47	26,09	27,90	29,31	28,79	28,81	28,28
16:00	29,42	29,71	29,93	27,85	26,81	26,06	24,91	25,47	27,34	28,56	28,21	28,46	27,73
17:00	28,64	28,86	28,79	27,19	26,14	25,15	24,24	24,55	26,25	27,53	27,47	27,74	26,88
18:00	27,12	27,48	27,42	26,13	25,27	24,42	23,51	23,44	25,10	26,23	26,48	26,78	25,78
Médias	28,26	28,64	28,57	27,25	26,28	25,51	24,63	24,82	26,43	27,78	27,39	27,58	26,93

Tabela 4.4. Velocidade do vento (m/s) - Salvador – BA.

Velocidade do vento (m/s)													
Tempo	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Médias
05:00	0,85	0,69	0,73	0,88	1,23	1,13	1,64	1,25	0,88	0,87	0,97	0,83	1,00
06:00	0,77	0,72	0,70	0,87	1,28	1,13	1,50	1,35	0,93	0,88	0,99	0,86	1,00
07:00	1,05	0,95	0,83	0,88	1,25	1,34	1,36	1,40	1,01	1,18	1,07	1,13	1,12
08:00	1,22	1,15	1,09	1,16	1,45	1,28	1,59	1,47	1,21	1,30	1,29	1,33	1,30
09:00	1,18	1,23	1,30	1,28	1,61	1,43	1,59	1,59	1,31	1,37	1,37	1,41	1,39
10:00	1,31	1,36	1,44	1,51	1,63	1,49	1,79	1,63	1,36	1,51	1,36	1,25	1,47
11:00	1,37	1,32	1,52	1,44	1,80	1,73	1,94	1,81	1,58	1,58	1,60	1,38	1,59
12:00	1,54	1,39	1,48	1,64	1,81	1,71	1,90	1,81	1,58	1,62	1,61	1,43	1,63
13:00	1,59	1,55	1,53	1,63	1,94	1,83	2,03	1,76	1,56	1,65	1,48	1,53	1,67
14:00	1,55	1,56	1,44	1,60	1,71	1,76	1,90	1,71	1,57	1,63	1,49	1,47	1,62
15:00	1,53	1,60	1,46	1,29	1,94	1,68	1,91	1,68	1,56	1,67	1,52	1,58	1,62
16:00	1,55	1,71	1,40	1,34	1,72	1,50	1,88	1,68	1,53	1,52	1,56	1,56	1,58
17:00	1,50	1,59	1,36	1,24	1,50	1,28	1,74	1,48	1,46	1,50	1,51	1,59	1,48
18:00	1,31	1,57	1,25	1,17	1,48	1,26	1,73	1,45	1,37	1,40	1,54	1,51	1,42
Médias	1,31	1,31	1,25	1,28	1,60	1,47	1,75	1,58	1,35	1,41	1,38	1,35	1,42

Tabela 4.5. Radiação (W/m²) – Natal – RN.

Radiação (W/m²)													
Tempo	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Médias
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	0,60	0,00	0,00	0,69	0,00	0,00	0,00	3,39	19,33	65,91	69,36	30,67	15,83
07:00	144,53	114,88	138,53	149,80	142,48	137,40	94,05	157,32	181,38	264,46	273,95	228,82	168,97
08:00	367,77	343,03	330,57	357,56	336,32	364,41	264,72	343,01	384,85	471,65	495,38	414,21	372,79
09:00	580,71	542,30	518,08	575,87	480,87	523,19	440,50	520,07	631,04	675,97	707,15	607,94	566,97
10:00	755,20	691,67	726,72	719,54	595,37	616,05	570,27	657,98	790,24	850,57	852,03	748,93	714,55
11:00	837,40	852,99	872,42	814,01	721,15	735,80	725,80	748,37	893,12	955,46	918,66	830,31	825,46
12:00	869,34	928,09	956,08	873,12	779,86	762,28	771,14	788,97	922,55	972,58	896,79	861,89	865,22
13:00	859,71	917,95	873,27	824,94	722,72	717,94	699,22	732,60	832,03	877,14	831,34	796,53	807,12
14:00	678,58	802,24	755,49	673,59	612,31	612,44	609,36	643,18	689,68	729,33	684,65	700,62	682,62
15:00	551,39	616,48	568,14	503,14	452,07	476,45	468,54	487,97	497,44	539,16	497,92	523,48	515,18
16:00	389,90	402,93	361,54	239,57	157,48	188,37	199,95	227,71	253,45	297,30	286,56	308,26	276,09
17:00	174,03	179,77	124,73	71,94	44,44	57,41	60,09	69,94	71,21	87,53	49,54	9,68	83,36
18:00	25,60	21,45	12,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,94
Médias	445,34	458,13	445,56	414,56	360,36	370,84	350,26	384,32	440,45	484,79	468,81	432,95	421,36

Tabela 4.6. Temperatura Ambiente (°C) – Natal – RN.

Temperatura ambiente (°C)													
Tempo	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Médias
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	0,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,00	22,89	21,81	12,51	5,34
07:00	24,60	17,98	24,78	24,55	22,70	24,33	19,08	23,16	24,79	27,34	28,23	28,42	24,16
08:00	28,24	27,77	27,58	26,87	24,41	26,22	25,04	25,47	27,05	28,43	29,29	29,25	27,13
09:00	29,15	29,48	28,73	28,22	26,30	27,68	26,57	26,82	28,18	29,23	29,92	30,03	28,36
10:00	29,87	30,17	29,47	29,69	28,02	28,76	27,70	27,73	28,76	29,80	30,48	30,62	29,26
11:00	30,25	30,74	30,00	30,00	29,34	29,20	28,45	28,26	29,17	30,15	30,73	30,93	29,77
12:00	30,40	30,96	30,40	30,18	29,46	29,48	28,68	28,55	29,33	30,25	30,76	31,12	29,96
13:00	30,51	31,19	30,37	30,28	29,61	29,32	28,70	28,40	29,27	30,24	30,71	31,09	29,97
14:00	30,22	31,01	30,20	30,10	29,31	29,11	28,41	28,28	29,07	29,96	30,37	30,82	29,74
15:00	29,70	30,61	29,89	29,73	29,07	28,75	28,10	27,97	28,72	29,62	29,92	30,49	29,38
16:00	29,28	30,01	29,39	29,25	27,47	28,19	26,77	27,40	28,19	28,94	29,34	29,80	28,67
17:00	28,70	29,10	28,58	28,69	21,79	23,09	23,68	26,82	25,67	27,16	15,20	2,80	23,44
18:00	27,84	22,16	22,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,05
Médias	24,97	24,37	24,43	22,68	21,25	21,72	20,80	21,35	22,44	24,57	24,05	22,71	22,95

Tabela 4.7. Velocidade do vento (m/s) – Natal – RN.

Velocidade do vento (m/s)													
Tempo	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maior	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Médias
05:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00	0,11	0,00	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,35	1,32	2,95	2,65	1,74	0,77
07:00	3,34	2,54	2,50	2,22	2,53	3,11	2,59	3,46	3,59	3,73	3,93	3,90	3,12
08:00	4,25	3,79	3,27	3,00	3,21	3,54	3,33	4,35	4,74	4,52	4,26	4,45	3,89
09:00	4,63	4,17	3,96	3,70	3,87	4,39	4,22	5,22	5,47	4,84	4,51	4,50	4,46
10:00	4,75	4,38	4,12	4,16	4,69	4,78	4,88	5,69	5,78	5,08	4,54	4,66	4,79
11:00	4,84	4,51	4,48	4,48	4,68	5,05	5,45	5,78	5,98	5,17	4,67	4,76	4,99
12:00	5,02	4,60	4,66	4,65	5,21	5,11	5,63	6,32	6,10	5,34	4,66	4,78	5,17
13:00	4,98	4,69	4,71	4,70	5,01	5,08	5,59	6,36	6,06	5,49	4,69	4,72	5,17
14:00	5,05	4,70	4,55	4,68	4,96	5,03	5,43	6,34	6,17	5,37	4,73	4,84	5,15
15:00	4,96	4,56	4,56	4,50	4,90	5,15	5,51	6,12	5,83	5,21	4,46	4,65	5,03
16:00	4,71	4,52	4,40	4,16	4,33	4,89	5,09	5,81	5,50	4,87	4,15	4,44	4,74
17:00	4,45	4,18	4,03	3,87	3,32	3,78	4,16	5,34	4,47	4,38	2,32	0,45	3,73
18:00	4,17	3,10	3,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,87
Médias	3,95	3,55	3,46	3,16	3,34	3,56	3,70	4,37	4,36	4,07	3,54	3,42	3,71

4.2. SALVADOR - BA

A Figura 16 contém a irradiação solar média, a Figura 17 a temperatura média e a Figura 18 a velocidade do vento para a cidade Salvador – BA no período de 01 de janeiro de 2021 a 31 de dezembro de 2021. Teve-se êxito na aquisição dos dados pois durante o ano de 2021 não houve pane nas estações meteorológicas da cidade. Pode-se observar uma diminuição entre abril e julho, caracterizada pelo inverno na região nordeste e uma grande radiação entre os meses de janeiro a março, representado pelo verão. Posteriormente iremos verificar que esses meses também detém as maiores temperaturas médias. Ao longo do ano pesquisado a cidade demonstrou uma boa irradiação

solar média no comparativo inclusive com outras cidades do nordeste como: Recife-PE, São Luís-MA e João Pessoa-PB.

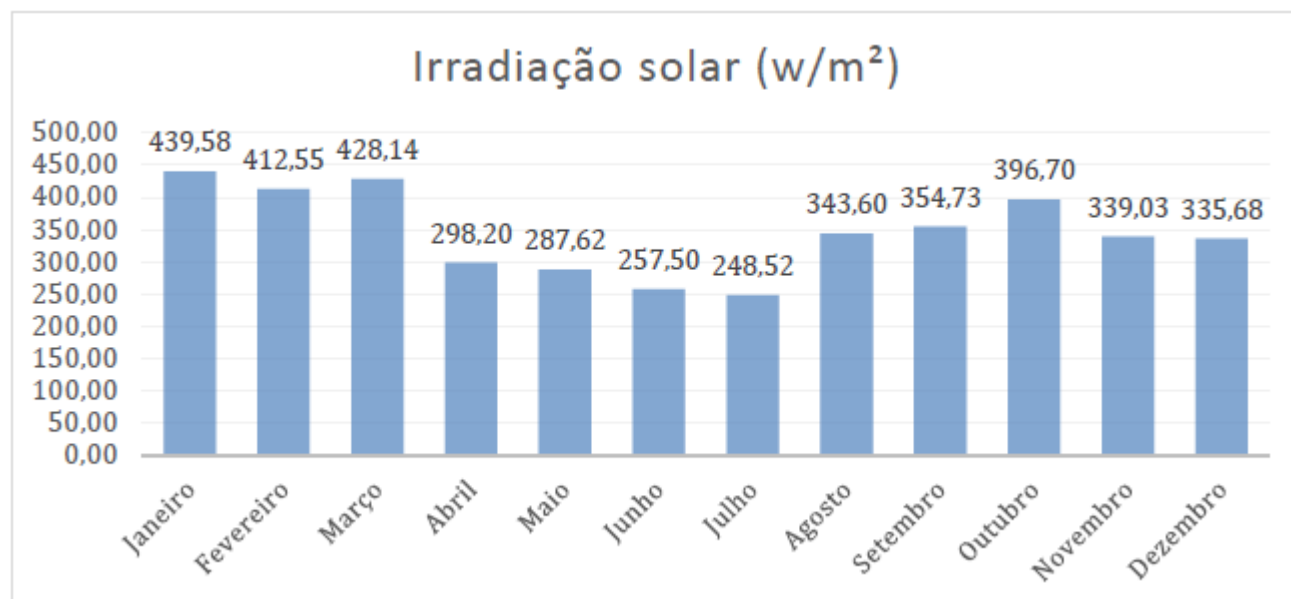


Figura 16: Irradiação solar Salvador - BA 2021.

Se for separar a irradiação solar por estações meteorológicas, percebe-se que as estações que mais têm radiação solar são: verão (entre o final dezembro e o final de março), primavera (setembro até dezembro), diminuindo no outono (entre março e junho), acentuando a queda no início do inverno, mas recuperando a média já em agosto.

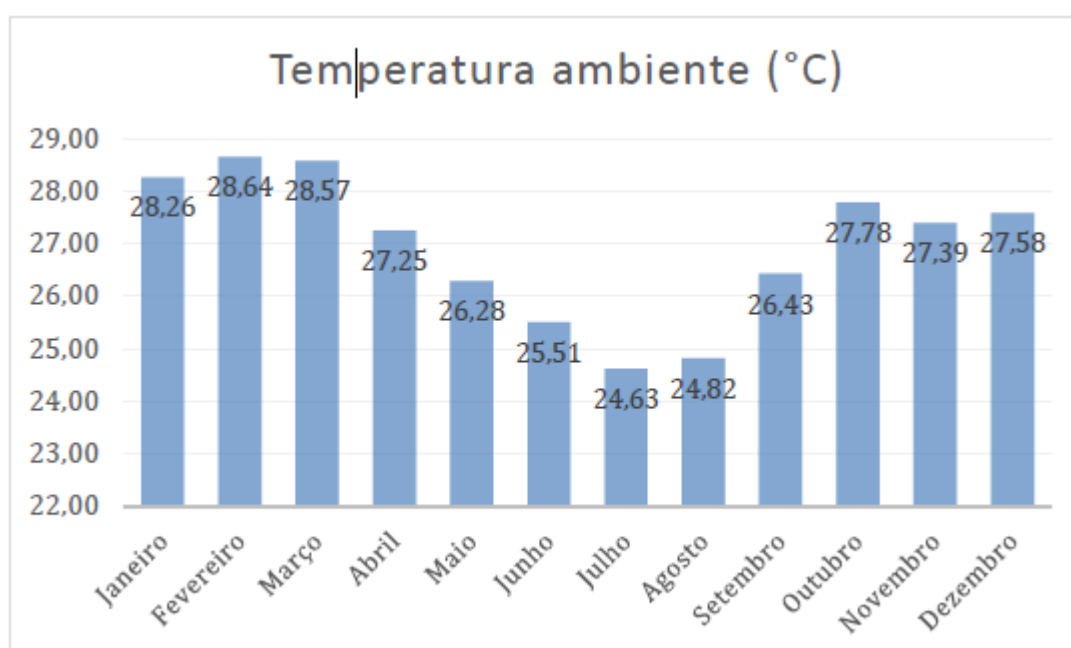


Figura 17. Temperatura ambiente Salvador – BA.

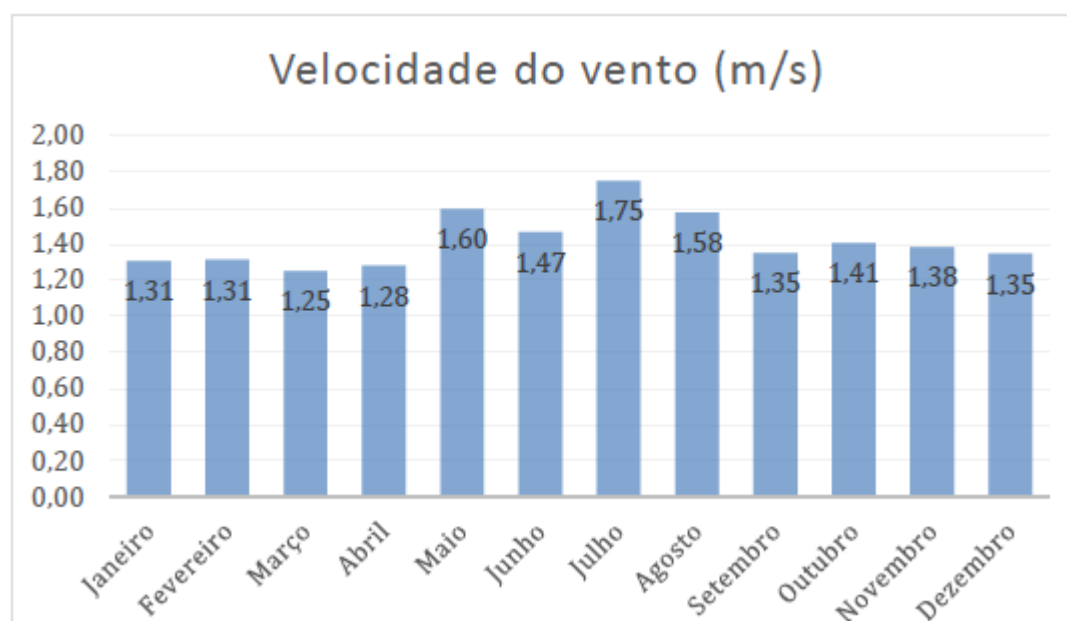


Figura 18. Velocidade do vento Salvador – BA.

O princípio de funcionamento da energia solar fotovoltaica utiliza módulos fotovoltaicos fabricados com materiais semicondutores como o silício, conseguindo por esse material a conversão da energia solar em elétrica.

Os módulos fotovoltaicos são susceptíveis a três grandezas: irradiação solar do ambiente, temperatura ambiente e velocidade do vento. Afetando assim suas propriedades elétricas como capacidade de geração, eficiência etc.

4.2.1. SALVADOR - BA

A radiação solar tem um papel importante, essa radiação emitida por diferentes camadas da atmosfera solar afeta a atmosfera superior e o clima da Terra. É a base da energia solar, com ela é possível basear informações de produção de energia através do método fotovoltaico com placas solares. Vale salientar que as horas observadas do dia foram reduzidas para o intervalo das 06h às 18h, pois é o horário com maior concentração de irradiação solar. Foram criados os gráficos contendo a radiação solar média por trimestre em relação ao tempo (Figura 19, Figura 20, Figura 21 e Figura 22).

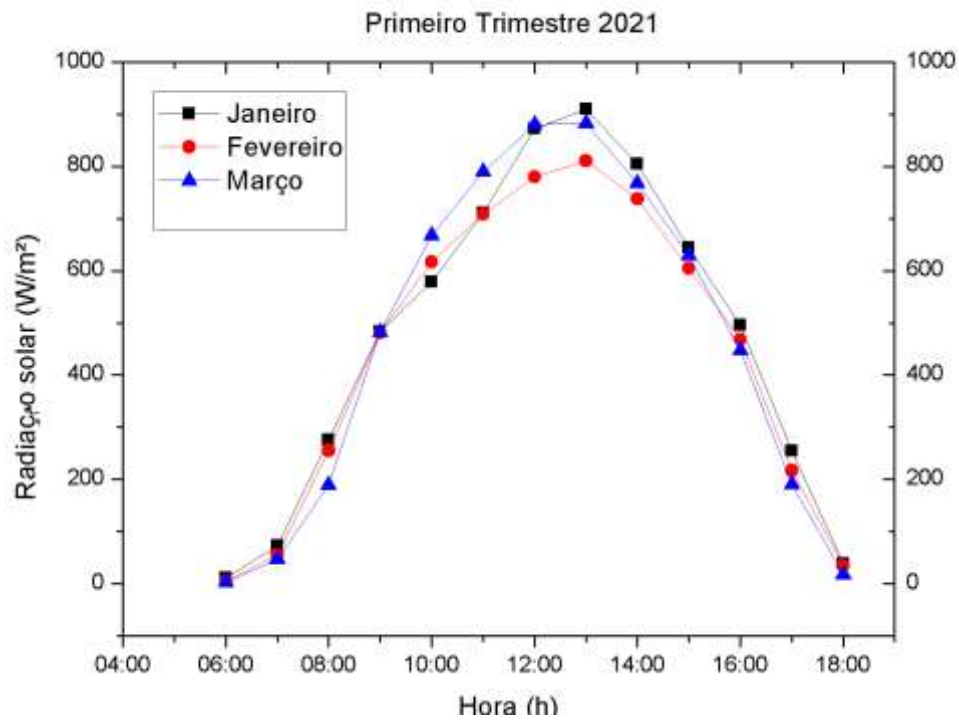


Figura 19. Radiação solar primeiro trimestre Salvador.

No primeiro trimestre observa-se o pico de irradiação solar entre 12h e 13h com o mês de janeiro com a maior irradiação, porém a média entre eles está bem próxima ao longo do dia.

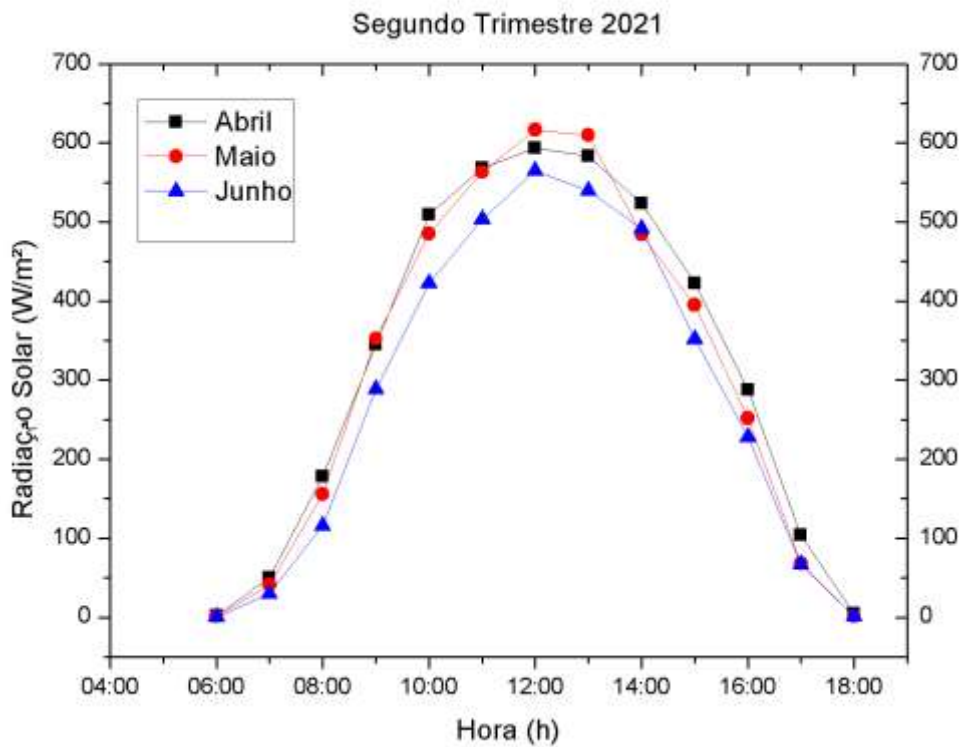


Figura 20. Radiação solar segundo trimestre Salvador.

No segundo trimestre o mês com maior irradiação no período observado foi maio, porém como pode-se notar através da Tabela (é demonstrado as métricas estatísticas para o primeiro semestre do ano observado), o segundo trimestre tem uma irradiação solar média menor no comparativo com o primeiro semestre.

Tabela 4.8. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do primeiro semestre de 2021 para Salvador.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Radiação Média (W/m²) =	267,63	370,03	382,01
Desvio Padrão =	209,1	276,86	269,19
Desvio Padrão da Média =	57,99	76,78	74,66
Intervalo de Confiança (IC) =	267,63±57,99	379,03±76,78	382,01±74,66
Radiação Total (W/m²) =	3479,31	4810,42	4966,23
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Radiação Média (W/m²) =	427,22	365,1	361,49
Desvio Padrão =	293,47	245,51	233,85
Desvio Padrão da Média =	81,39	68,09	64,85
Intervalo de Confiança (IC) =	427,22±81,39	365,1±68,09	361,49±64,85
Radiação Total (W/m²) =	5553,87	4746,36	4699,49

O mês de janeiro obteve o melhor resultado, uma radiação média maior ($473,39 \text{ W/m}^2$), consequentemente uma radiação total ($6154,11 \text{ W/m}^2$) porém o mês de março obteve o maior desvio padrão ($335,70 \text{ W/m}^2$) e este dado significa uma maior dispersão em torno da média. Observando apenas o segundo trimestre o mês de maio demonstra a maior radiação média ($321,14 \text{ W/m}^2$). 4.2.2.

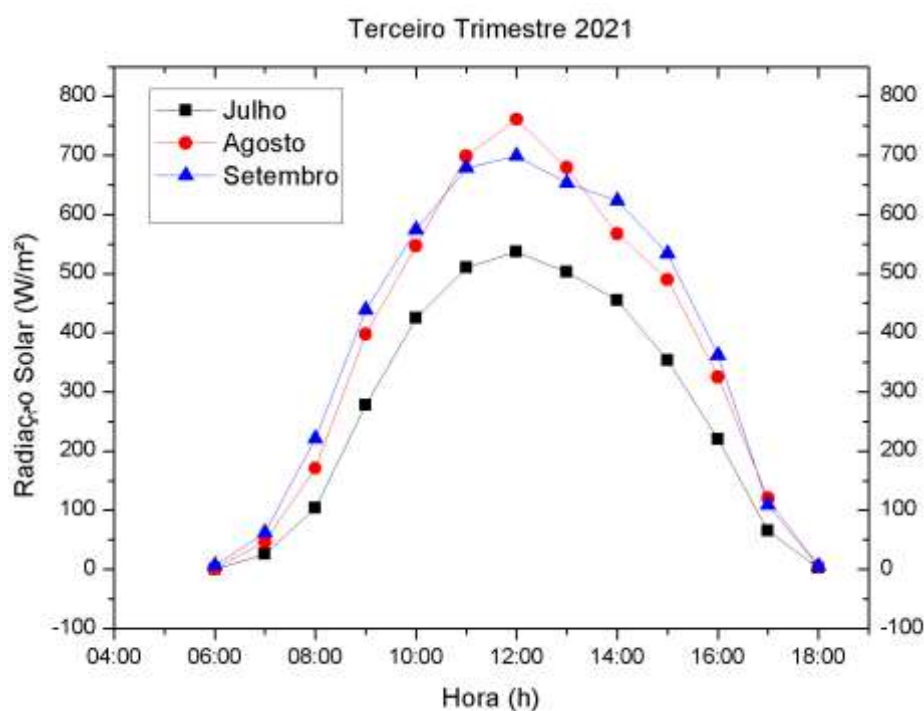


Figura 21. Radiação solar terceiro trimestre Salvador.

Tem-se na Figura 21 o gráfico da relação tempo-radiação solar do terceiro trimestre para a cidade de Salvador. Nota-se que o pico de irradiação solar dos três meses concentra-se no intervalo entre 10 e 13 horas. Sendo assim o período com maior produção de energia solar através do método fotovoltaico. Observar-se que os meses de setembro e agosto tiveram uma irradiação solar acima de julho. Mesmo que o pico de irradiação em agosto tenha sido maior que o mês de setembro, no somatório o gráfico demonstra que a irradiação solar média e consequentemente a total em setembro foi maior (Tabela).

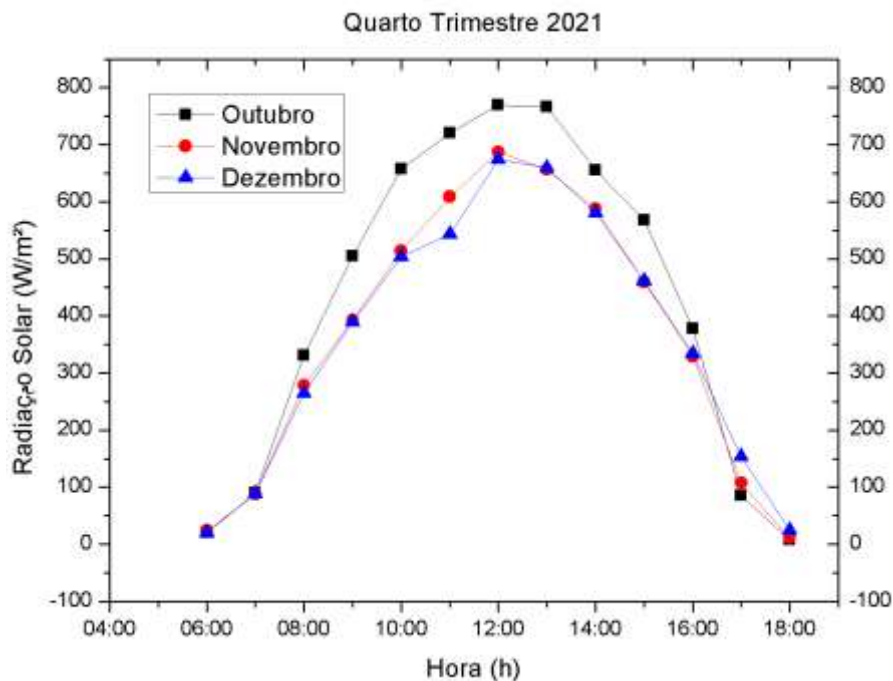


Figura 22. Radiação solar quarto trimestre Salvador.

Para o quarto trimestre de 2021 nota-se um aumento na irradiação solar média, se equiparando ao melhor trimestre até o momento (primeiro trimestre). Com o mês de outubro ($427,22\text{W/m}^2$) com maior radiação média e total (Tabela). E através da Figura 22 consegue-se demonstrar tal irradiação média ao longo de um dia.

Tabela 4.9. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do segundo semestre de 2021 para Salvador.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Radiação Média (W/m^2) =	267,63	370,03	382,01
Desvio Padrão =	209,1	276,86	269,19
Desvio Padrão da Média =	57,99	76,78	74,66
Intervalo de Confiança (IC) =	$267,63 \pm 57,99$	$379,03 \pm 76,78$	$382,01 \pm 74,66$
Radiação Total (W/m^2) =	3479,31	4810,42	4966,23
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Radiação Média (W/m^2) =	427,22	365,1	361,49
Desvio Padrão =	293,47	245,51	233,85
Desvio Padrão da Média =	81,39	68,09	64,85
Intervalo de Confiança (IC) =	$427,22 \pm 81,39$	$365,1 \pm 68,09$	$361,49 \pm 64,85$
Radiação Total (W/m^2) =	5553,87	4746,36	4699,49

Demonstra-se com a Tabela que outubro demonstrou a maior radiação solar média (427,22W/m²) e a maior radiação total (5553,87W/m²). Também para outubro têm-se o maior desvio padrão demonstrando uma alta dispersão ao longo da média. Analisando todo o ano, outubro fica com o quarto lugar, sendo o primeiro trimestre aquele com maior irradiação solar média e total conforme demonstrado anteriormente na Tabela .

4.2.2 DADOS MEDIDOS TEMPERATURA AMBIENTE

A temperatura ambiente, assim como a irradiação solar, é um fator que corrobora com a produção de energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos. A temperatura de operação de uma placa solar é definida como uma função da temperatura ambiente, radiação solar incidente, velocidade dos ventos e a composição química dos módulos.

As Figuras 23-26 demonstram a temperatura ambiente média em relação a hora no intervalo entre 06 e 18 horas para a cidade de Salvador em 2021 dividido por trimestre. Na análise da irradiação solar percebeu-se que no intervalo entre 11 e 13h tinham-se o pico, na temperatura ambiente o pico acontece um pouco depois, entre 12 e 14h.

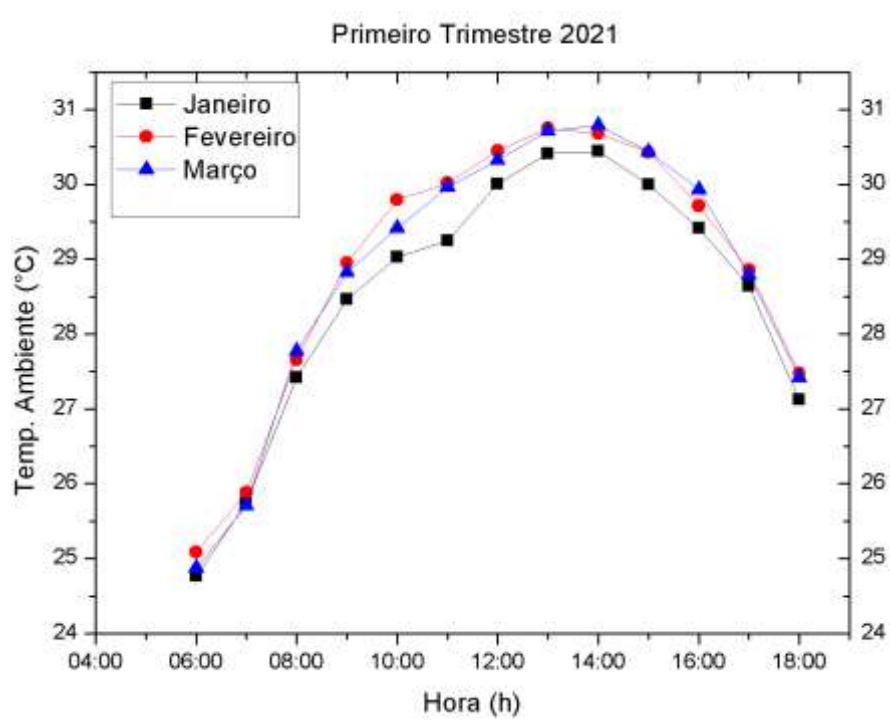


Figura 23. Temperatura ambiente primeiro trimestre Salvador.

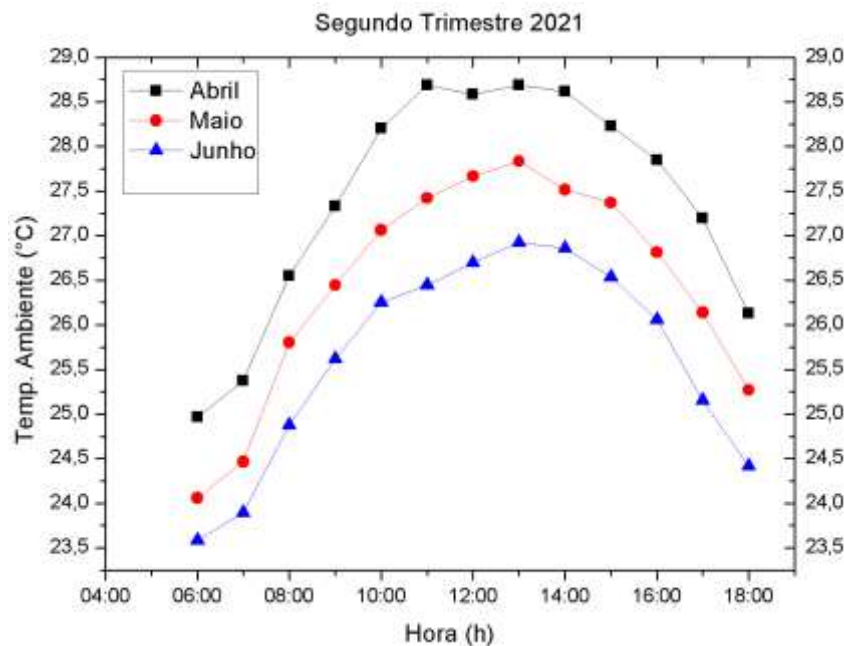


Figura 24. Temperatura ambiente segundo trimestre Salvador.

Através da Figura 23 é possível constatar que no primeiro trimestre os meses de fevereiro e março são responsáveis pelos maiores valores de temperatura ambiente média, demonstrada na Tabela 5. No segundo trimestre (Figura 24) nota-se temperaturas mais baixas, com junho com uma temperatura média ambiente chegando a 25,64°C.

Tabela 5. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o primeiro semestre de 2021 para Salvador.

1º Trimestre	Janeiro	Fevereiro	Março
Temp. Ambiente Média (°C) =	28,51	28,90	28,84
Desvio Padrão =	1,78	1,85	1,90
Desvio Padrão da Média =	0,49	0,51	0,52
Intervalo de Confiança (IC) =	28,51±0,49	28,9±0,51	28,84±0,52
2º Trimestre	Abril	Maio	Junho
Temp. Ambiente Média (°C) =	27,41	26,45	25,64
Desvio Padrão =	1,29	1,23	1,14
Desvio Padrão da Média =	0,35	0,34	0,31
Intervalo de Confiança (IC) =	27,41±0,35	26,45±0,34	25,64±0,31

Outro ponto a se observar é que o primeiro trimestre contém as maiores temperaturas e maiores desvios padrão quando comparado com o segundo trimestre. Tendo como fevereiro a maior

temperatura ambiente média 28,90°C e março o maior desvio padrão 1,90 °C, demonstrando em março uma maior dispersão em torno da média.

Quando observado o terceiro trimestre (Figura 25) nota-se que a temperatura média ambiente em setembro é maior em relação a julho e agosto, podendo ser inclusive relacionado com o fim do período chuvoso, consequentemente com o retorno dos meses com maior produção de energia solar.

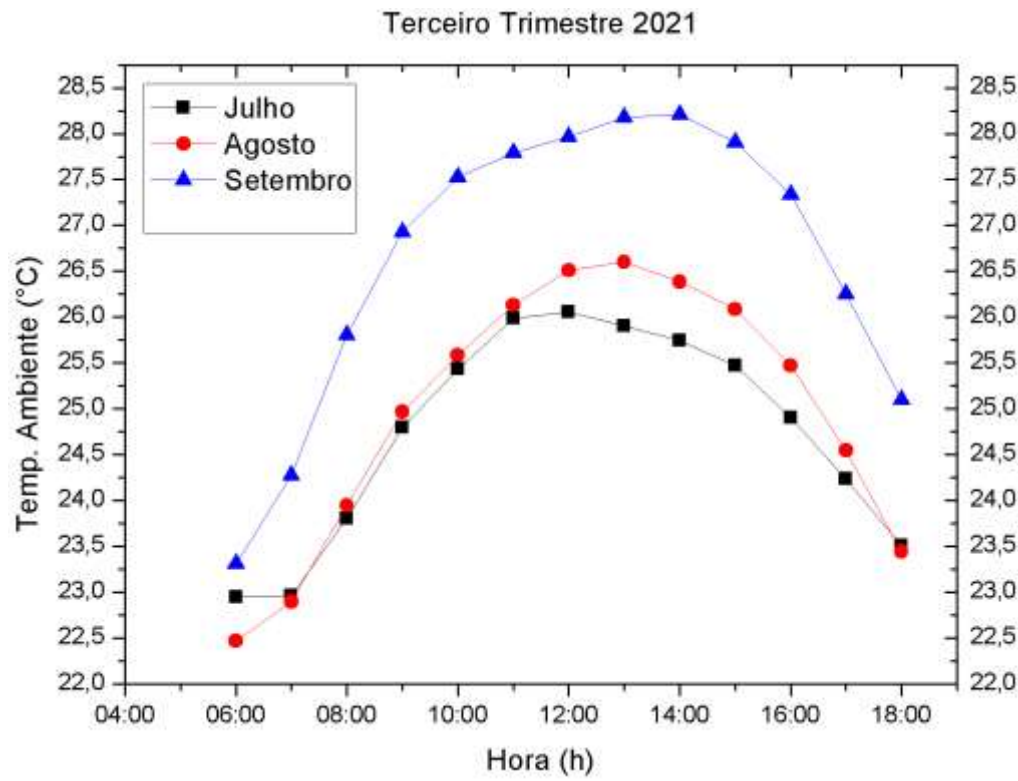


Figura 25. Temperatura ambiente terceiro trimestre Salvador.

Já no quarto trimestre (Figura 26) os três meses têm temperaturas ambiente média próximas conforme demonstrado na Tabela .

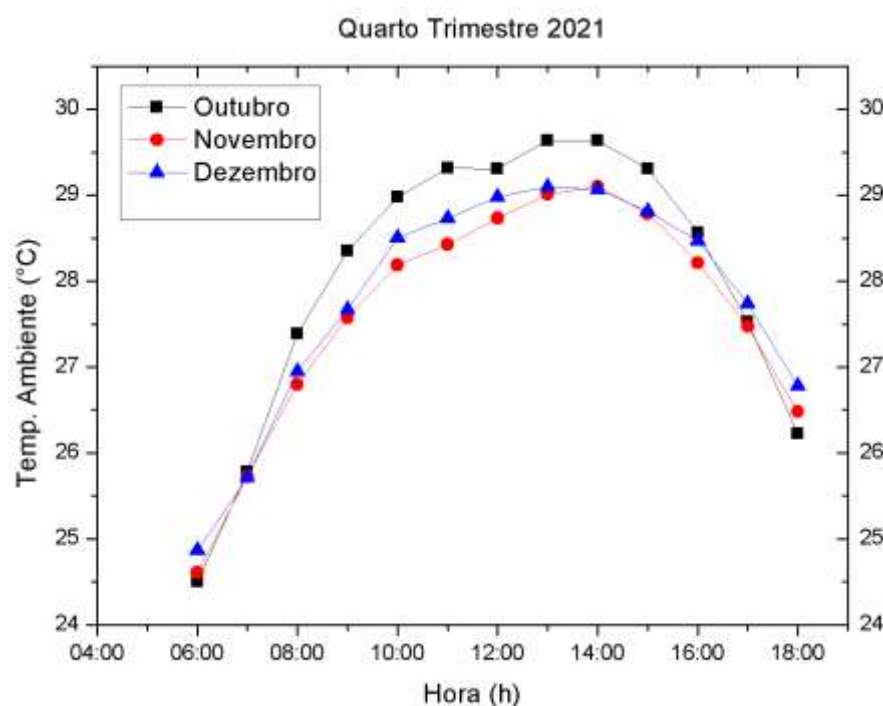


Figura 26. Temperatura ambiente quarto trimestre Salvador.

Tabela 4.11. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o segundo semestre de 2021 para Salvador.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Temp. Ambiente Média (°C) =	24,75	25,00	26,66
Desvio Padrão =	1,14	1,42	1,60
Desvio Padrão da Média =	0,31	0,39	0,44
Intervalo de Confiança (IC) =	24,75±0,31	25±0,39	26,66±0,44
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Temp. Ambiente Média (°C) =	28,04	27,62	27,79
Desvio Padrão =	1,65	1,37	1,36
Desvio Padrão da Média =	0,45	0,38	0,37
Intervalo de Confiança (IC) =	28,04±0,45	27,62±0,38	27,79±0,37

No segundo semestre outubro apresenta maior temperatura ambiente média, 28,04°C e maior desvio padrão, 1,65°C, indicando maior dispersão da temperatura da média quando comparado com os demais meses do segundo semestre. Observando os dados da Tabela fica claro que a temperatura ambiente média de todos os meses do quarto trimestre é maior quando comparado com o terceiro. Quando se comparou o terceiro e o quarto trimestre na grandeza radiação solar, percebeu-se que

alguns meses como agosto e setembro demonstram radiação solar maiores que novembro e dezembro (Tabela).

4.2.3. DADOS MEDIDOS VELOCIDADE DO VENTO

A velocidade do vento é a terceira grandeza observada, seu impacto na geração solar também pode ser relacionado com dispersão de resíduos nas placas, diminuindo assim sua eficiência. Com os dados obtidos gerou-se as Figura 27, Figura 28, Figura 29 e Figura 30 com todo o ano de 2021 dividido por trimestre.

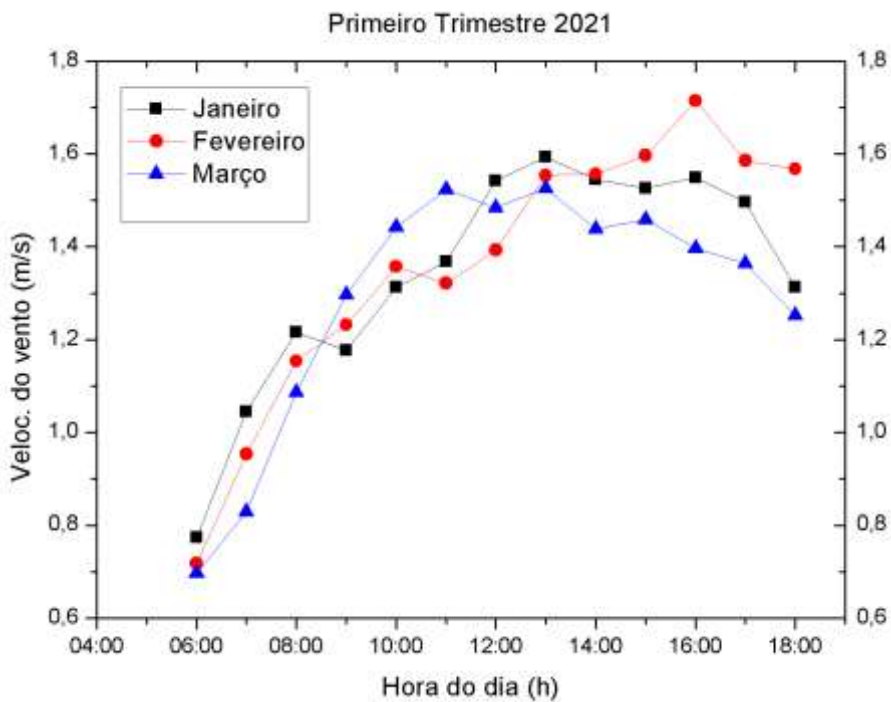


Figura 27. Velocidade do vento primeiro trimestre Salvador.

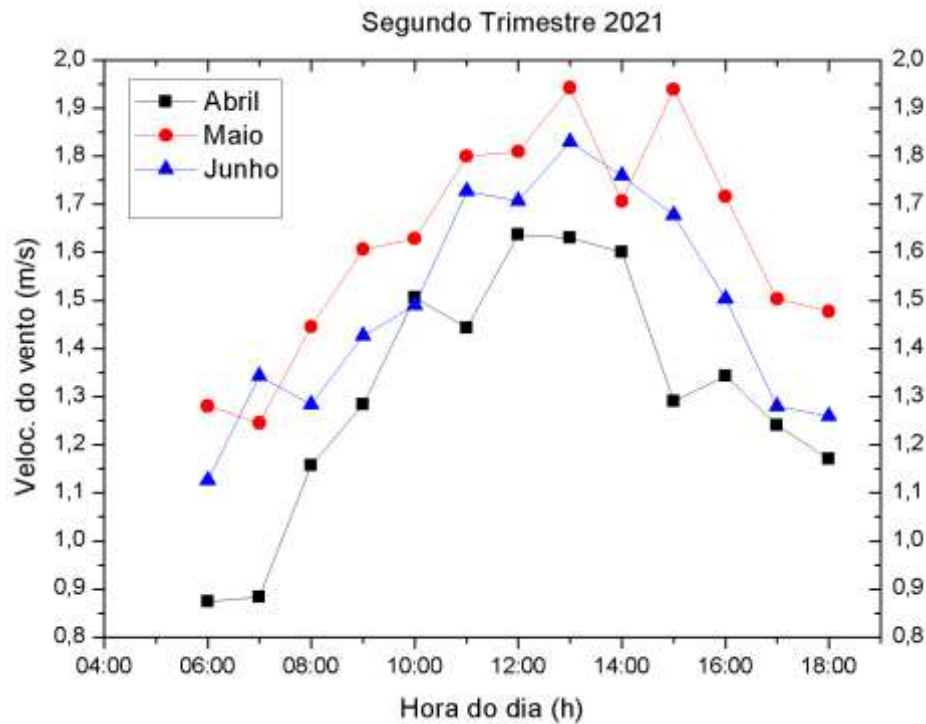


Figura 28. Velocidade do vento segundo trimestre Salvador.

Para o primeiro trimestre de 2021 (Figura 27) percebe-se a velocidade média dos meses próximas entre os três meses, com um pico entre 13 e 16 horas.

Quando observa-se o segundo trimestre (Figura 28) o comportamento do vento é bastante diferente, abril apresenta a velocidade média do vento inferior, não apenas do segundo trimestre mas de todo o primeiro semestre de 2021 conforme Tabela 6, com 1,28 m/s.

Tabela 6. Parâmetros estatísticos para a média de velocidade do vento para o primeiro semestre de 2021 para Salvador.

1º Trimestre	Janeiro	Fevereiro	Março
Veloc. Vento Média (m/s) =	1,34	1,36	1,29
Desvio Padrão =	0,24	0,28	0,26
Desvio Padrão da Média =	0,06	0,07	0,07
Intervalo de Confiança (IC) =	1,34±0,06	1,36±0,07	1,29±0,07
2º Trimestre	Abril	Maio	Junho
Veloc. Vento Média (m/s) =	1,31	1,28	1,49
Desvio Padrão =	0,25	0,22	0,22
Desvio Padrão da Média =	0,07	0,06	0,06
Intervalo de Confiança (IC) =	1,31±0,07	1,62±0,06	1,49±0,06

A Tabela 6 demonstra as métricas estatísticas para todo o primeiro semestre de 2021 para a grandeza velocidade do vento média. Junho apresenta maior velocidade média 1,49 m/s e fevereiro maior desvio padrão 0,28 m/s demonstrando uma maior dispersão ao longo do mês. Exceto junho a velocidade média do vento é próxima como 1,36 m/s em fevereiro e 1,28 m/s em abril. Sendo maio com maior pico registrado 1,90 m/s.

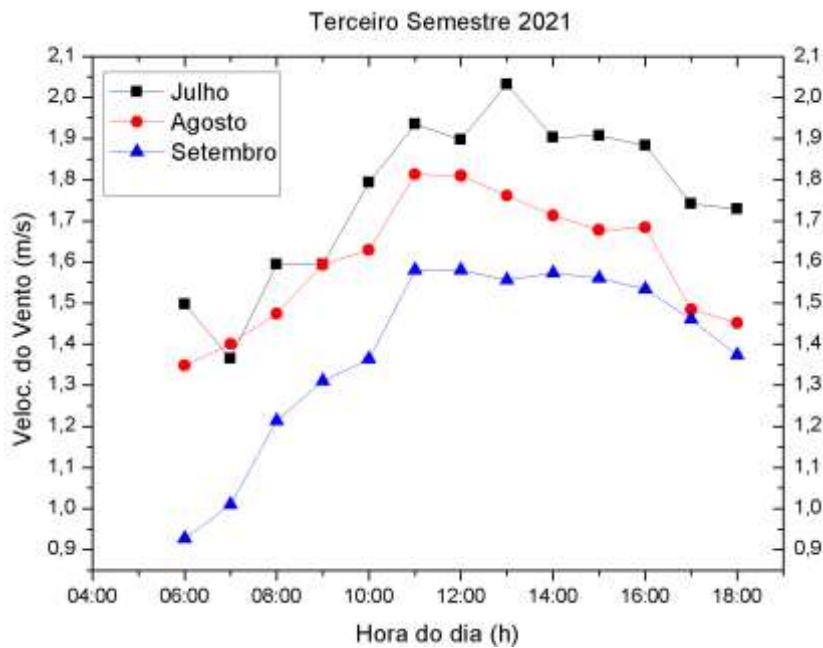


Figura 29. Velocidade do vento terceiro trimestre Salvador.

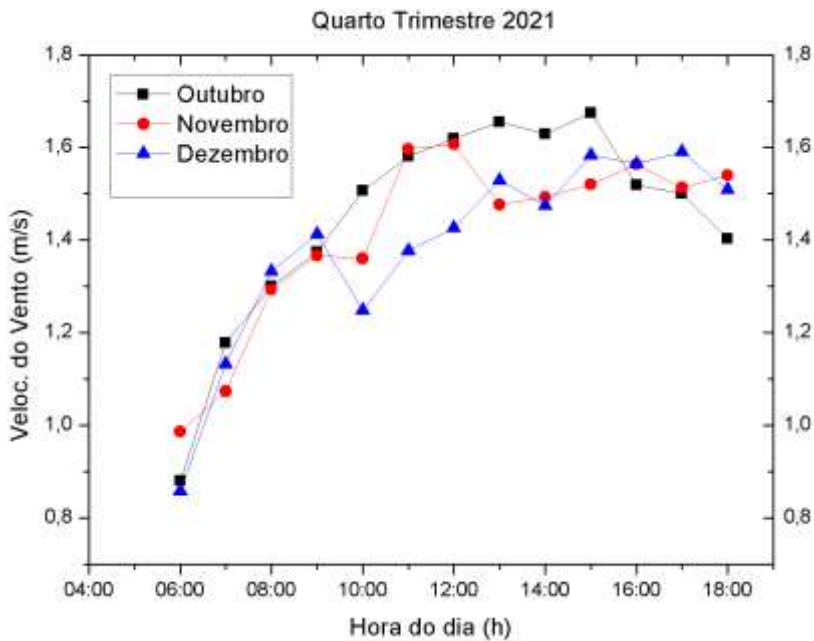


Figura 30. Velocidade do vento quarto trimestre Salvador.

A Figura 29 mostra o terceiro semestre da velocidade média do vento para Salvador, percebe-se que julho demonstra o resultado de maior velocidade em quase todo o período observado. Sendo inclusive o mês com maior velocidade média em todo o ano Salvador com 1,75 m/s (

Tabela) e desvio padrão de 0,19 m/s. Quando observado o quarto trimestre dezembro demonstra a menor velocidade (1,38 m/s) e outubro a maior (1,44 m/s).

Tabela 4.13. Parâmetros estatísticos para a média da velocidade do vento para o segundo semestre de 2021 para Salvador.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Veloc. Vento Média (m/s) =	1,75	1,60	1,38
Desvio Padrão =	0,19	0,15	0,22
Desvio Padrão da Média =	0,05	0,04	0,06
Intervalo de Confiança (IC) =	1,75±0,05	1,60±0,04	1,38±0,06
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Veloc. Vento Média (m/s) =	1,44	1,41	1,38
Desvio Padrão =	0,22	0,19	0,20
Desvio Padrão da Média =	0,06	0,05	0,05
Intervalo de Confiança (IC) =	1,44±0,06	1,41±0,05	1,38±0,05

De forma macro a Tabela 4.13 traz a possibilidade de realizar a análise do segundo semestre de 2021 dos dados estatísticos para a velocidade do vento. Quando comparado com a Tabela 6 (dados para o primeiro semestre) fica evidente que a velocidade média do vento no segundo semestre é maior com julho com 1,75 m/s e agosto 1,60 m/s demonstrando as maiores velocidades observadas no ano. Outra característica observada foi o desvio padrão, que no segundo semestre apresentou resultados menores quando comparados ao segundo, demonstrando menor dispersão ao longo do tempo para a métrica observada.

Quando observado os dozes meses, percebeu-se um pico na velocidade do vento entre os meses de junho, julho e agosto. Junho inclusive demonstrou baixa radiação solar e baixa temperatura nas análises anteriores, sendo considerado um mês do período de chuva para Salvador.

4.2.4. VALIDAÇÃO POR COMPARAÇÃO

A comparação dos resultados previstos com os resultados medidos foi validada através da comparação de dois meses diferentes. Escolheu-se o mês com a maior radiação solar do primeiro semestre (janeiro) e o do segundo semestre (outubro) com base nos dados obtidos nas etapas anteriores. Com esses

meses obteve-se as curvas de radiação solar medida e simulada estimada, em seguida foi elaborado um diagrama de paridade entre essas medições. O intervalo de confiança escolhido foi de 95%, obtidas através das métricas de incertezas. Utilizou-se o método numérico proposto por Gauss-Jacobi para os dois meses observados.

Os parâmetros estatísticos observados foram: o coeficiente de correlação de Pearson (Rp), coeficiente de determinação (R²), coeficiente de determinação ajustado (R²aj) e Raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM). Essas métricas estatísticas garantem os resultados previstos dos modelos propostos.

4.2.4.1. PRIMEIRO SEMESTRE (JANEIRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM

Utilizando o limite de confiança de 95%, a radiação estimada para janeiro Rad = 473 ± 87,94. Este resultado demonstra que o valor real da radiação está dentro desse intervalo.

A Figura 31 demonstra o ajuste da radiação solar para janeiro ajustado com um modelo de terceira ordem e um intervalo de confiança de 95%. Em dois momentos os valores experimentais medidos ficaram fora do intervalo de confiança. Nota-se que o modelo escolhido mostra os dados medidos e as métricas estatísticas (Tabela). Na Figura 32 há um diagrama de paridade com um intervalo de confiança de 95% da radiação solar medida com a radiação solar simulada, dados também contidos na Tabela .

Tabela 4.14. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear.

	$R_{ad} = -228,35 + 175,22 t + 5,50 t^2 - 1,36 t^3$
Índices. Estatísticos	$R^2 = 0,970 ; R_{ajst}^2 = 0,960$
	$(R_{rad})^{exp.} = 13,85 + 0,97 (R_{rad})^{pred}$
Índices. Estatísticos	$R = 0,985$

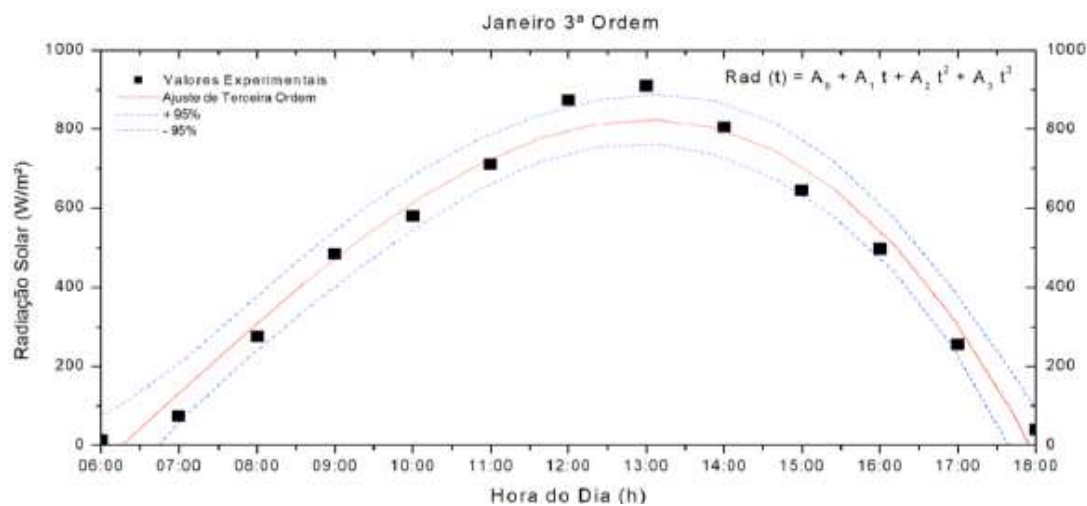


Figura 31. Resultados da radiação solar do mês janeiro ajustados com um modelo de terceira ordem.

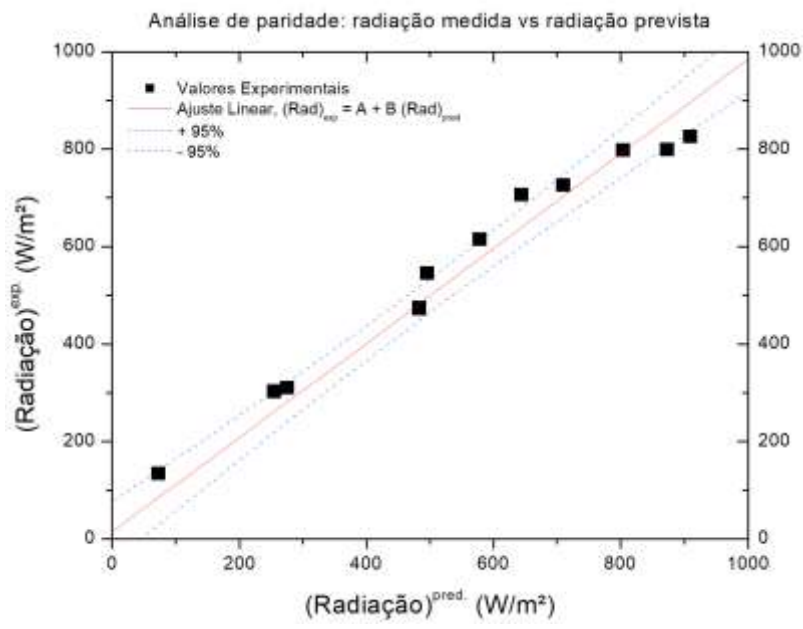


Figura 32. Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de terceira ordem.

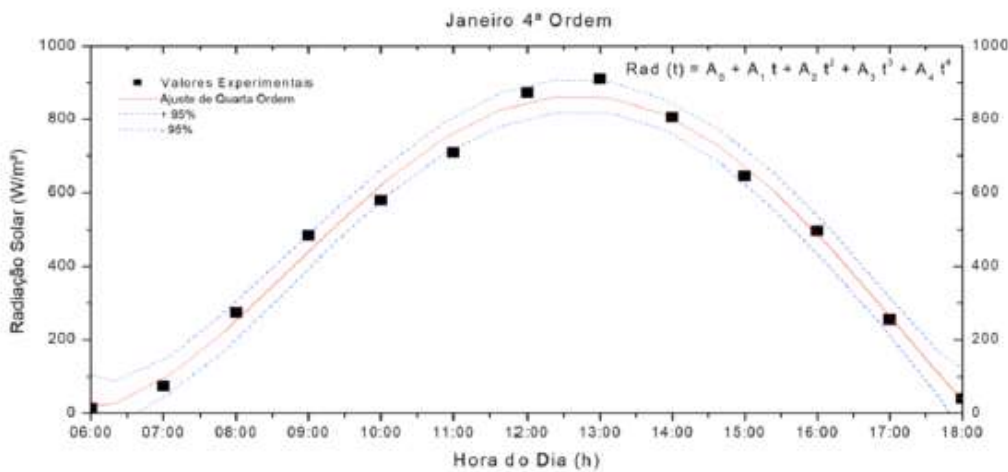
4.2.4.2. PRIMEIRO SEMESTRE (JANEIRO): MODELO DE QUARTA ORDEM

Como dois métodos foram escolhidos, também foi elaborado um modelo de análise de quarta ordem para janeiro (Figura) com as métricas estatísticas contidas na Tabela com o mesmo intervalo de confiança, 95%. O objetivo de utilizar outro modelo foi analisar o ajuste as medidas experimentais da radiação solar. Utilizou-se também $Rad = 473 \pm 87,94$ para estimar a magnitude numérica da radiação solar.

O modelo de quarta ordem produziu bons resultados, melhores que o modelo de terceira ordem, com todos os valores experimentais dentro do intervalo de confiança. Também foi elaborado um diagrama de paridade com a radiação solar medida e a radiação solar simulada para o mês de janeiro, utilizando a análise de quarta ordem (Figura).

Tabela 4.15. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear.

	$R_{ad} = 55,20 - 129,88 t + 95,40 t^2 - 11,09 t^3 + 0,34 t^4$
Índices. Estatísticos	$R^2 = 0,990 ; R_{ajst}^2 = 0,986$
	$(R_{rad})^{exp.} = 4,38 + 0,99 (R_{rad})^{pred}$
Índices. Estatísticos	$R = 0,998$



(a)

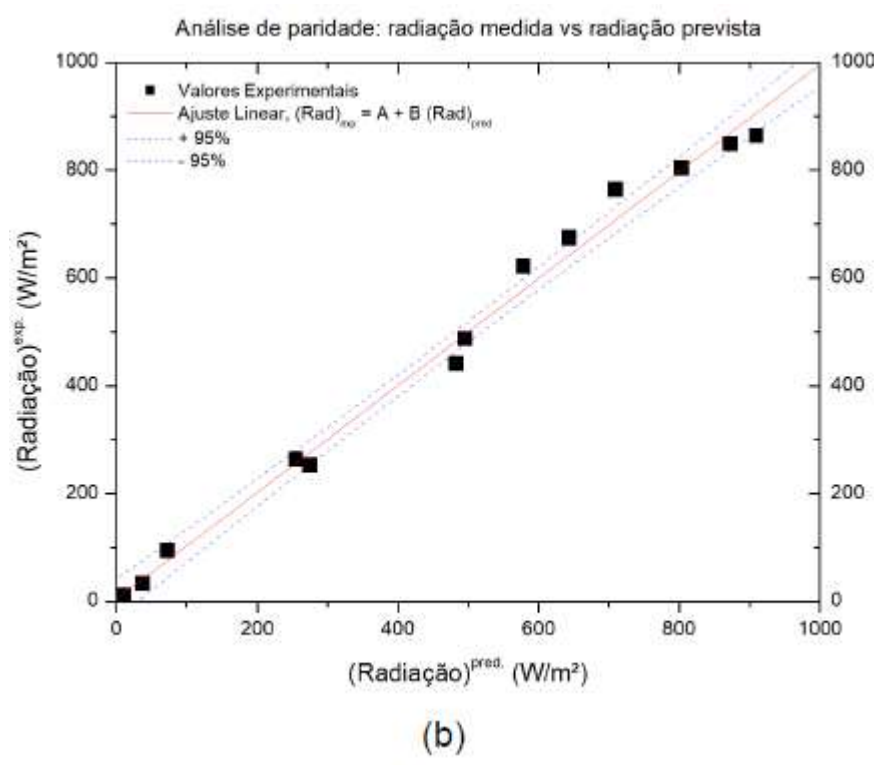
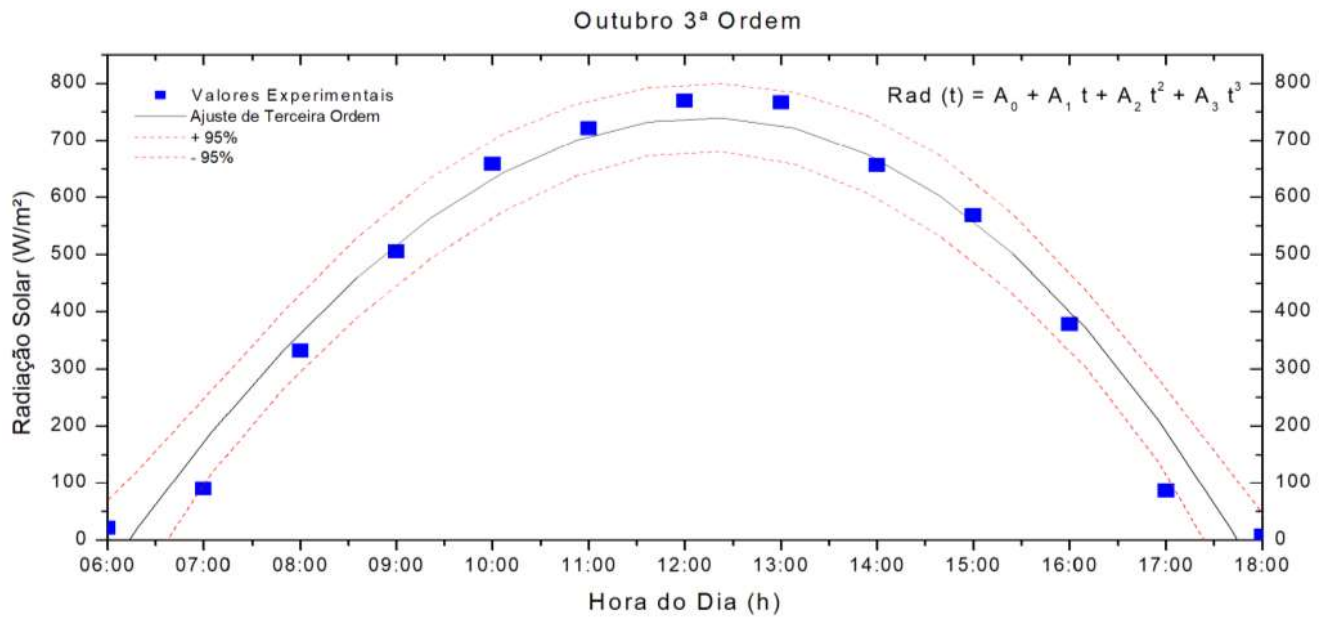


Figura 33. (a) Resultados da radiação solar do mês janeiro ajustados com um modelo de quarta ordem; (b) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de quarta ordem.

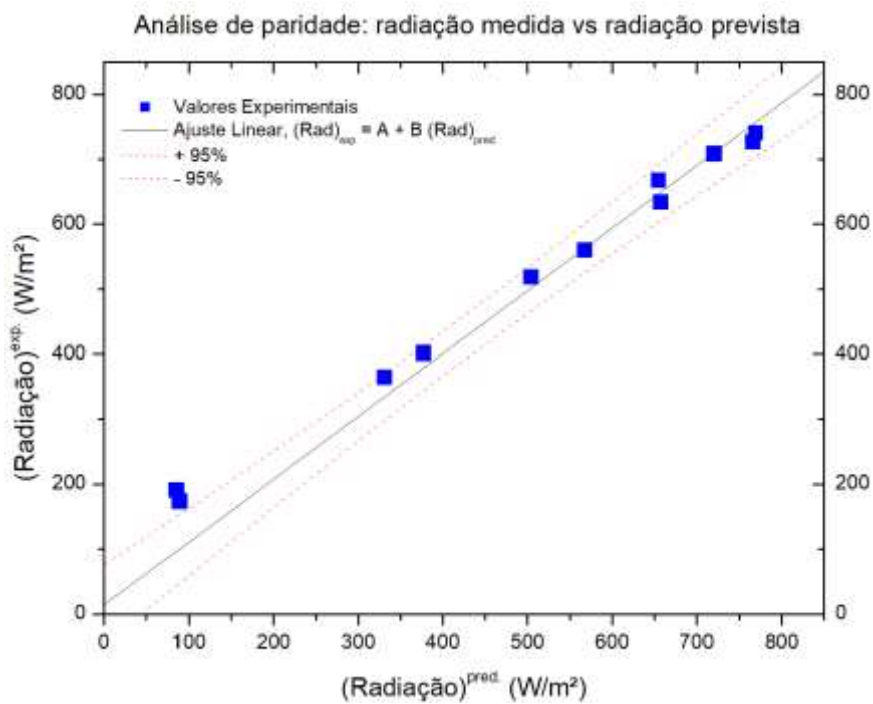
4.2.4.3. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM

Outubro foi o terceiro mês do ano com maior radiação, perdendo apenas para janeiro e março. Com o limite de confiança de 95%, a radiação estimada para outubro foi $Rad = 427,22 \pm 81,39$. O valor real da radiação está dentro desse intervalo.

A Figura 33 contém o ajuste da radiação solar para outubro ajustado com um modelo de terceira ordem e um intervalo de confiança de 95%, todos os valores experimentais ficam dentro do intervalo de confiança, diferente do que aconteceu com a análise de terceira ordem de janeiro. Um diagrama de paridade (Figura 33) mostra a relação da radiação solar medida com a radiação solar simulada, dados também contidos na Tabela , além dos dados medidos e as métricas estatísticas.



(c)



(d)

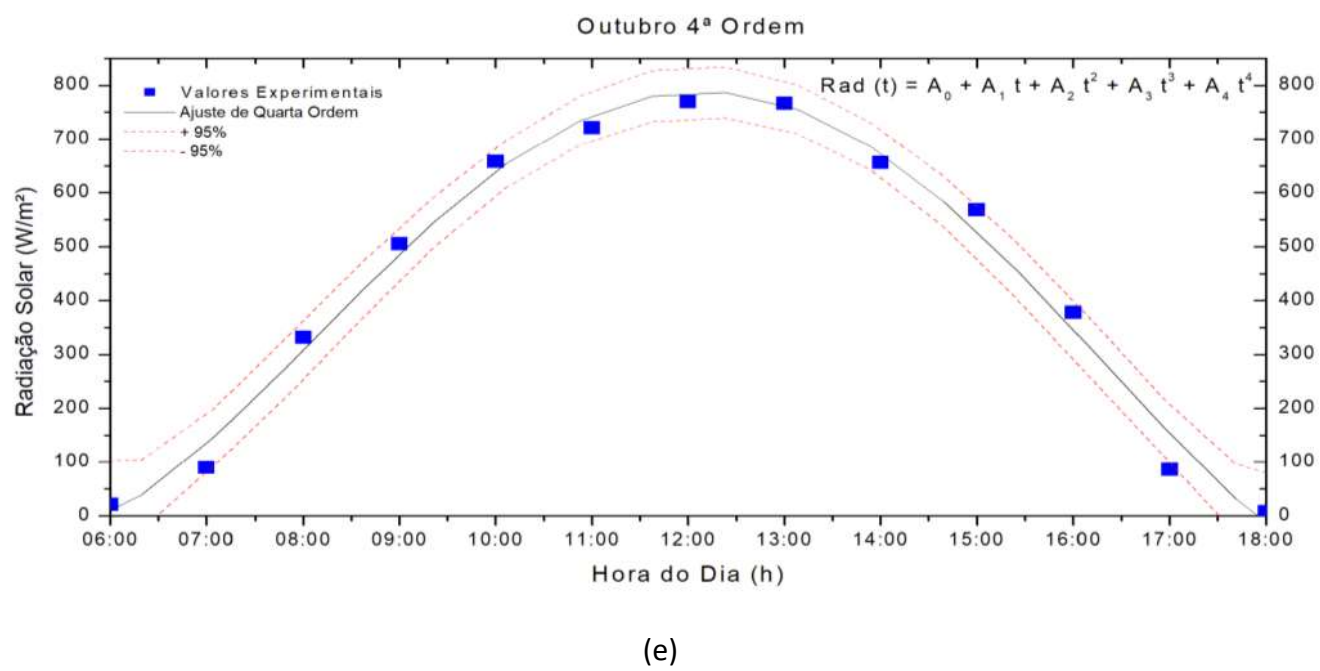
Figura 33. (c) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um modelo de terceira ordem; (d) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de terceira ordem.

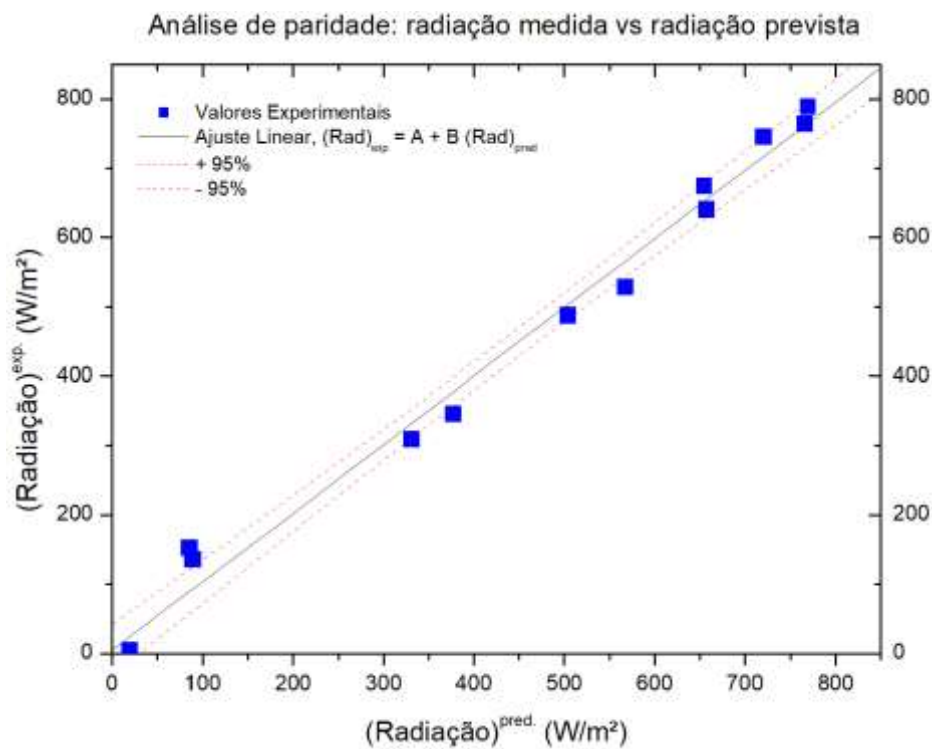
Tabela 4.16. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear.

	$R_{ad} = -311,99 + 275,06 t - 15,60 t^2 - 0,31 t^3$
Índices. Estatísticos	$R^2 = 0,965 ; R^2_{ajst} = 0,954$
	$(R_{rad})^{exp.} = 14,53 + 0,96 (R_{rad})^{pred}$
Índices. Estatísticos	$R = 0,982$

4.2.4.4. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE QUARTA ORDEM

Após a elaboração da análise de quarta ordem para outubro chegou-se na Figura 34. A análise de quarta ordem para outubro também demonstrou todos os valores experimentais dentro do intervalo de confiança, mais uma vez determinado 95%. Também na Figura 34 tem-se o diagrama de paridade entre a radiação solar medida e a radiação solar simulada, com apenas um valor experimental fora do intervalo de segurança. Após a análise foi elaborada a Tabela com as métricas estatísticas da análise de quarta ordem e do diagrama de paridade.





(f)

Figura 34. (a) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um modelo de quarta ordem; (b) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de quarta ordem.

Tabela 4.17. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando modelo regressão linear.

Índices. Estatísticos	$R_{ad} = -36,62 - 21,22 t + 71,70 t^2 - 9,76 t^3 + 0,33 t^4$
	$R^2 = 0,988 ; R_{ajst}^2 = 0,982$
Índices. Estatísticos	$(R_{rad})^{exp.} = 5,11 + 0,98 (R_{rad})^{pred}$
	$R = 0,993$

4.3. RADIAÇÃO TOTAL E MÉDIA DA RADIAÇÃO POR DIA

A Figura 35 mostra a radiação solar total média e também a média da radiação solar do dia em cada mês do período observado. Existe uma variação entre os meses, com alguns demonstrando uma alta radiação solar (janeiro a março) e outros (abril - julho) demonstrando um período de baixa radiação solar, relacionando a radiação solar com as estações de verão e inverno da cidade observada. O mesmo comportamento pode ser perceptível na média da radiação por dia nesses meses.

Fica mais uma vez evidente que no primeiro semestre janeiro tem a maior radiação solar, apesar de ser um pouco acima de março. E no segundo semestre outubro se sobressai, tanto em radiação total quanto em radiação média diária.

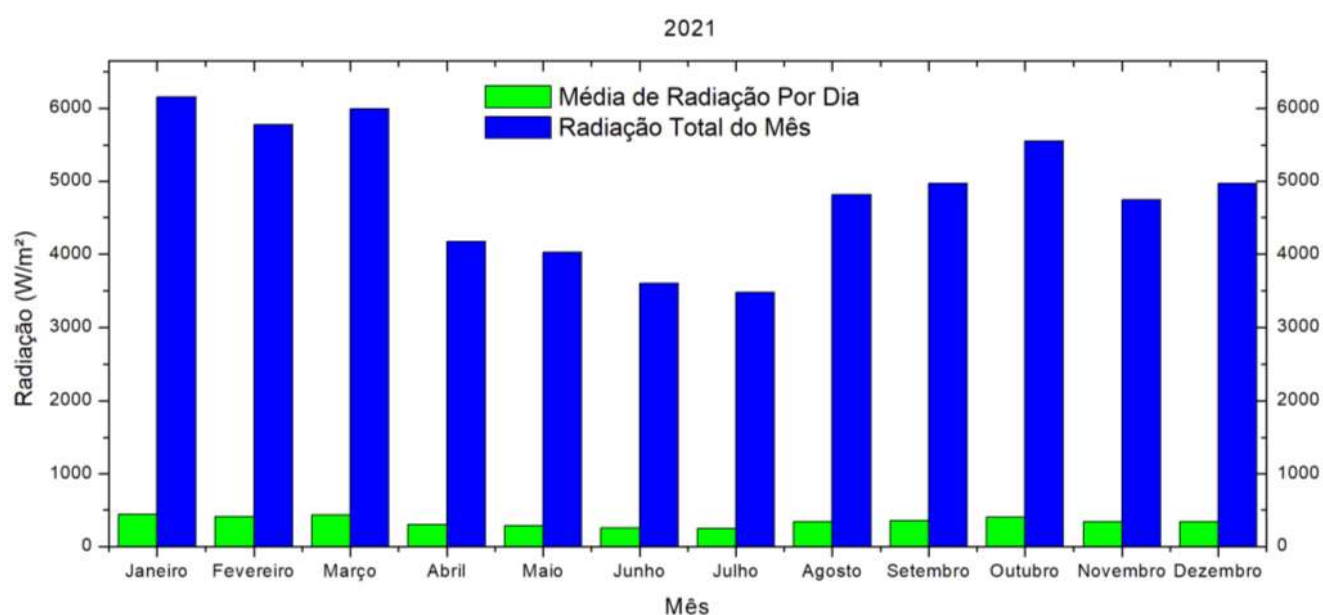


Figura 35. Radiação solar total média do mês e radiação solar total média do dia.

4.4. PRODUÇÃO DE ENERGIA

A radiação solar demonstra novamente ser a característica principal quando observamos a energia produzida por um módulo fotovoltaico durante o período observado (Figura 36). Definida como produção de energia estimada (PEE) o gráfico abaixo mostra a energia que será gerada por um painel solar escolhido como padrão para a cidade de Salvador com base nos dados de estudos do período observado. A PEE foi calculada utilizando a radiação solar média do mês em um dia. Quanto maior a radiação solar média diária, maior será a energia produzida. Os meses de maior PEE foram: janeiro $4,719 \times 10^5$ W, março $4,596 \times 10^5$ W e outubro $4,259 \times 10^5$ W.

Enquanto os meses com menor PEE foram: maio $3,088 \times 10^5$ W, junho $2,764 \times 10^5$ W e julho $2,668 \times 10^5$ W.

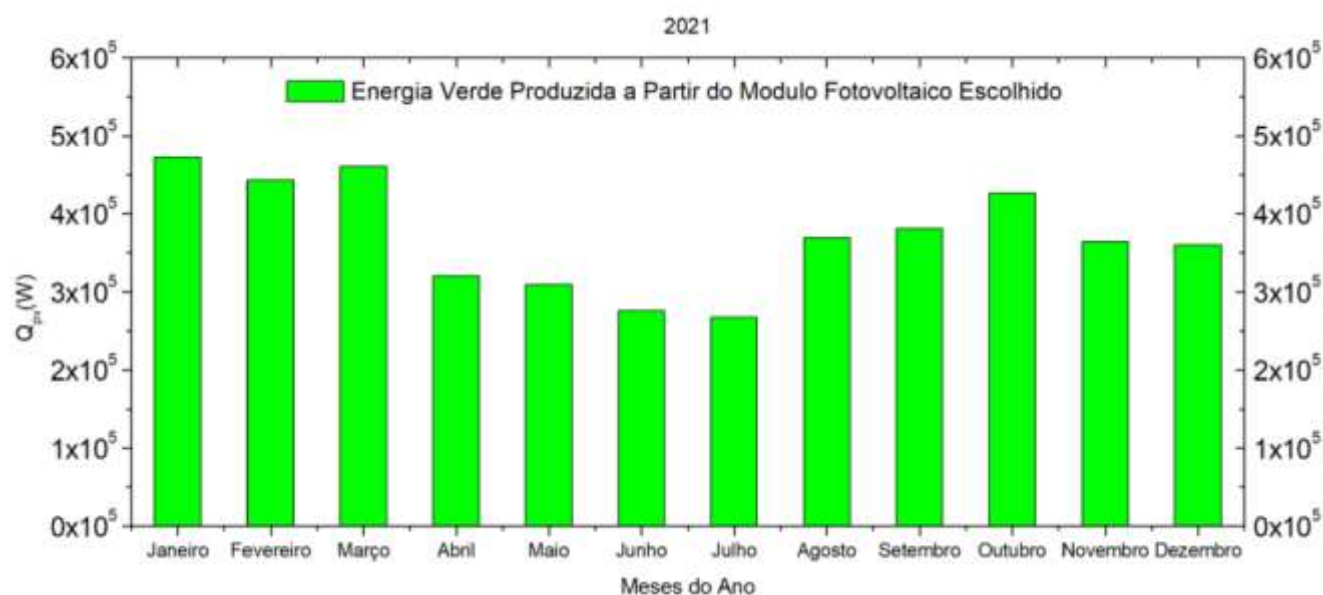


Figura 36. Energia verde produzida a partir do módulo fotovoltaico escolhido utilizando a radiação solar total média.

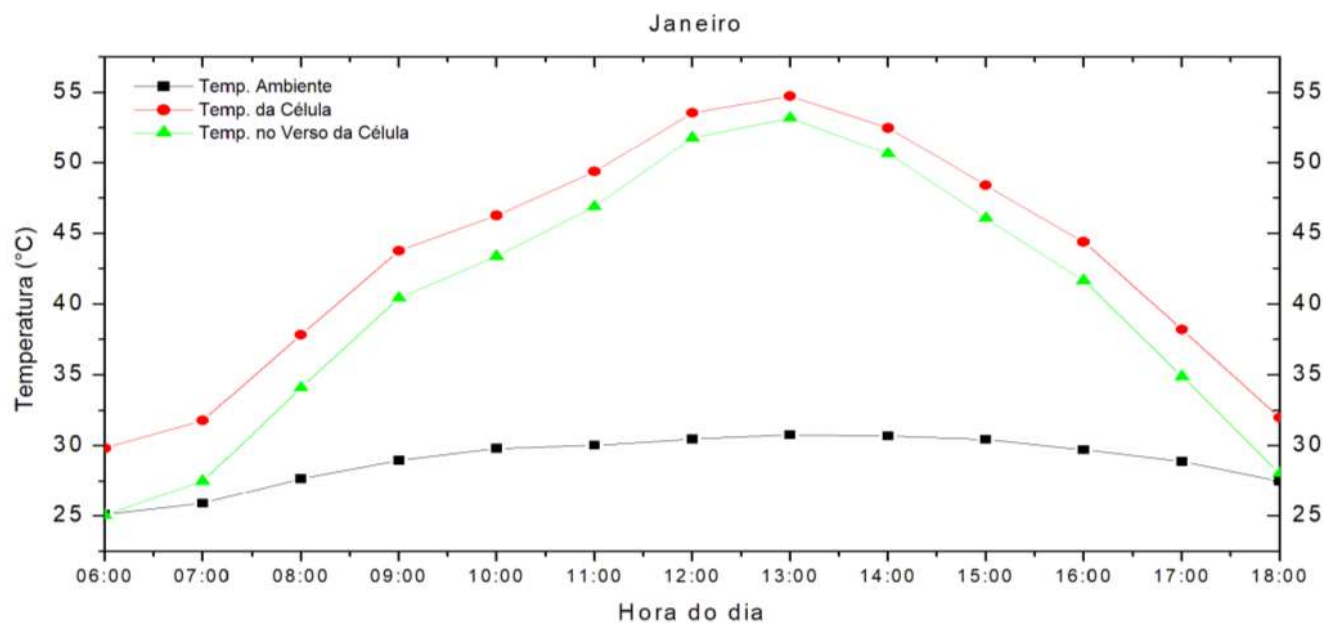
4.5. COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS

A Figura 37 demonstrar o perfil das temperaturas da célula (T_{cell}), verso da célula (T_b) e temperatura ambiente (T_a) dos dois meses com maiores radiação por semestre, janeiro e outubro. A T_a foi demonstrada anteriormente na Tabela , já T_{cell} e T_b foram calculadas com as equações Equação e

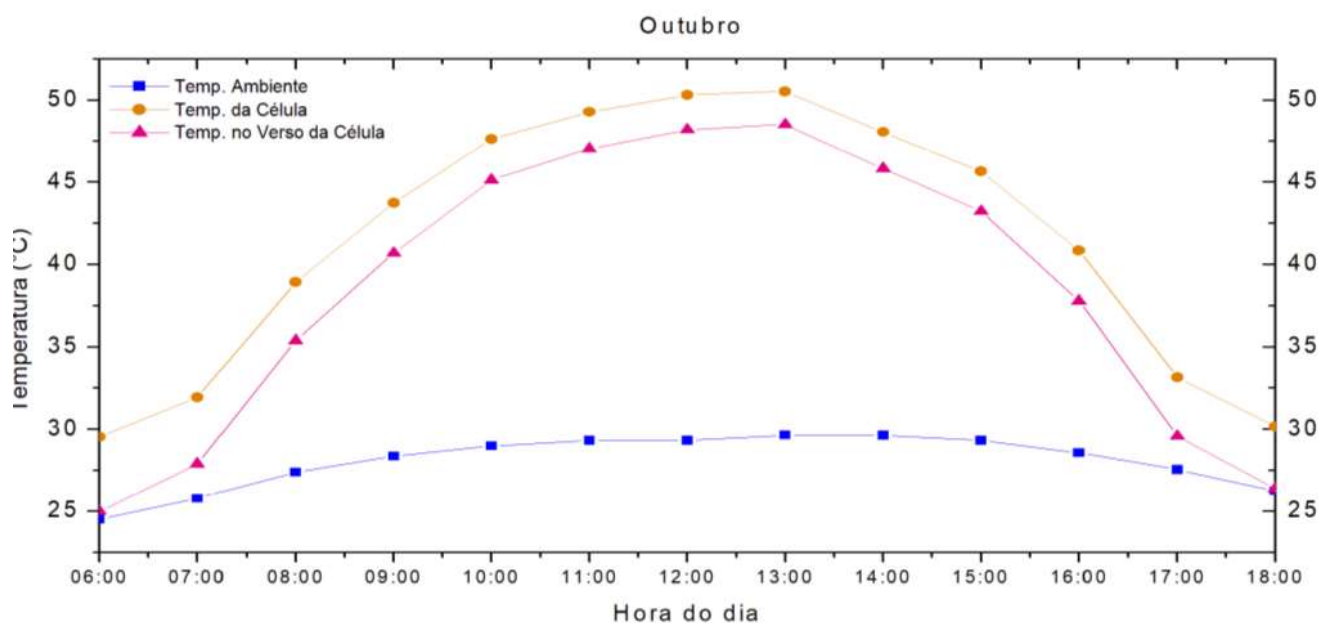
$$T_{cell}(t) = 1,08 T_a + 0,0226 G_i - 1,83 V_w + 4,22 \quad (1)$$

Em ambos os casos a T_{cell} mostra um perfil levemente maior que T_b e ambas, em alguns momentos, chegam ao dobro de T_a .

Essa pequena diferença entre T_{cell} e T_b é causada pela dissipação do calor por condução entre a placa fotovoltaica e a camada de vidro. O ponto máximo dos gráficos fica em torno de 13:00 horas. Com as temperaturas em janeiro chegando a: $T_a = 30,41 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{cell} = 54,71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_b = 53,17 \text{ }^{\circ}\text{C}$. E em outubro: $T_a = 29,64 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{cell} = 50,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_b = 48,51 \text{ }^{\circ}\text{C}$.



(g)



(h)

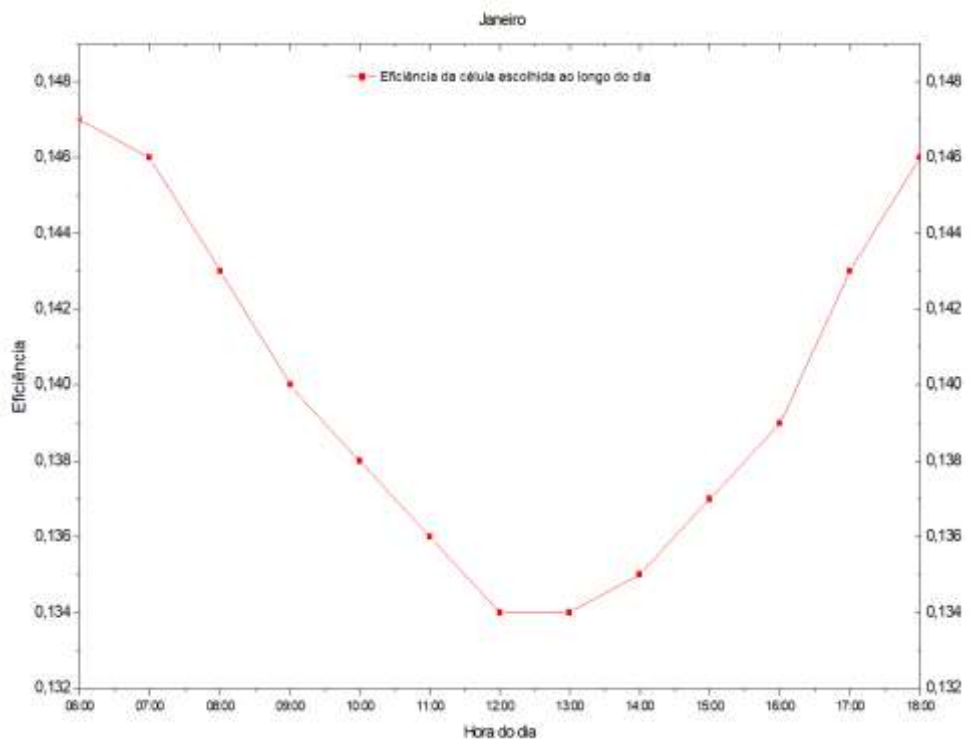
Figura 37. a) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para janeiro. b) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para outubro.

4.6. EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

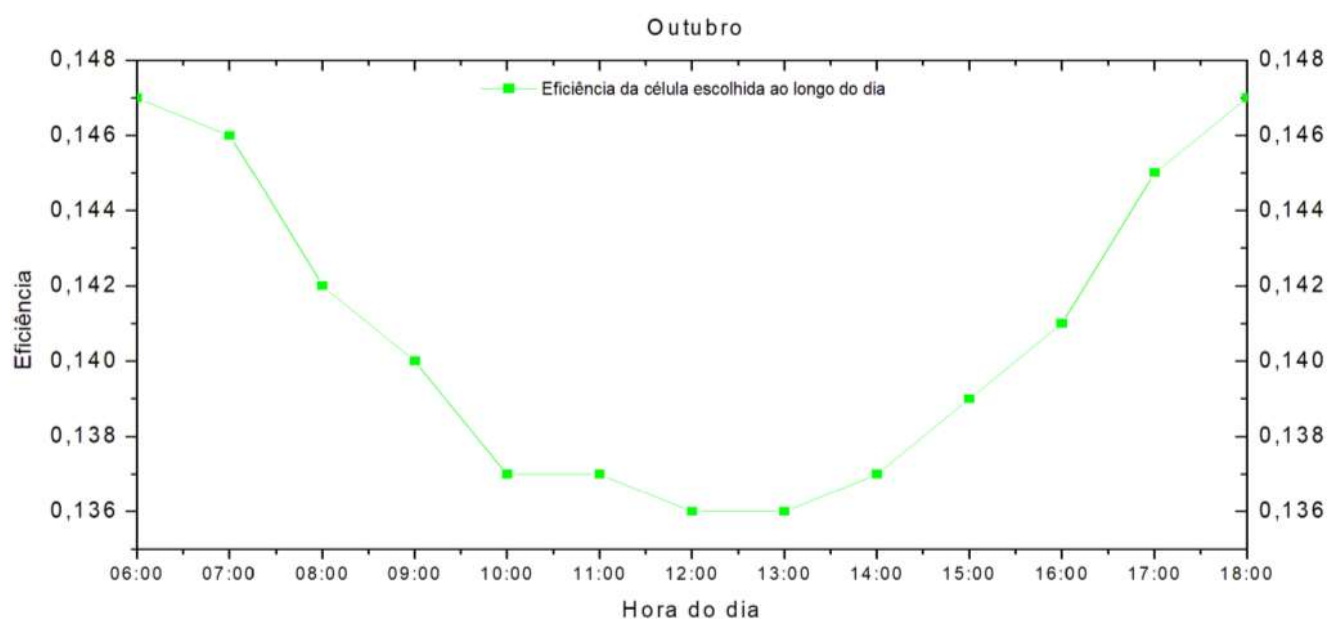
O perfil da eficiência elétrica (EE) do módulo escolhido para os meses de janeiro e outubro foi demonstrada na Figura 38. Utilizou a T_{cell} para os meses observados e algumas características da placa

definidas pelo próprio fabricante como: β_{ref} (coeficiente de temperatura de referência), T_{ref} (temperatura de referência) e η_{ref} (rendimento de referência).

A T_{cell} impacta de forma direta no rendimento, à medida que T_{cell} cresce, a EE decresce. O ponto mínimo alcançado está em torno de 13:00 horas com uma EE entre 13,4% em janeiro e 13,6% em outubro. A EE da placa escolhida varia entre 14,7% a 13,4% em janeiro e 14,7% a 13,6% em outubro, mesmo a radiação solar média sendo maior em outubro, é possível perceber que a média de eficiência solar da placa escolhida é maior nesse mês.



(i)



(j)

Figura 38. a) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para janeiro. b) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para outubro.

4.7. NATAL - RN

A segunda cidade escolhida foi Natal, capital do Rio Grande do Norte. Com o IDH em quinto lugar do nordeste, grande litoral e ventos considerados bons para a geração eólica [55]. A Figura 39 contém a irradiação solar média, a Figura 40 temperatura média e a Figura 41 a velocidade do vento no período de 01 de janeiro de 2021 a 31 de dezembro de 2021.

Todos os dados do período observado estavam disponíveis no site do Inmet. Devido pane nas estações meteorológicas que observam as grandezas escolhidas em 2021 o intervalo para Natal foi ajustado para 07 às 17 horas, pois não há dados disponíveis fora desse intervalo, caracterizando 2 horas a menos a serem observadas no comparativo com Salvador. Pode-se observar uma pequena diminuição na radiação solar observada entre maio e julho, e um período grande radiação entre os meses de outubro a março. A radiação solar média observada foi superior quando comparado com Salvador.

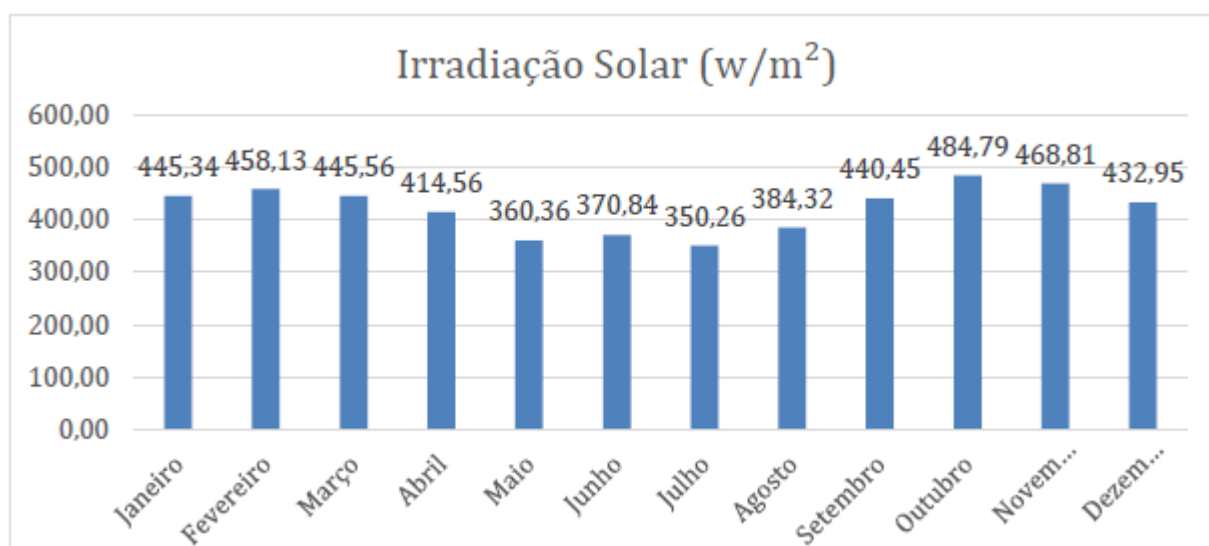


Figura 39: Irradiação solar Natal - RN 2021.

Os meses com maior radiação solar também detêm as maiores temperaturas ambiente média.

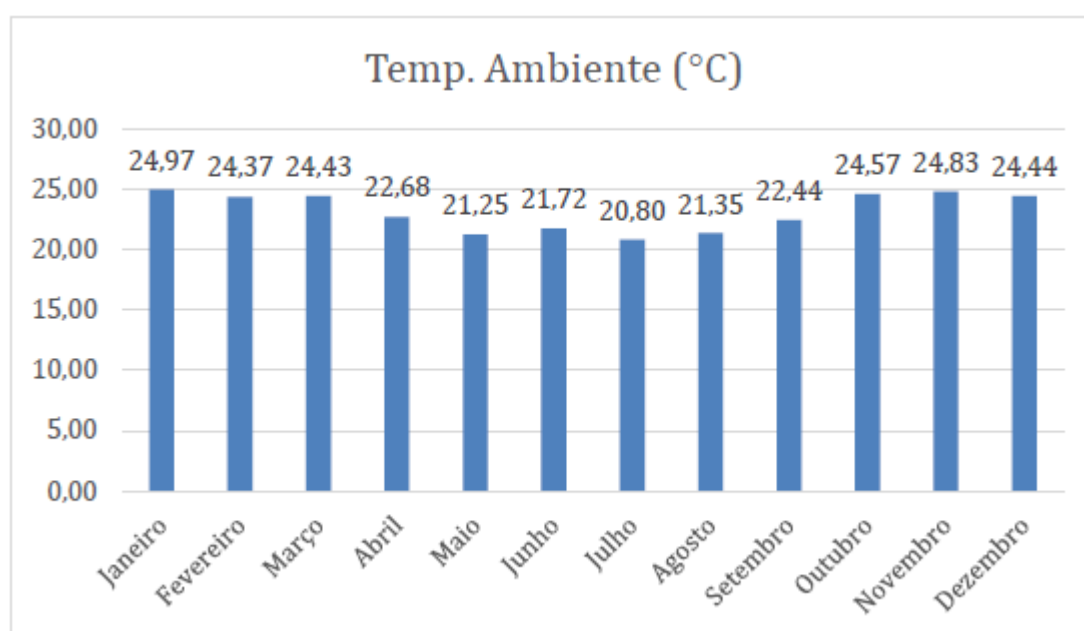


Figura 40. Temperatura ambiente Natal - RN 2021.

Por outro lado, a grandeza velocidade do vento não demonstra uma similaridade com a radiação solar, demonstrando maiores velocidades entre agosto e setembro e menores entre abril e maio. No comparativo, Natal demonstra velocidade do vento média superior a Salvador em todos os meses do ano.

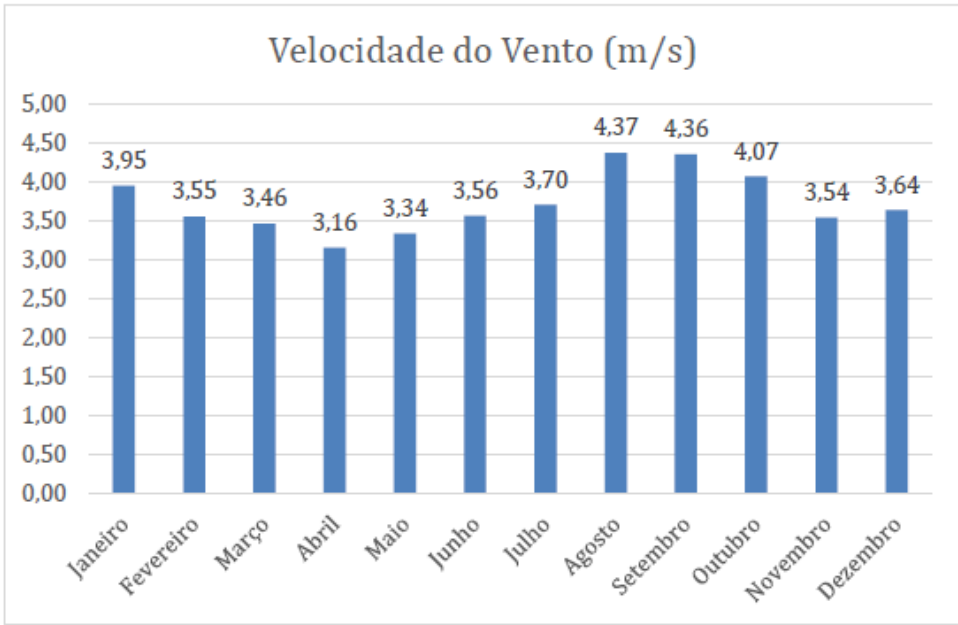


Figura 41. Velocidade do vento Natal - RN 2021.

4.7.1. DADOS MEDIDOS DA RADIAÇÃO SOLAR

O intervalo entre 07 e 17 horas, caracterizado como período com maior radiação solar nas 24 horas do dia foi escolhido. Durante o período observado a irradiação foi dividida por trimestre obtendo as Figura 42, Figura 43, Figura 44 e Figura 45.

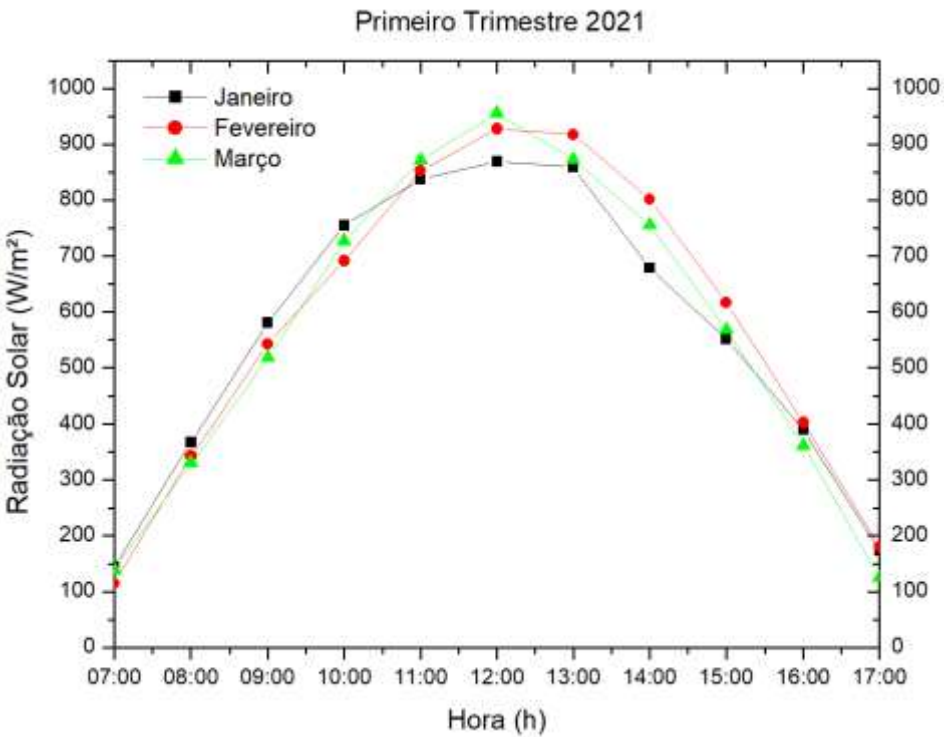


Figura 42. Radiação solar primeiro trimestre Natal.

No primeiro trimestre observa-se o pico de irradiação entre 11 e 13 horas.

Fevereiro com a maior irradiação e a média entre eles próxima ao longo do dia.

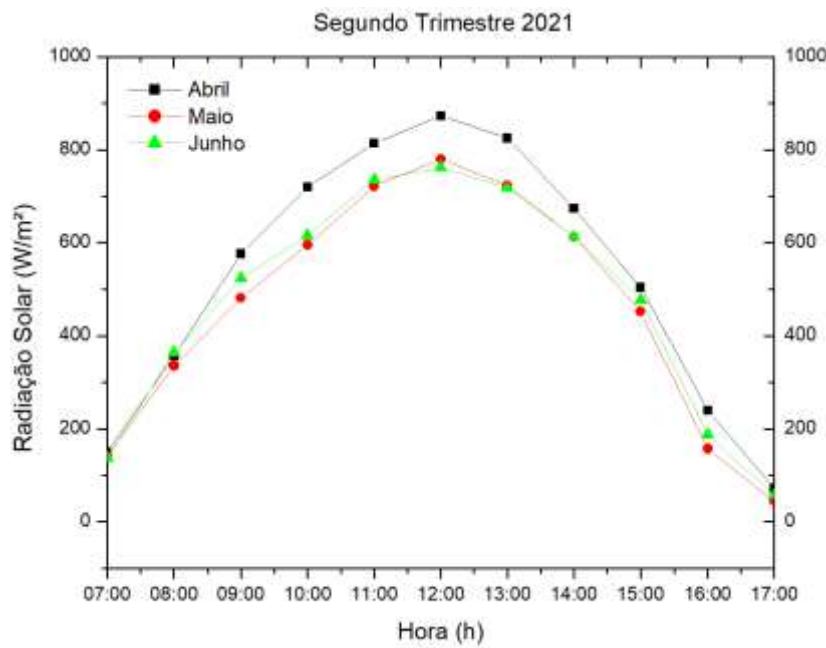


Figura 43. Radiação solar segundo trimestre Natal.

No segundo trimestre o mês com maior irradiação no período observado foi abril, e da mesma forma que foi observado em Salvador, em Natal o segundo trimestre tem uma irradiação solar média menor no comparativo com o primeiro semestre como pode-se concluir através das métricas estatísticas para o primeiro semestre na Tabela

Tabela 4.18 Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do primeiro semestre de 2021 para Natal.

1º Trimestre	Janeiro	Fevereiro	Março
Radiação Média (W/m²) =	603,45	621,25	610,08
Desvio Padrão =	243,75	271,07	271,83
Desvio Padrão da Média =	77,08	85,72	85,96
Intervalo de Confiança (IC) =	603,45±77,08	621,25±85,72	610,08±86,96
Radiação Total (W/m²) =	6034,53	6212,56	6100,84
2º Trimestre	Abril	Maio	Junho
Radiação Média (W/m²) =	573,11	500,06	513,43
Desvio Padrão =	254,9	229,28	222,17
Desvio Padrão da Média =	80,60	72,50	70,25
Intervalo de Confiança (IC) =	573,11±80,60	500,06±72,50	513,43±70,25
Radiação Total (W/m²) =	5731,14	5000,63	5134,33

O mês de fevereiro obteve o melhor resultado, uma radiação média ($621,25 \text{ W/m}^2$), radiação total ($6212,56 \text{ W/m}^2$). Março obteve o maior desvio padrão ($271,83 \text{ W/m}^2$) muito próximo a fevereiro. Observando apenas o segundo trimestre o mês de abril demonstra a maior radiação média ($573,11 \text{ W/m}^2$).

Na Figura 44 pode-se observar a radiação solar ao longo do dia para o terceiro trimestre de Salvador. Sendo setembro o mês com maior radiação. Nota-se que o que julho e agosto tiveram resultados próximos. E no quarto semestre (Figura 45) outubro demonstrou uma radiação solar média entre 11 e 15 horas no comparativo com novembro e dezembro.

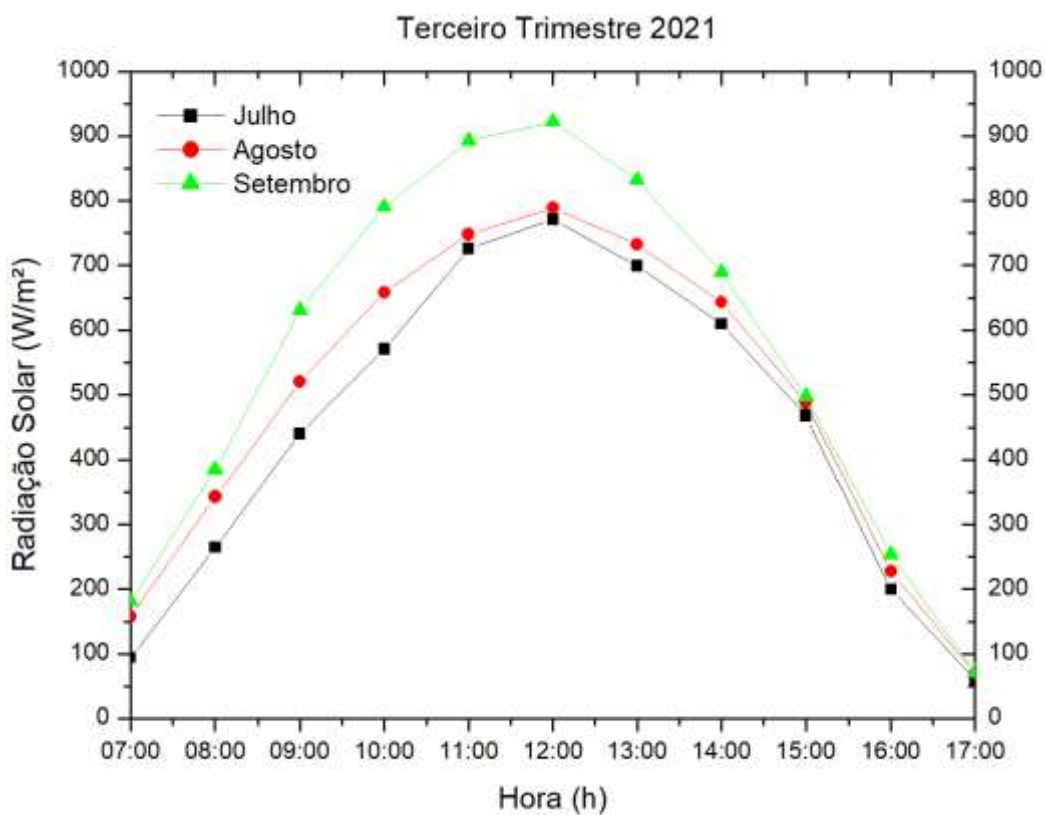


Figura 44. Radiação solar terceiro trimestre Natal.

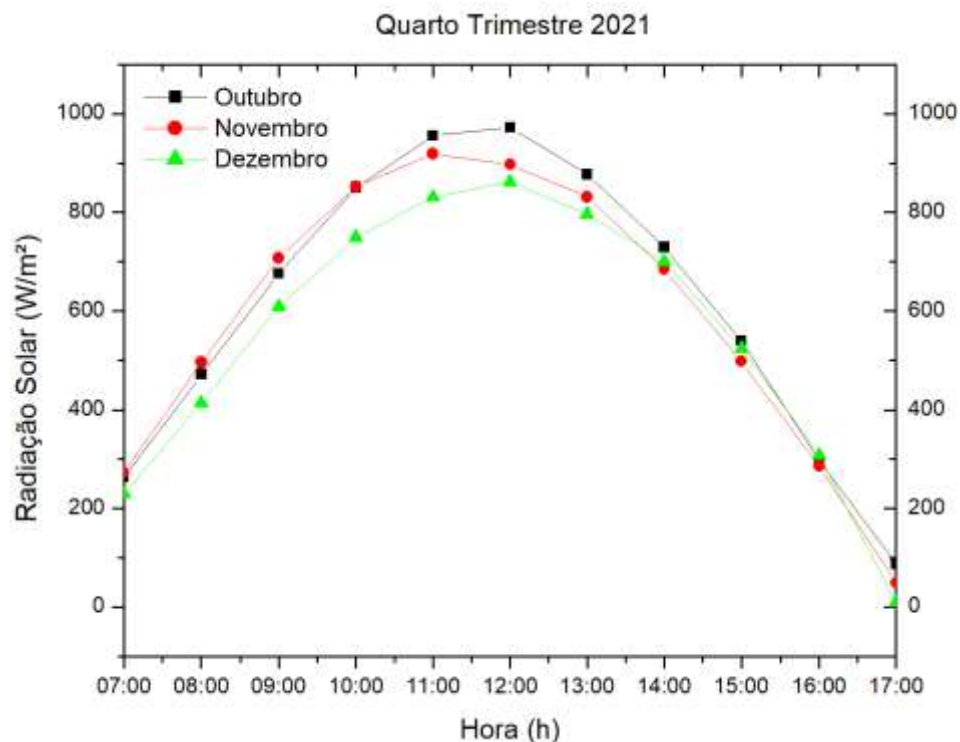


Figura 45. Radiação solar quarto trimestre Natal.

Tabela 4.19. Parâmetros estatísticos para a média de radiação solar do segundo semestre de 2021 para Natal.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Radiação Média (W/m^2) =	484,35	530,71	607,57
Desvio Padrão =	234,13	224,12	266,78
Desvio Padrão da Média =	74,03	70,87	84,36
Intervalo de Confiança (IC) =	484,35±74,03	530,71±70,87	607,57±84,36
Radiação Total (W/m^2) =	4843,55	5307,18	6075,78
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Radiação Média (W/m^2) =	663,36	644,44	602,09
Desvio Padrão =	260,66	243,00	225,05
Desvio Padrão da Média =	82,42	76,84	71,16
Intervalo de Confiança (IC) =	663,36±82,42	644,44±76,84	602,09±71,16
Radiação Total (W/m^2) =	6633,62	6444,43	6020,99

Demonstra-se com a Tabela que outubro obteve a maior radiação solar média ($663,36 W/m^2$) e a maior radiação total ($6633,62 W/m^2$) não apenas no quarto semestre, mas em todo o ano de 2021. Seguido por novembro (radiação solar média ($644,44 W/m^2$) e radiação total ($6444,43 W/m^2$)) e

posteriormente fevereiro. Para o primeiro semestre o mês escolhido para a análise será fevereiro e para o segundo, outubro.

4.7.2. DADOS MEDIDOS TEMPERATURA AMBIENTE

A temperatura ambiente, assim como a irradiação solar, é um fator que corrobora com a produção de energia elétrica através dos módulos fotovoltaicos. Inclusive a temperatura ambiente é um dos fatores que são considerados para definir a temperatura de operação de uma placa solar assim como a radiação solar incidente, velocidade dos ventos e a composição química dos módulos.

As imagens abaixo (Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49) demonstram a temperatura ambiente média em relação a hora no intervalo entre 07 e 18 horas para a cidade de Natal em 2021 dividido por trimestre.

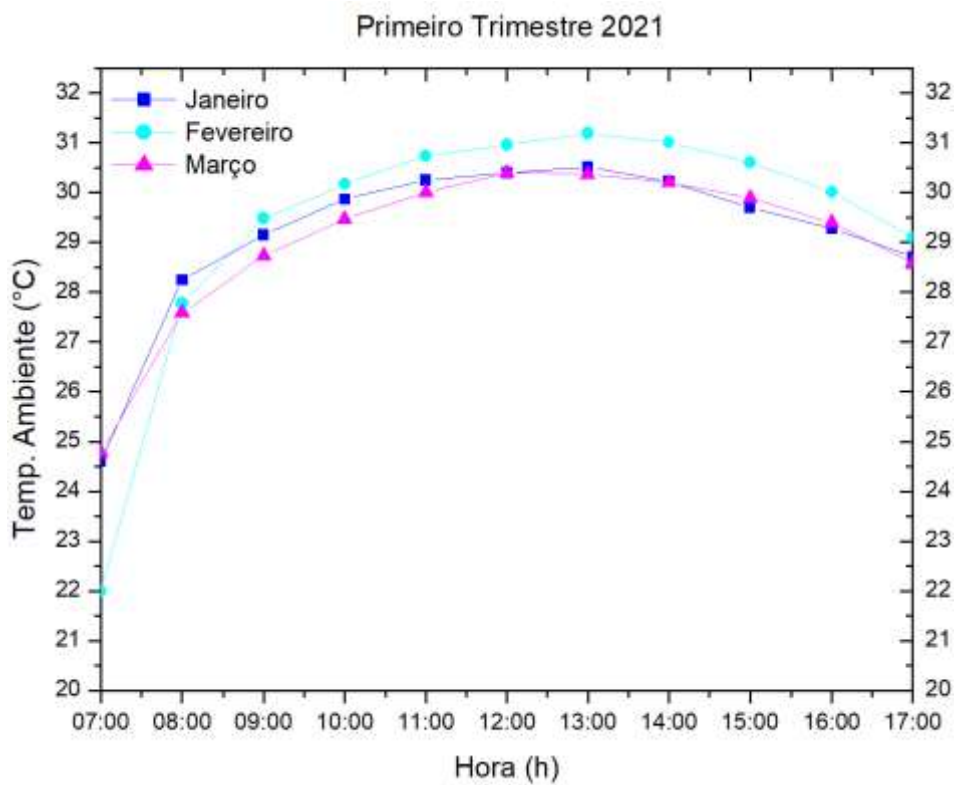


Figura 46. Temperatura ambiente primeiro trimestre Natal.

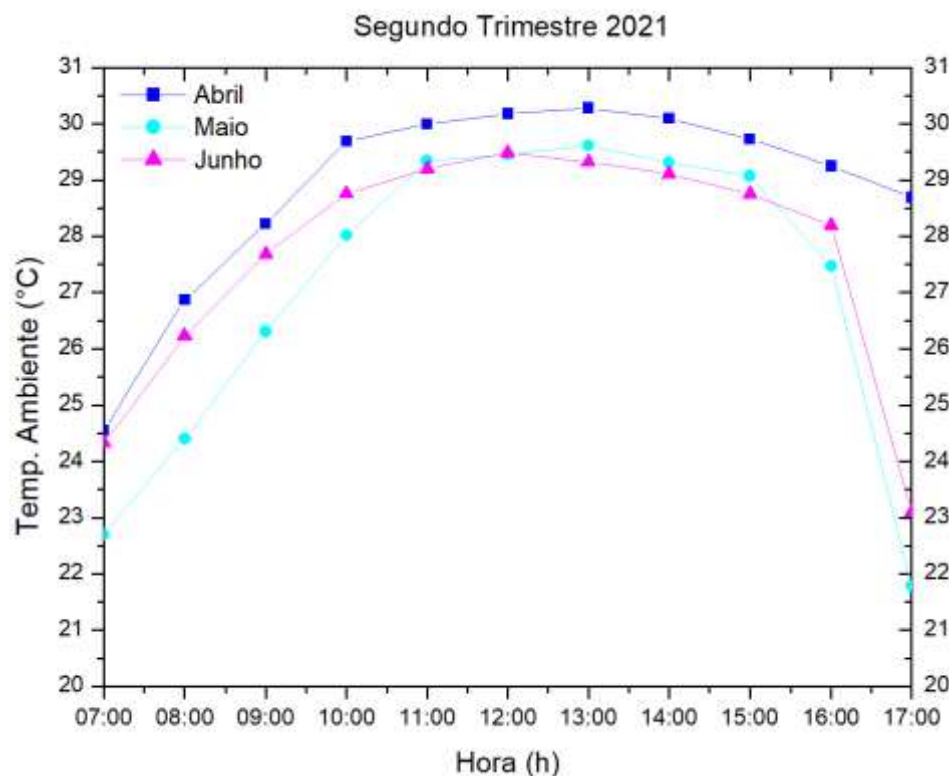


Figura 47. Temperatura ambiente segundo trimestre Natal.

No primeiro trimestre fevereiro demonstrou uma maior temperatura ambiente ao longo do dia e um maior desvio padrão mesmo não demonstrando a maior temperatura média, ficando com 29,00 °C. No primeiro trimestre os meses tiveram valores próximos, como pode-se concluir analisando a Tabela . Para o segundo semestre vale observar as quedas de temperaturas nos meses de maio e junho no final do dia, características do período chuvoso. Todos os meses do segundo trimestre obtiveram temperatura média inferior aos meses do primeiro, com abril alcançando 28,86 °C.

Tabela 4.20. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o primeiro semestre de 2021 para Natal.

1º Trimestre	Janeiro	Fevereiro	Março
Temp. Ambiente Média (°C) =	29,17	29,00	29,03
Desvio Padrão =	1,68	3,79	1,65
Desvio Padrão da Média =	0,50	1,14	0,50
Intervalo de Confiança (IC) =	29,17±0,50	29,00±1,14	29,03±0,50
2º Trimestre	Abril	Maiο	Junho
Temp. Ambiente Média (°C) =	28,86	27,04	27,64
Desvio Padrão =	1,76	2,86	2,17
Desvio Padrão da Média =	0,53	0,86	0,65
Intervalo de Confiança (IC) =	28,86±0,53	27,04±0,86	27,64±0,65

Quando observado o desvio padrão, fevereiro com 3,79 °C e maio com 2,86 °C demonstram os maiores resultados, indicando uma maior variação ao longo do dia.

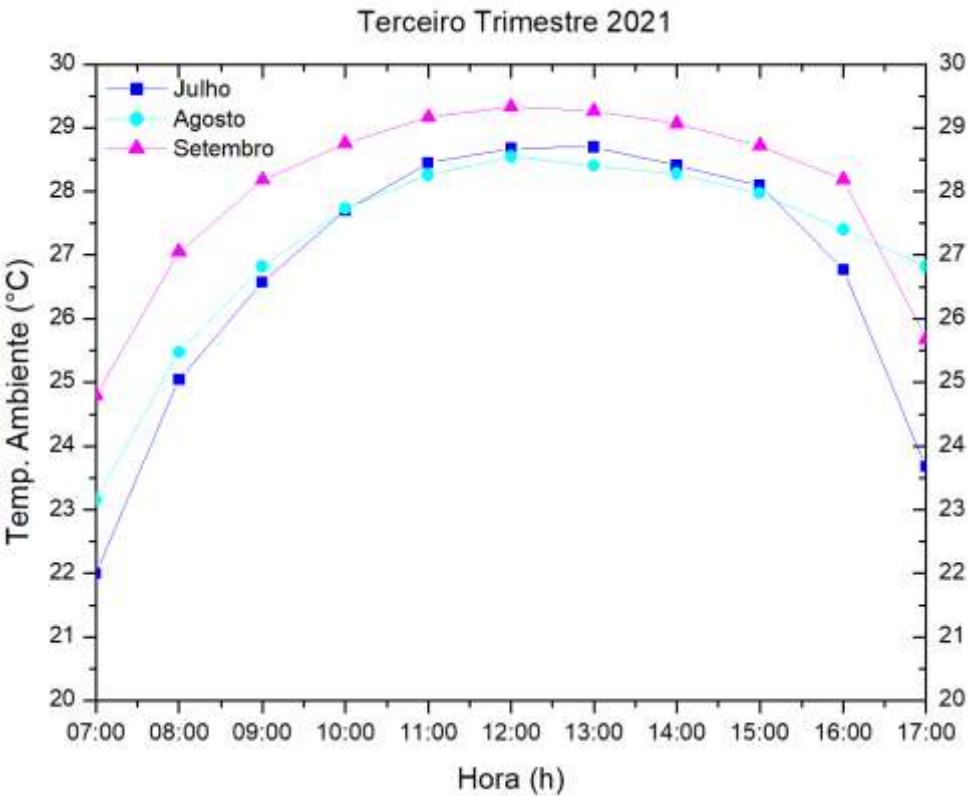


Figura 48. Temperatura ambiente terceiro trimestre Natal.

As temperaturas do terceiro trimestre ainda não retomam aos valores do primeiro trimestre (Figura 48) nota-se que a temperatura média ambiente em julho é maior em relação a agosto e setembro na maior parte do dia.

Já no quarto trimestre (Figura 49) os meses voltam a ter temperaturas no padrão do primeiro trimestre, como pode ser observado na Tabela .

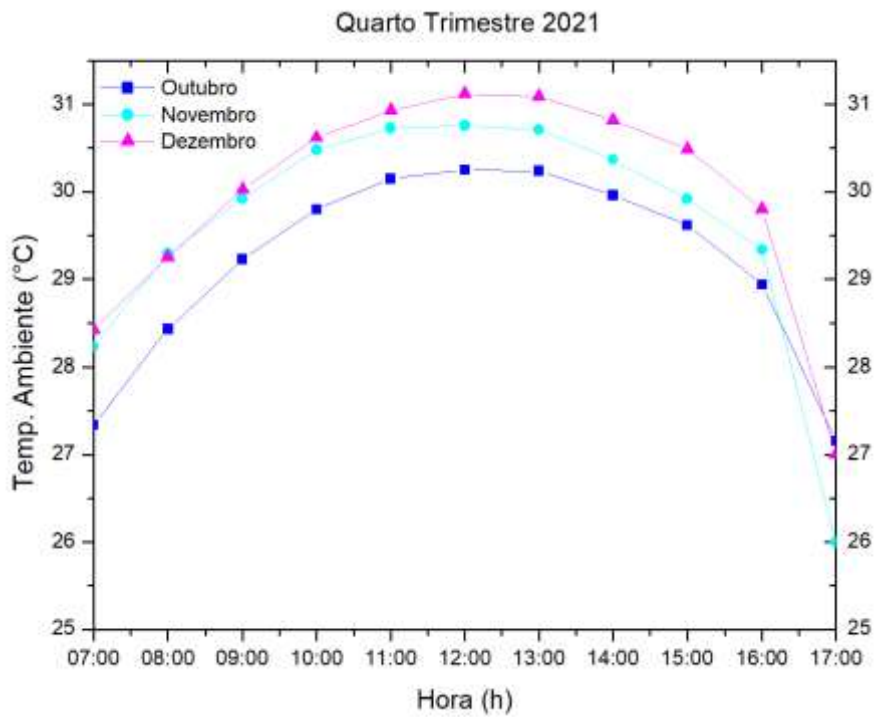


Figura 49. Temperatura ambiente quarto trimestre Natal.

Tabela 4.21. Parâmetros estatísticos para a média de temperatura ambiente para o segundo semestre de 2021 para Natal.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Temp. Ambiente Média (°C) =	26,47	27,16	28,01
Desvio Padrão =	2,93	1,61	1,53
Desvio Padrão da Média =	0,88	0,48	0,46
Intervalo de Confiança (IC) =	26,47±0,88	27,16±0,48	28,01±0,46
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Temp. Ambiente Média (°C) =	29,12	29,61	29,96
Desvio Padrão =	1,11	1,42	1,29
Desvio Padrão da Média =	0,33	0,43	0,38
Intervalo de Confiança (IC) =	29,12±0,33	29,61±0,43	29,96±0,38

No segundo semestre dezembro apresenta maior temperatura ambiente média, 29,96°C e maior desvio padrão. Já julho apresenta o maior desvio padrão 2,93°C, indicando maior dispersão da temperatura da média quando comparado com os demais meses do segundo semestre. A temperatura ambiente média de todos os meses do quarto trimestre é maior quando comparado com o terceiro. No comparativo anual, o quarto trimestre mostrou as maiores temperaturas no período observado, dezembro e novembro obtendo valores superiores a janeiro.

4.7.3. DADOS MEDIDOS VELOCIDADE DO VENTO

A velocidade do vento é a terceira grandeza observada. Os dados obtidos nas estações do Inmet para a cidade Natal foram utilizados na elaboração das imagens abaixo (Figura 50, Figura 51, Figura 52 e Figura 53) para o ano de 2021, dividido por trimestre, com a análise das métricas estatísticas demonstrada nas Tabela e Tabela. De forma antecipada notou-se que a velocidade do vento para Natal era muito superior a observada em Salvador, uma vez que a velocidade dos ventos média em Salvador era 1,42 m/s e em Natal 3,72 m/s.

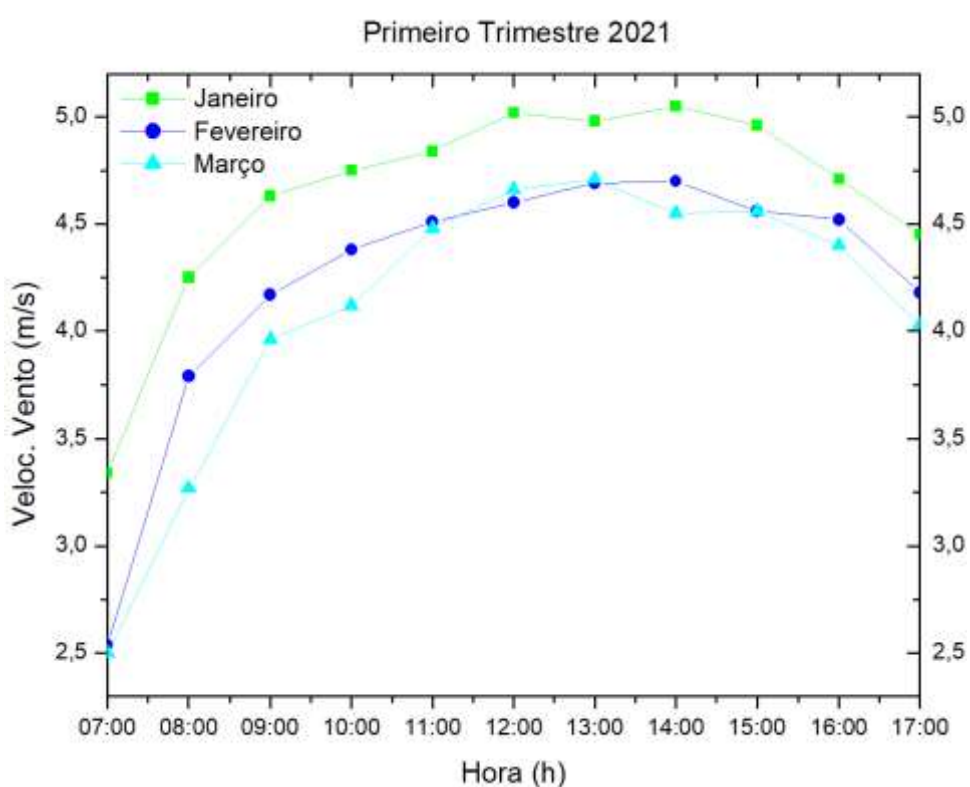


Figura 50. Velocidade do vento primeiro trimestre Natal.

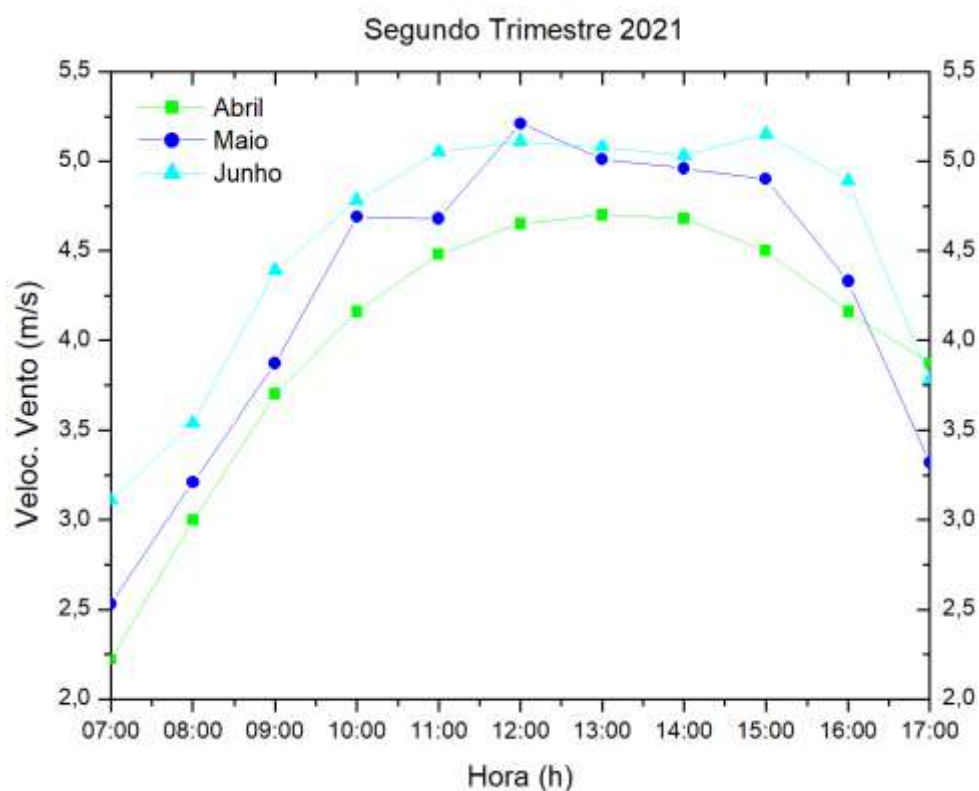


Figura 51. Velocidade do vento segundo trimestre Natal.

Para o primeiro trimestre de 2021 percebe-se que janeiro demonstrou velocidade média dos ventos superior ao longo de todo o dia, sendo inclusive o mês com maior velocidade média dos ventos (Tabela) com 4,63 m/s.

Quando observado o segundo trimestre o comportamento do vento é bastante diferente, com maio e junho alcançando a maior velocidade do vento em determinado momento entre às 07 e 17 horas. Na média total, junho obteve a maior média na da velocidade com 4,53 m/s. Maio por outro lado foi o mês com o maior desvio médio, com 0,88 m/s, em seguida abril com 0,78 m/s.

Tabela 4.22. Parâmetros estatísticos para a média de velocidade do vento para o primeiro semestre de 2021 para Natal.

1º Trimestre	Janeiro	Fevereiro	Março
Veloc. Vento Média (m/s) =	4,63	4,24	4,11
Desvio Padrão =	0,49	0,62	0,67
Desvio Padrão da Média =	0,14	0,18	0,20
Intervalo de Confiança (IC) =	4,63±0,14	4,24±0,18	4,11±0,20
2º Trimestre	Abril	Maiο	Junho
Veloc. Vento Média (m/s) =	4,01	4,24	4,53
Desvio Padrão =	0,78	0,88	0,72
Desvio Padrão da Média =	0,23	0,26	0,21
Intervalo de Confiança (IC) =	4,01±0,23	4,24±0,26	4,53±0,21

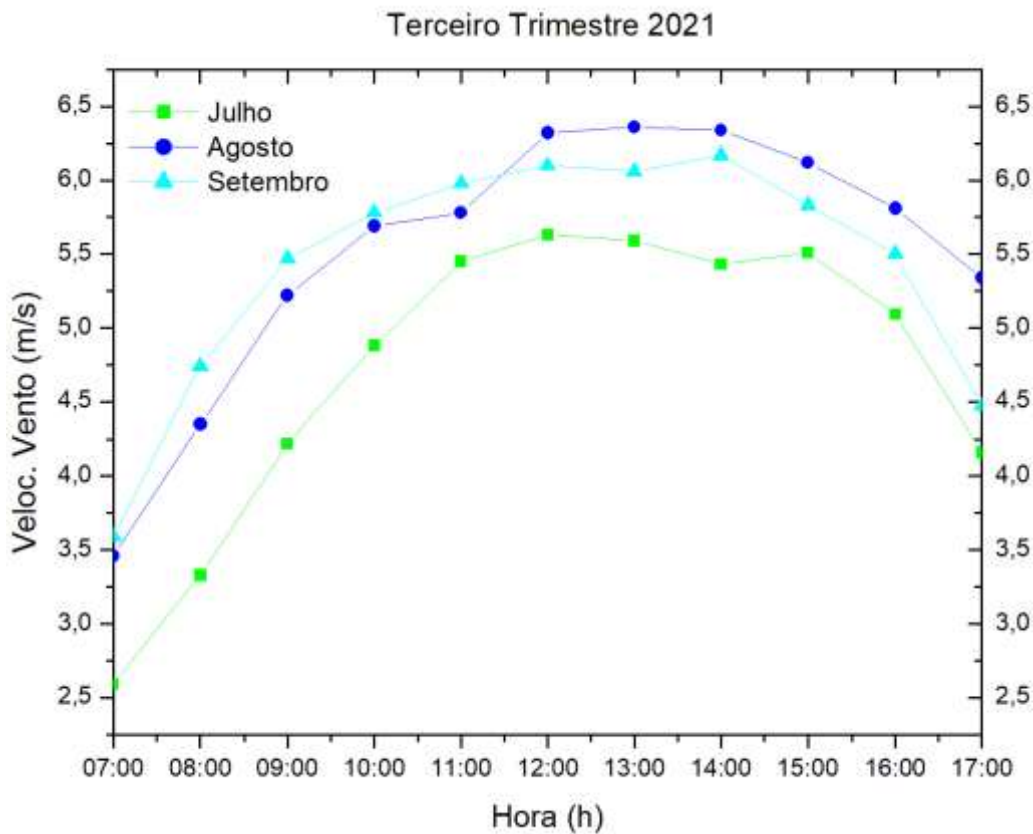


Figura 52. Velocidade do vento terceiro trimestre Natal.

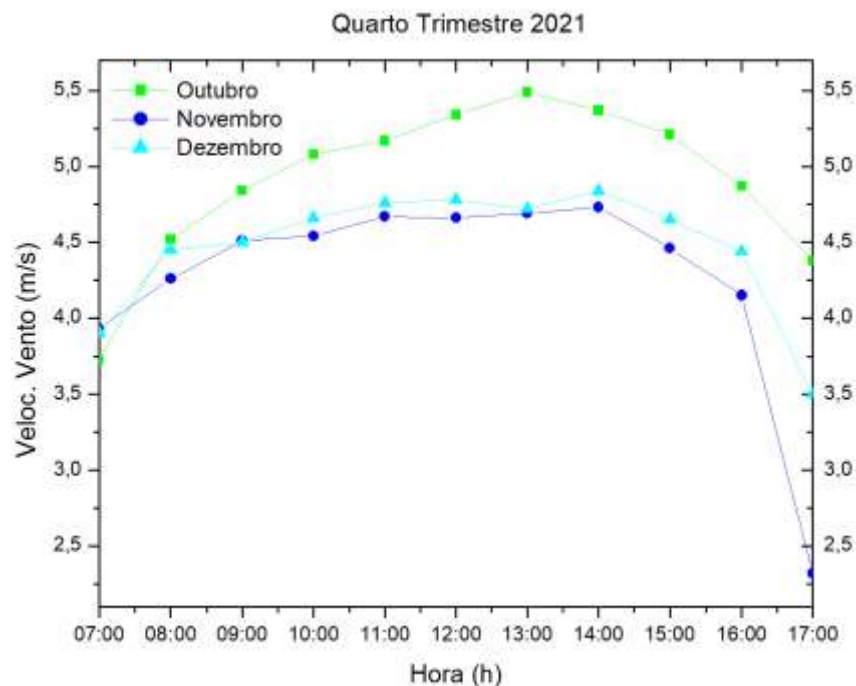


Figura 53. Velocidade do vento quarto trimestre Natal.

O segundo semestre demonstrado nas figuras Figura 52 e Figura 53 tem as maiores velocidades médias dos ventos do período observado para Natal. Com setembro e outubro com 5,42 m/s e 5,52 m/s respectivamente. Até mesmo último trimestre do ano demonstra valores acima do primeiro trimestre com outubro alcançando 4,90 m/s. O mês com maior desvio padrão foi julho, seguido por agosto 1,02 m/s e 0,91 m/s em todo o ano (Tabela).

Tabela 4.23. Parâmetros estatísticos para a média da velocidade do vento para o segundo semestre de 2021 para Natal.

3º Trimestre	Julho	Agosto	Setembro
Veloc. Vento Média (m/s) =	4,71	5,52	5,42
Desvio Padrão =	1,02	0,91	0,82
Desvio Padrão da Média =	0,30	0,27	0,24
Intervalo de Confiança (IC) =	4,71±0,3	5,52±0,27	5,42±0,24
4º Trimestre	Outubro	Novembro	Dezembro
Veloc. Vento Média (m/s) =	4,90	4,26	4,47
Desvio Padrão =	0,52	0,69	0,41
Desvio Padrão da Média =	0,15	0,20	0,12
Intervalo de Confiança (IC) =	4,9±0,15	4,26±0,20	4,47±0,12

Quando observado os dozes meses, percebeu-se um pico na velocidade do vento entre os meses de agosto, setembro e outubro, comportamento diferente do observado em Salvador.

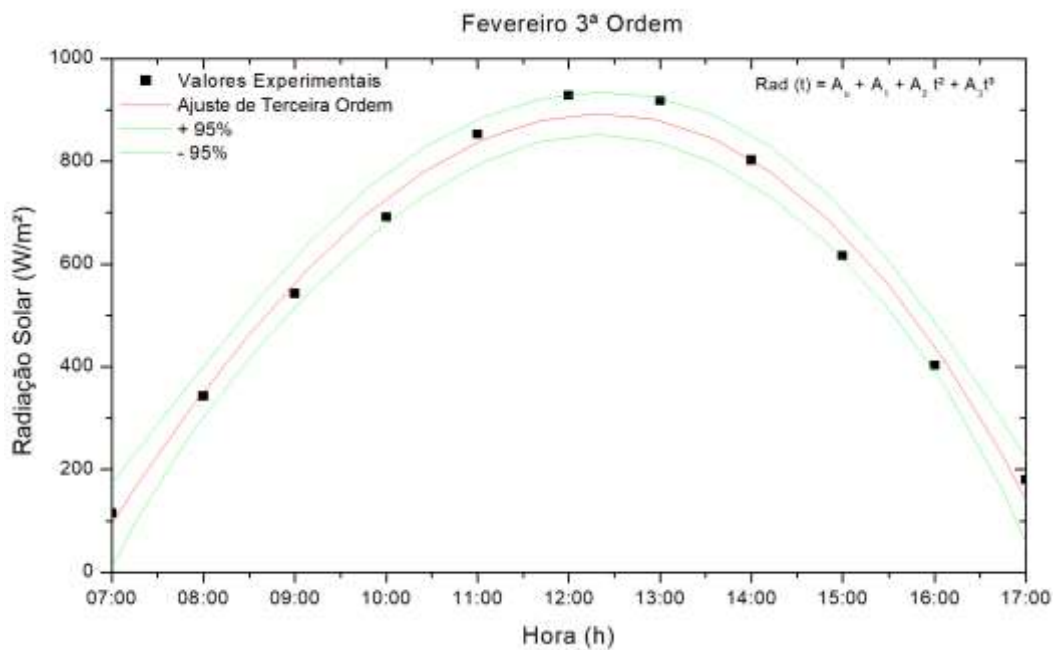
4.7.4. VALIDAÇÃO POR COMPARAÇÃO

Da mesma forma que foi realizado em Salvador, a comparação dos resultados previstos com os resultados medidos foi validada através da, escolhendo agora para Natal o mês com a maior radiação solar do primeiro semestre (fevereiro) e o do segundo semestre (outubro). O intervalo de confiança escolhido foi de 95%, obtendo assim as métricas de incertezas e utilizando o modelo matemático proposto por Gauss-Jacobi para os meses observados.

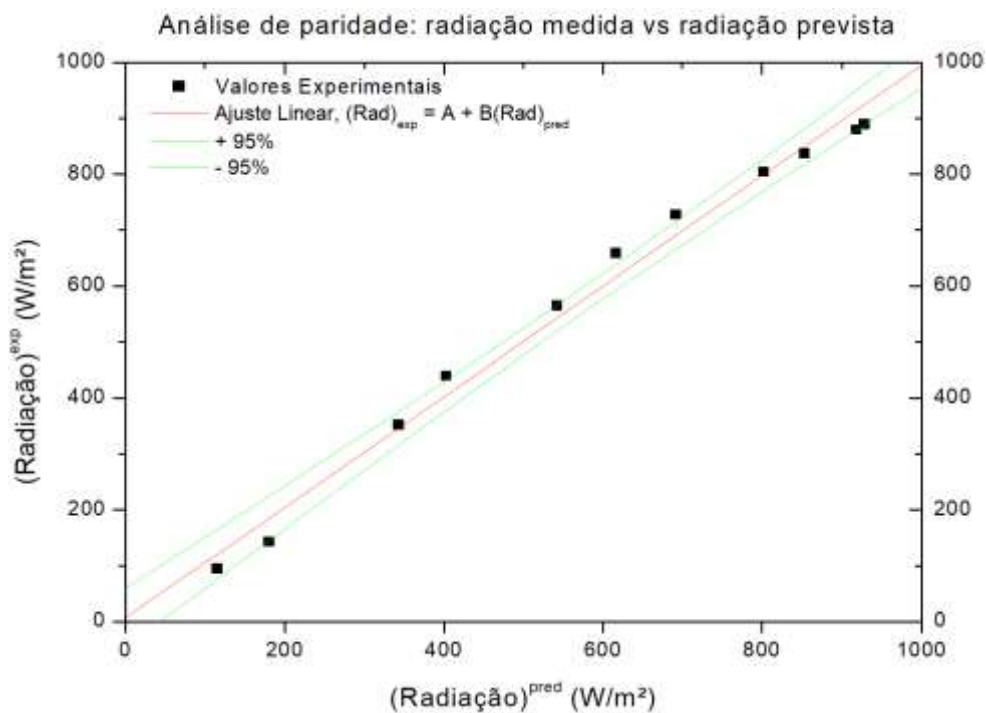
Os parâmetros estatísticos observados foram: o coeficiente de correlação de Pearson (R_p), coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e Raiz quadrada do erro quadrado médio (REQM). Essas métricas estatísticas garantem os resultados previstos dos modelos propostos.

4.7.4.1. PRIMEIRO SEMESTRE (FEVEREIRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM

Utilizando o limite de confiança de 95%, a radiação estimada para fevereiro foi $Rad = 621,25 \pm 85,72$. A Figura 54Figura 32 demonstra o ajuste da radiação solar para fevereiro ajustado com um modelo de terceira ordem e um intervalo de confiança de 95%. Os valores experimentais medidos ficaram dentro do intervalo de confiança. Nota-se que o modelo escolhido mostra os dados medidos e as métricas estatísticas (Tabela Tabela). Também há um diagrama de paridade com um intervalo de confiança de 95% da radiação solar medida com a radiação solar simulada.



(a)



(b)

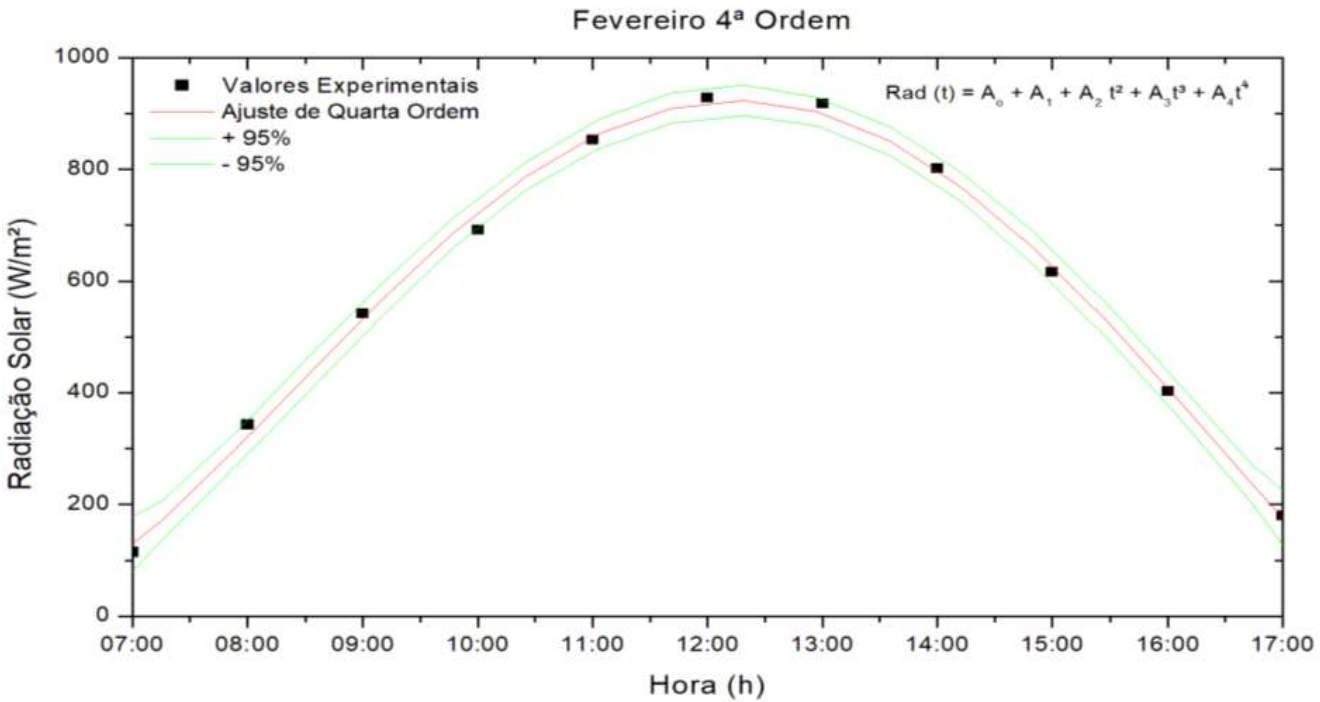
Figura 54. (a) Resultados da radiação solar do mês fevereiro ajustados com um modelo de terceira ordem; (b) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de terceira ordem.

Tabela 4.24. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear.

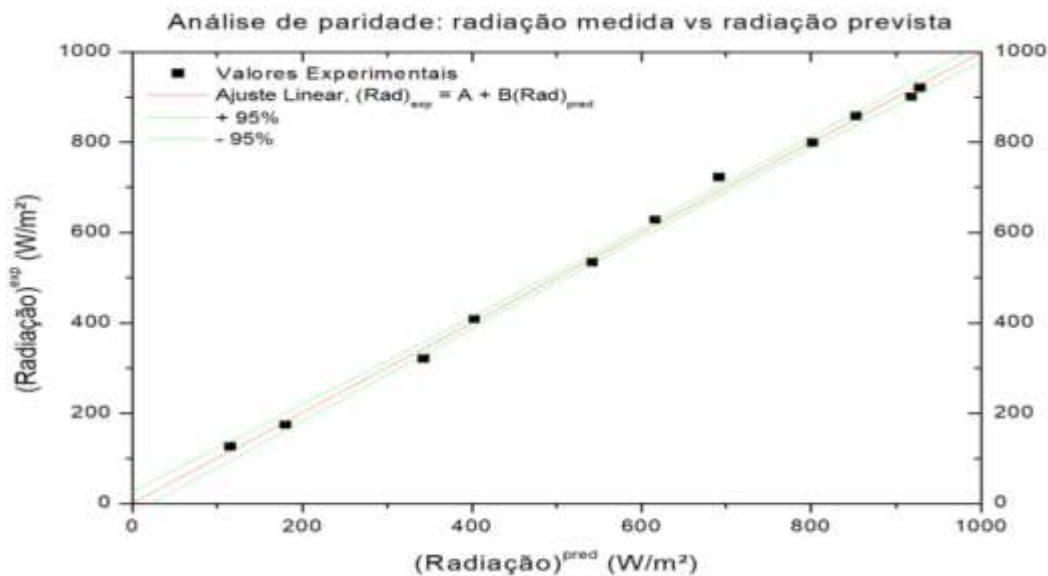
	$R_{ad} = -540,86 + 353,50 t - 16,55 t^2 - 0,67 t^3$
Índices. Estatísticos	$R^2 = 0,987 ; R_{ajst}^2 = 0,982$
	$(R_{rad})^{exp.} = 6,67 + 0,98 (R_{rad})^{pred}$
Índices. Estatísticos	$R = 0,993$

4.7.4.2. PRIMEIRO SEMESTRE (FEVEREIRO): MODELO DE QUARTA ORDEM

Como dois métodos foram escolhidos, também foi elaborado um modelo de análise de quarta ordem para fevereiro (Figura 55) com as métricas estatísticas contidas na Tabela 7. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta com o mesmo intervalo de confiança, 95%. O objetivo de utilizar outro modelo foi analisar o ajuste as medidas experimentais da radiação solar. O modelo de quarta ordem produziu bons resultados, melhores que o modelo de terceira ordem, com todos os valores experimentais dentro do intervalo de confiança. Também foi elaborado um diagrama de paridade com a radiação solar medida e a radiação solar simulada para o mês de fevereiro, utilizando a análise de quarta ordem (Figura 55).



(c)



(d)

Figura 55. (c) Resultados da radiação solar do mês fevereiro ajustados com um modelo de quarta ordem; (d) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de quarta ordem.

Tabela 7. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear.

Índices. Estatísticos	$R_{ad} = 3,80 - 92,53 t + 100,84 t^2 - 12,89 t^3 + 0,43 t^4$
	$R^2 = 0,997 ; R^2_{ajst} = 0,995$
Índices. Estatísticos	$(R_{rad})^{exp.} = 1,54 + 0,99 (R_{rad})^{pred}$
	$R = 0,998$

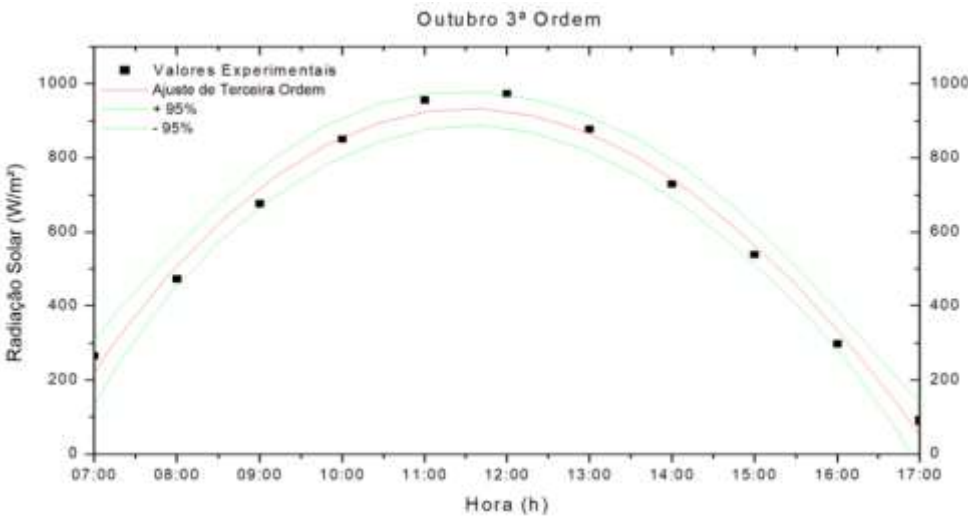
4.7.4.3. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE TERCEIRA ORDEM

Outubro foi o mês do ano com maior radiação. Com o limite de confiança de 95%, a radiação estimada para outubro foi $Rad = 663,36 \pm 82,42$. O valor real da radiação está dentro desse intervalo.

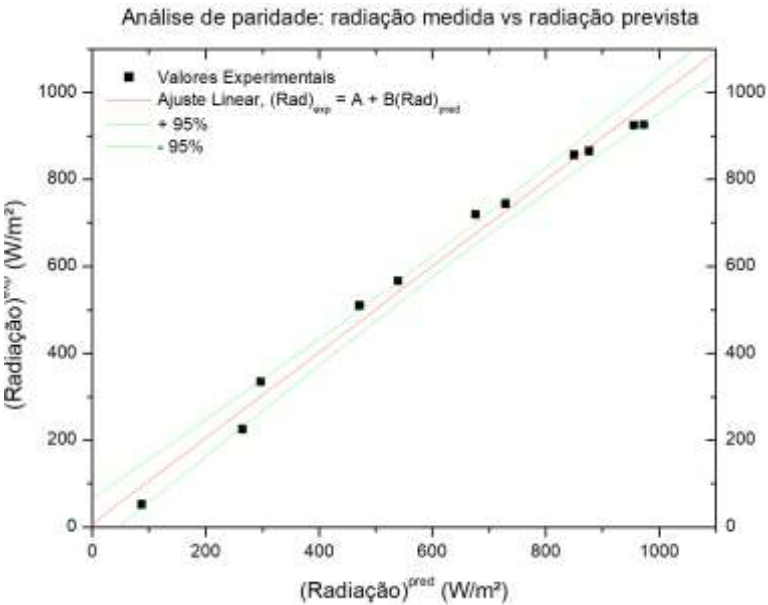
A Figura 56 contém o ajuste da radiação solar para outubro ajustado com um modelo de terceira ordem e um intervalo de confiança de 95%, apenas um dos valores experimentais ficou fora do intervalo de confiança, diferente do que aconteceu com a análise de terceira ordem de fevereiro. Também na mesma figura foi elaborado um diagrama de paridade demonstrando a relação da radiação solar medida com a radiação solar simulada. As métricas estatísticas estão contidas na Tabela

Tabela 4.26. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de terceira ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear..

	$R_{ad} = -587,67 + 485,94 t - 42,23 t^2 - 0,51 t^3$
Índices. Estatísticos	$R^2 = 0,987 ; R_{ajst}^2 = 0,981$
	$(R_{rad})^{exp.} = 7,86 + 0,98 (R_{rad})^{pred}$
Índices. Estatísticos	$R = 0,993$



(e)

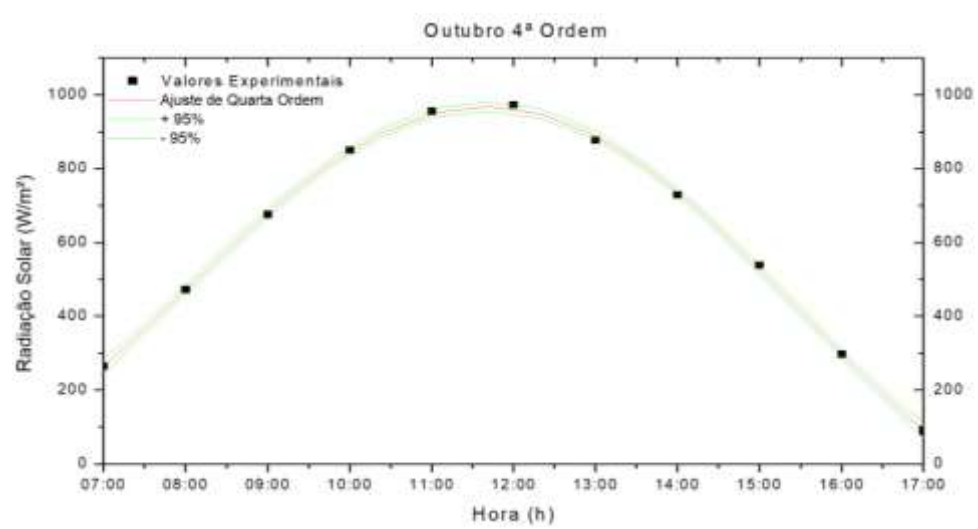


(f)

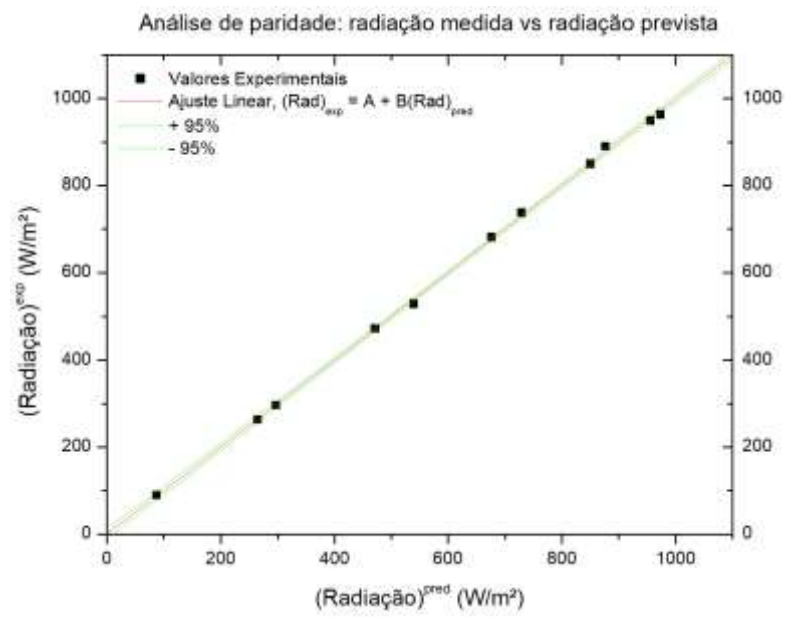
Figura 56. (a) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um modelo de terceira ordem; (b) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de terceira ordem.

4.7.4.4. SEGUNDO SEMESTRE (OUTUBRO): MODELO DE QUARTA ORDEM

A Figura 57 contém a análise de quarta ordem para outubro. Demonstrou melhores resultados, com todos os valores experimentais dentro do intervalo de confiança, mais uma vez determinado 95%. Na mesma figura novamente foi colocado o diagrama de paridade entre a radiação solar medida e a radiação solar simulada, com apenas um valor experimental fora do intervalo de segurança. Após a análise foim elaborada a Tabela com as métricas estatísticas da análise de quarta ordem e do diagrama de paridade.



(g)



(h)

Figura 57. (a) Resultados da radiação solar do mês outubro ajustados com um modelo de quarta ordem; (b) Diagrama de paridade da radiação solar medida e radiação solar prevista pelo modelo de quarta ordem.

Tabela 4.27. Indicadores estatísticos para o ajuste do modelo matemático de quarta ordem e indicadores estatísticos dos resultados medidos e previstos usando um modelo regressão linear.

	$R_{ad} = 70,47 - 48,12 t + 98,33 t^2 - 14,12 t^3 + 0,52 t^4$
Índices. Estatísticos	$R^2 = 0,999 ; R^2_{ajst} = 0,999$
	$(R_{rad})^{exp.} = 0,33 + 0,99 (R_{rad})^{pred}$
Índices. Estatísticos	$R = 0,999$

4.7.4.5. RADIAÇÃO TOTAL E MÉDIA DA RADIAÇÃO POR DIA

A Figura 58 contém a radiação solar total média e a média da radiação solar do dia em cada mês do período observado. Existe uma variação entre os meses, com alguns demonstrando uma alta radiação solar (setembro a novembro) e outros (maio a julho) demonstrando um período de baixa radiação solar. O mesmo comportamento pode ser perceptível na média da radiação por dia nesses meses. No primeiro semestre fevereiro tem a maior radiação solar e no segundo semestre outubro, tanto em radiação total quanto em radiação média diária.

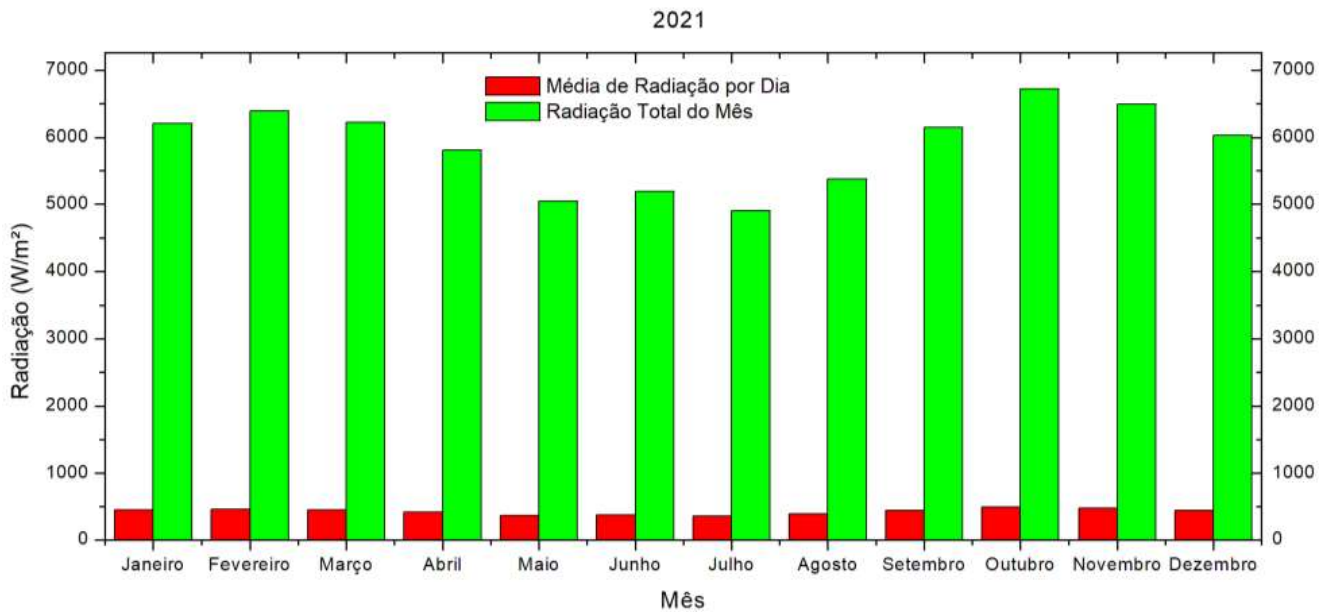


Figura 58. Radiação solar total média do mês e radiação solar total média do dia.

4.7.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA

Utilizando o mesmo princípio de que a cidade de Salvador, com o mesmo módulo padrão definido anteriormente obteve-se na Figura 59 a energia verde produzida por esse módulo durante o período

observado, ressaltando que para Salvador o intervalo observado foi entre 07 e 17 horas, diferente de Salvador (06 às 18h) pois houve perda de dados na estação meteorológica responsável. A radiação solar demonstra novamente ser a característica principal quando observamos a energia produzida por um módulo fotovoltaico durante o período observado. A Produção de Energia Estimada (PEE) foi calculada utilizando a radiação solar média do mês em um dia. Quanto maior a radiação solar média diária, maior será a energia produzida. Os meses com maior PEE foram: outubro $4,415 \times 10^5$ W, novembro $4,270 \times 10^5$ W e fevereiro $4,172 \times 10^5$ W. Enquanto os meses com menor PEE foram: junho $3,377 \times 10^5$ W, maio $3,282 \times 10^5$ W e julho $3,190 \times 10^5$ W.

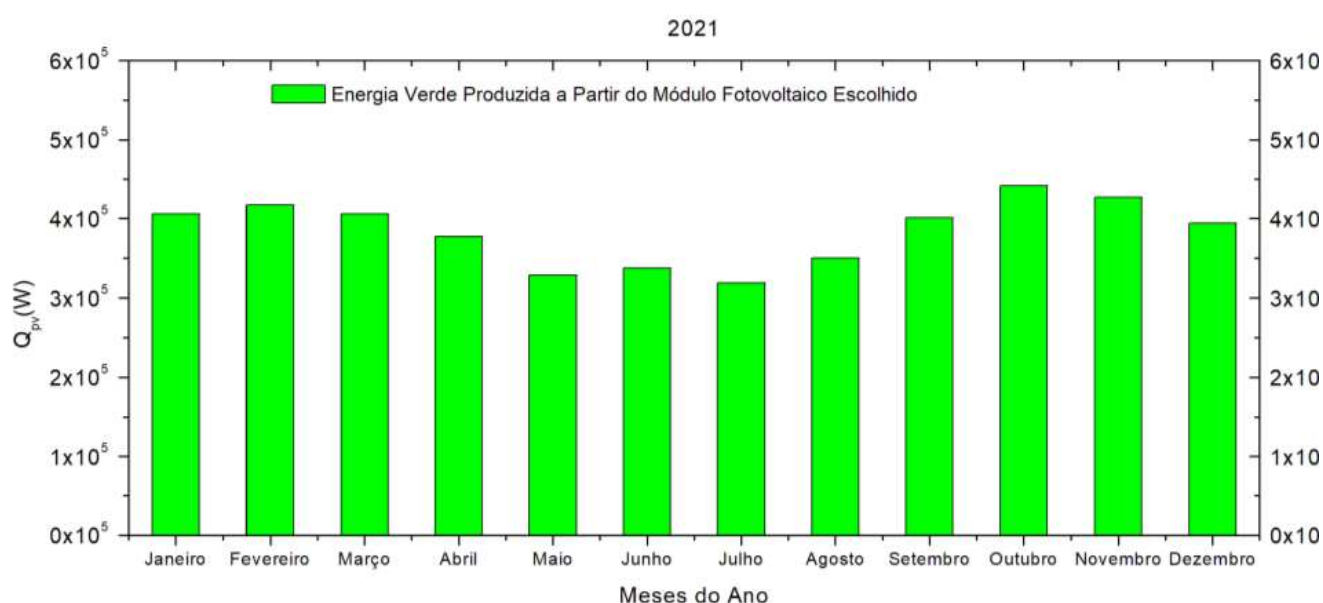
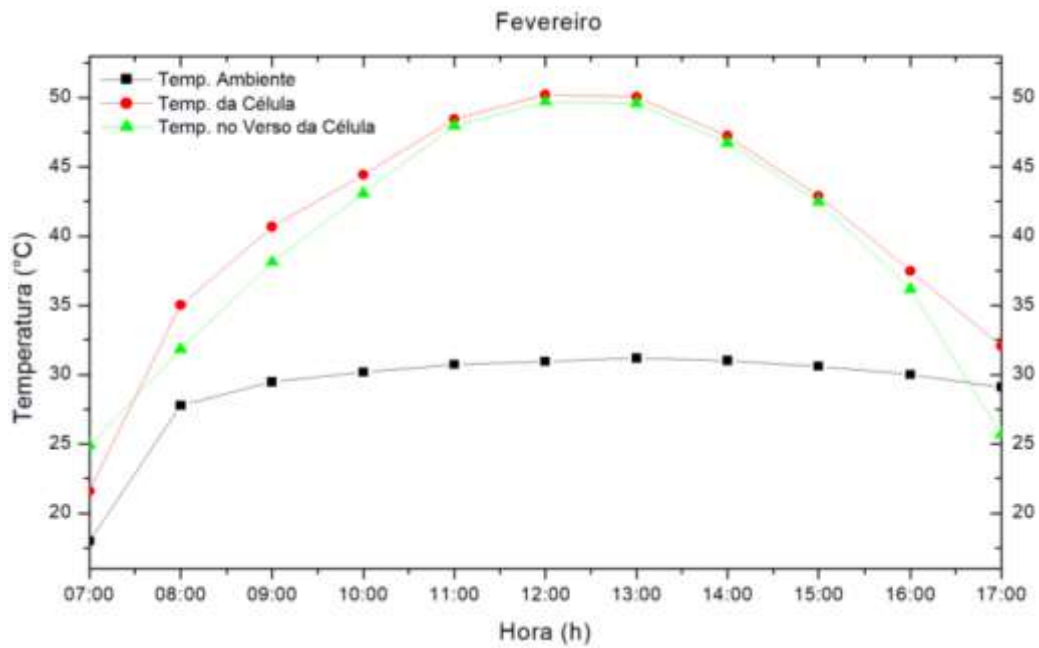


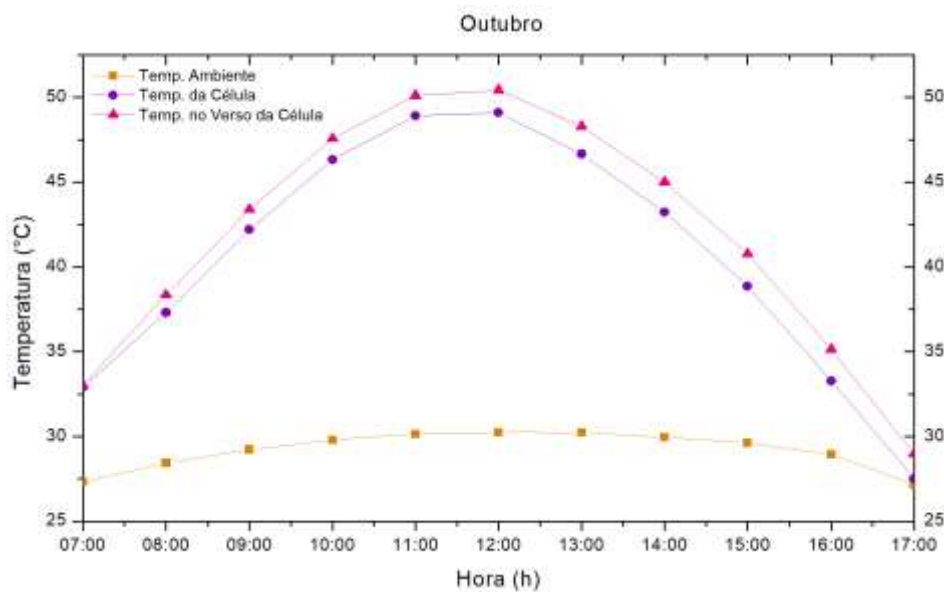
Figura 59. Energia verde produzida a partir do módulo fotovoltaico escolhido utilizando a radiação solar total média.

4.7.6. COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS

A Figura 60 demonstrar o perfil das temperaturas da célula (Tcell), temperatura no verso da célula (Tb) e temperatura ambiente (Ta) de fevereiro e outubro para Salvador. Em ambos os casos a Tcell mostrou um valor maior que Tb em fevereiro e em outubro a Tb foi maior em todo mês. Em alguns momentos, chegam ao dobro de Ta. Essa pequena diferença entre Tcell e Tb é causada pela dissipação do calor por condução entre a placa fotovoltaica e a camada de vidro. O ponto máximo dos gráficos fica em torno de 12 horas. Com as temperaturas em fevereiro chegando a: Ta = 30,96 °C, Tcell = 50,21 °C e Tb = 49,71 °C. E em outubro: Ta: 30,25 °C, Tcell = 49,10 °C e Tb = 50,42°C.



(i)



(j)

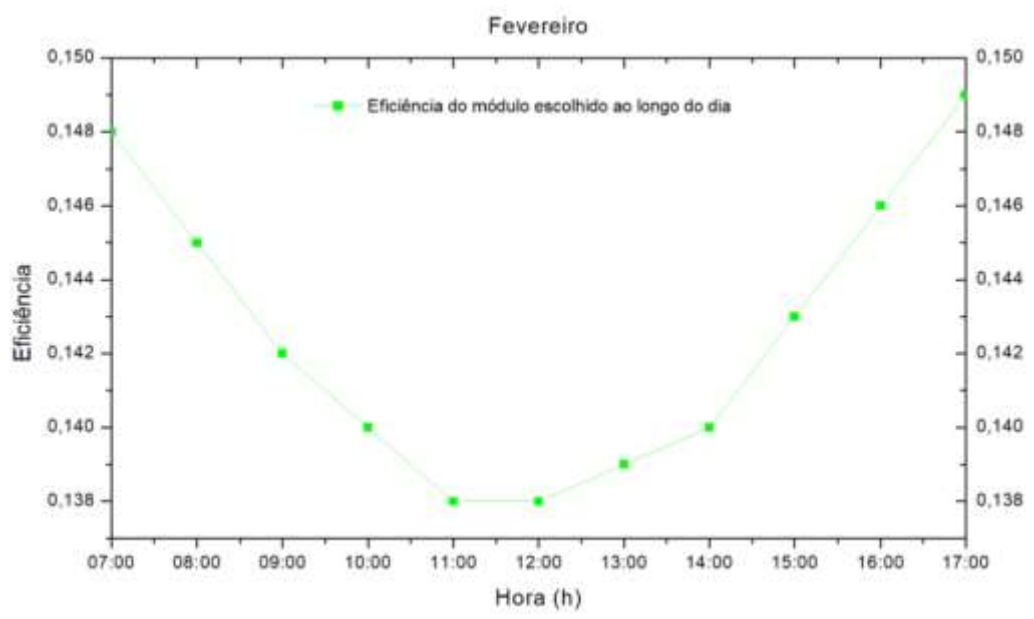
Figura 60. i) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para fevereiro. j) Comparação da temperatura da célula, temperatura do verso da célula e temperatura ambiente para outubro.

4.7.7. EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO

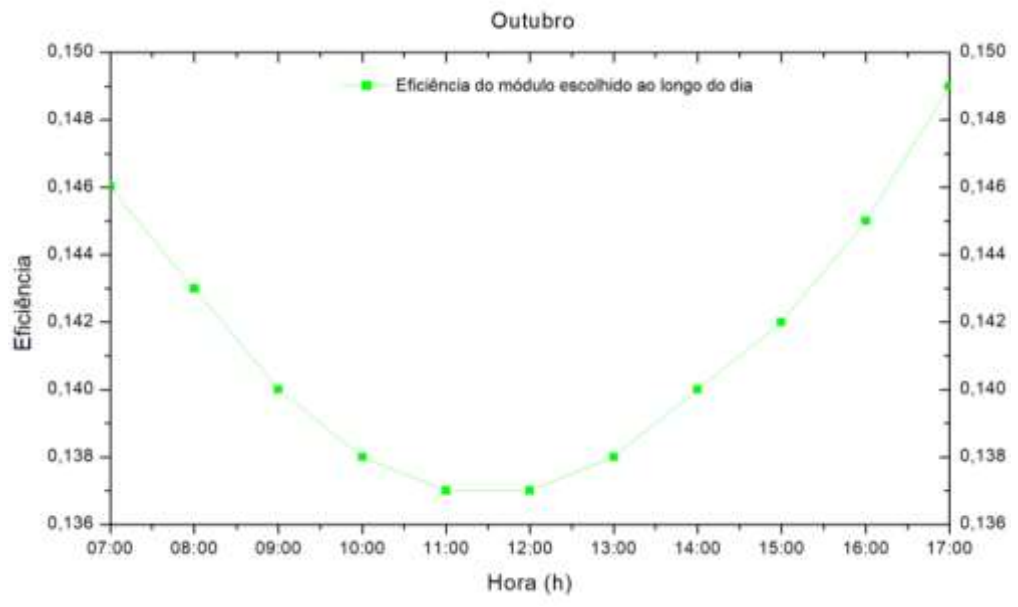
O perfil da eficiência elétrica (EE) do módulo escolhido para os meses de janeiro e outubro foi demonstrada na Figura 61 . Utilizou a Tcell determinada anteriormente para os meses observados e

algumas características da placa definidas pelo próprio fabricante como: β_{ref} (coeficiente de temperatura de referência), T_{ref} (temperatura de referência) e η_{ref} (rendimento de referência).

A T_{cell} impacta de forma direta no rendimento, à medida que T_{cell} cresce, o EE decresce. O ponto mínimo alcançado está em torno de 12 horas com uma EE entre 13,8% em fevereiro e 13,7% em outubro. A EE da placa escolhida varia entre 14,9% a 13,8% em fevereiro e 14,9% a 13,7% em outubro.



(k)



(l)

Figura 61. a) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para fevereiro. b) Perfil da eficiência do módulo fotovoltaico escolhido para outubro.

CAPÍTULO 5

5.1. CONCLUSÕES

A pesquisa foi conduzida com base em métricas estatísticas utilizando dados observados por um período da radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento de duas cidades. Com modelos de regressão polinomial foi possível realizar a comparação dos dados e com a metodologia inversa foi possível estimar parâmetros futuros com base em dados passados, tudo dentro de um intervalo de confiança de 95%. A metodologia inversa tem como objetivo estimar o erro entre os dados climáticos, medidos experimentalmente, e os valores calculados usando os modelos de regressões. Com base nos dados observados e gerados, chegou-se as seguintes conclusões:

1. Foi realizada a análise dos perfis trimestrais para radiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento no ano de 2021 para Salvador e Natal. Para a radiação solar, foram avaliados os seguintes parâmetros estatísticos: média aritmética da amostra, desvio padrão da amostra, desvio padrão da média e intervalo de confiança. Da mesma forma que foram estimados a temperatura ambiente e velocidade do vento.
2. Para a validação do trabalho foram escolhidos os meses com maior radiação por semestre, de cada cidade. Logo para Salvador foram escolhidos os meses janeiro e outubro e para Natal fevereiro e outubro. Dentro desses quatro meses escolheu outubro para o comparativo entre as cidades. Dois modelos de regressão polinomial (terceira e quarta ordem) foram utilizados para validar os dados. Os dados estatísticos de outubro das duas cidades podem ser consultados na Tabela e Tabela . Para verificar os dados medidos com os dados estimados foram utilizados ajustes de regressão linear, através do modelo de regressão polinomial. Os indicadores estatísticos da análise linear constam na Tabela - Tabela , reforçar-se que o intervalo de confiança em todo estudo foi de 95%.

Tabela 5.1. Dados estatísticos regressão polinomial Salvador – outubro.

Modelo de terceira ordem	Modelo de quarta ordem
$R_{ad} = -311,99 + 275,06 t - 15,60 t^2 - 0,31 t^3$	$R_{ad} = -36,62 + 21,22 t + 71,7 t^2 - 9,76 t^3 + 0,33 t^4$
$R^2 = 0,965 ; R^2_{ajust} = 0,954$	$R^2 = 0,988 ; R^2_{ajust} = 0,982$

Tabela 5.2. Dados estatísticos regressão polinomial Natal – outubro.

Modelo de terceira ordem	Modelo de quarta ordem
$R_{ad} = -581,67 + 485,94 t - 42,23 t^2 - 0,51 t^3$	$R_{ad} = 70,47 - 48,12 t + 98,33 t^2 - 14,12 t^3 + 0,52 t^4$
$R^2 = 0,987 ; R^2_{ajust} = 0,981$	$R^2 = 0,999 ; R^2_{ajust} = 0,999$

Tabela 5.3. Dados estatísticos regressão linear Salvador – outubro.

Regressão linear (terceira ordem)	Regressão linear (quarta ordem)
$(R_{ad})^{exp.} = 14,53 + 0,95 (R_{ad})^{pred.}$ $R = 0,982$	$(R_{ad})^{exp.} = 5,11 + 0,98 (R_{ad})^{pred.}$ $R = 0,993$

Tabela 5.4. Dados estatísticos regressão linear Natal – outubro.

Regressão linear (terceira ordem)	Regressão linear (quarta ordem)
$(R_{ad})^{exp.} = 7,86 + 0,98 (R_{ad})^{pred.}$ $R = 0,982$	$(R_{ad})^{exp.} = 0,33 + 0,99 (R_{ad})^{pred.}$ $R = 0,990$

- Um importante vetor no cálculo da produção de energia estimada (PEE) é a radiação solar total média. Que é influenciada diretamente pelo rendimento do módulo fotovoltaico escolhido, uma vez que a eficiência oscila ao longo do dia, a PEE também oscila. Para Natal os meses com maior PEE foram fevereiro com $4,172 \times 10^5$ W e outubro com $4,415 \times 10^5$ W e para Salvador foram janeiro $4,719 \times 10^5$ W e outubro com $4,259 \times 10^5$ W. Nota-se que por média, Salvador apresenta uma maior capacidade de produção de energia.
- A eficiência energética (EE) varia ao longo do dia, quando maior a Tcell menor é a eficiência, além de ter como fator determinante a limitação da placa solar escolhida. Para Natal o ponto mínimo alcançado está em torno de 12horas com uma EE variando entre 14,9% a 13,8% em fevereiro e 14,9% a 13,7% em outubro, demonstrando que nos meses com maior radiação, a eficiência foi próxima. Mesmo que a PEE sendo diferente. Já em Salvador o ponto mínimo da EE foi determinado em torno de 13h, com uma EE em janeiro variando entre 14,17% a 13,4% em outubro e 14,7% a 13,6%.

Mesmo janeiro apresentando uma maior PEE, nota-se que a EE é maior em outubro.

Este trabalho traz consigo a possibilidade de ser utilizado para comparar outras cidades, através dos passos adotados pelo pesquisador. Com os resultados obtidos é possível determinar qual cidade se torna mais rentável do ponto de vista de produção de energia através de módulo fotovoltaico (através da produção estimada de energia elétrica), seja on-grid (na rede) ou off-grid (com baterias).

Como exemplo, caso uma empresa queira instalar uma fazenda solar (ou um cliente qualquer) em abas as cidades estudas, poderá ter um norte com base nos dados estimados.

Um aproveitamento e melhoramento futuro desse trabalho poderá ser a inserção de outras grandezas observadas, outras cidades ou até mesmo um período maior de observação, aumentando a confiança dos dados estimados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Li W., Ling Y., Liu X., Hao Y., 2017. Performance analysis of a photovoltaicthermochemical hybrid system prototype. *Applied Energy* 204, 939-947.
2. Tiwari G. N., Mishra R. K., Solanki S. C., 2011. Photovoltaic modules and their applications: A review on thermal modelling. *Applied Energy* 88, 2287-2304.
3. Yang L., Gao X., Li Z., Jia D., 2022. Quantitative effects of air pollution on regional daily global and diffuse solar radiation under clear sky conditions. *Energy Reports* 8: 1935-1948.
4. El Mghouchi Y., 2022. On the prediction of daily global solar radiation using temperature as input. An application of hybrid machine learners to the six climatic Moroccan zones. *Energy Conversion and Management: X13* (2022): 100157.
5. Ji Y., Song J., Shen P., 2022. A review of studies and modelling of solar radiation on human thermal comfort in outdoor environment. *Building Environment* 214: 108891.
6. Wang H., An C., Duana M., Su J., 2020. Transient thermal analysis of multilayer pipeline with phase change material. *Appl. Ther. Eng.* 165, 114512.
7. Gaaloul N., Daouas N., 2018. An extended approach of a Kalman smoothing technique applied to a transient nonlinear two-dimensional inverse heat conduction problem. *Inter. J. Ther. Sci.* 134, 224-241.
8. Soler-Castillo Y., Magnífico I., 2022. Sun's rays in the PV modules energy yield estimations to improve the energy conversion description. *Energy Reports* 8: 3559-3588.
9. Babatunde O. M., J.L. Munda J. L., Hamam Y., 2022. Off-grid hybrid photovoltaic - micro wind turbine renewable energy system with hydrogen and battery storage: Effects of sun tracking technologies. *Energy Conversion Management* 255: 115335.
10. Gupta M., Bhatnagar A., Dubey A. K., Kumar V., Mehta D S., 2022. Dual Fresnel lens and segmented mirrors based efficient solar concentration system without tracking sun for solar thermal energy generation. *Energy Sustainable Development* 66: 201-208.
11. Kratschmann M., Dütschke E., 2021. Selling the sun: A critical review of the sustainability of solar energy marketing and advertising in Germany. *Energy Research Social Science* 73: 101919.
12. BRAGA, Pereira Renata. *ENERGIA solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações*. 2019. TCC (Graduação) - Graduação, Rio de Janeiro, 2019.
13. Soto E. A., Arakawa K., Bosman L. B., 2022. Identification of target market transformation efforts for solar energy adoption. *Energy Reports* 8: 3306-3322.
14. Çelik O., McInnes C. R., 2022. An analytical model for solar energy reflected from space with selected applications. *Advances in Space Research* 69: 647-663.
15. Zhou X., Tian S., An J., Yan D., Zhang L., Yang J., 2022. Modeling occupant behavior's influence on the energy efficiency of solar domestic hot water systems. *Applied Energy* 309: 118503.
16. Ouhammou B., Gargab F. Z., Frimane Â., Mohammed A., Jamil A., Kousksou T., 2022. Modeling of a bio-methane solar system driven by solar energy and heat pump. *Biomass Bioenergy* 158: 106378.

17. Rivero M. A., Rodrigues D., Pinheiro C. I. C., J.P. Cardoso J. P., Mendes L. F., 2022. Solid-gas reactors driven by concentrated solar energy with potential application to calcium looping: A comparative review. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 158: 112048.
18. PORTAL SOLAR. Top 7 países que mais usam energia solar. 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/top-7-paises-que-mais-usam-energia-solar>. Acesso em: 05 abr. 2023.
19. MACHADO, C. T.; Miranda, F.S. Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão. *REV. Virtual Quim*, 2015, 7(1), 126-143. Data publicação na web: 14/10/2014.
20. Anand B., Shankar R., Murugavel S., Rivera W., Midhun Prasad K., Nagarajan R., 2021. A review on solar photovoltaic thermal integrated desalination technologies. *Renew. Sust. Energy Reviews* 141, 110787.
21. Li W., Ling Y., Liu X., Hao Y., 2017. Performance analysis of a photovoltaic thermochemical hybrid system prototype. *Applied Energy* 204: 939-947.
22. Joy B., Philip J., Zachariah R., 2016. Investigations on serpentine tube type solar photovoltaic/thermal collector with different heat transfer fluids: Experiment and numerical analysis. *Solar Energy* 140: 12-20.
23. ALVARENGA, Carlos Alberto. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA. UFLA, Minas Gerais, 2004.
24. Canal Solar. Filmes finos CIGS: uma alternativa ao silício cristalino. Canal Solar, [S.l.], 20 maio 2023. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/filmes-finos-cigs-uma-alternativa-ao-silicio-cristalino/>. Acesso em: 20 maio 2023.
25. SILVA, José Marcelo da. Método para Estimação de Parâmetros para Melhorar a Precisão da Geração Fotovoltaica do Setor Elétrico; Início: 2019; Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) - Universidade de Pernambuco (UPE)-Escola Politécnica (POLI).
26. Vaishak S., Bhale P. V., 2021. Investigation on the effect of different backsheet materials on performance characteristics of a photovoltaic/thermal (PV/T) system. *Renew Energy* 168, 160-169. 66.
27. Dai Y., Bai Y., Keller T., 2022. Thermal and mechanical performances of GFRP sandwich structures with integrated amorphous silicon photovoltaic cells. *Composite Structures* 290, 115524.
29. NOVA célula solar tem eficiência de 44,5%. In: SolarFast. [S. l.], 25 fev. 2018. Disponível em: <https://www.solarfast.it/pt-br/nova-celula-solar-tem-eficiencia-de-445-a-maior-do-mundo/>. Acesso em: 5 abr. 2023.
30. High-Efficiency Perovskite Solar Cells Jin Young Kim, Jin-Wook Lee, Hyun Suk Jung, Hyunjung Shin, and Nam-Gyu Park *Chemical Reviews* 2020 120 (15), 7867-7918 DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c00107.
31. PORTAL ENERGIA. Painéis Solares mais eficientes. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/paineis-solares-mais-eficientes/>. Acesso em: 05 abr. 2023.
32. Meteoropole. Actinógrafo e Heliógrafo: dois instrumentos que medem grandezas relacionadas à luz solar. Meteoropole, [S.l.], 2016. Disponível em:

<https://meteoropole.com.br/2016/07/actinografo-e-heliografo-dois-instrumentos-que-medem-grandezas-relacionadas-a-luz-solar/>. Acesso em: 20 maio 2023.

33. Dallacort, R., Ricieri, R. P., Silva, S. de L., Freitas, P. S. L. de, & Silva, F. F. da. (2008). Análises do comportamento de um actinógrafo bimetalico (R. Fuess-Berlin-Steglitz) em diferentes tipos de cobertura do céu; - DOI: 10.4025/actasciagron.v26i4.1800. Acta Scientiarum. Agronomy, 26(4), 413-420.
34. Queiroz, Israel Garcia de et al. Calibração e validação de um método de medida da radiação solar global por meio de actinógrafos baseada em técnicas de processamento de imagens digitais. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 16, n. 2012, p. 1193-1199, 2012.
35. CALIBRAÇÃO DE PIRANÔMETRO: SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA. Disponível em: <https://unimetro.com.br/calibracao-de-piranometro-sensor-de-radiacao-solarestacao-meteorologica/>. Acesso em: 20 maio 2023.
36. SANTOS, José Vicente Cardoso; AYLAS, Georgynio Yossimar Rosales; ACIOLI, Palmira Maria de Santana; MARINHO, Chrislaine do Bomfim; MOREIRA, Davidson Martins; MORET, Marcelo Albano. AVALIAÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO E SOLAR COM CORRELAÇÕES DE LONGO ALCANCE EM SÉRIES TEMPORAIS EM SALVADOR. Instituto Federal Fluminense Búzios - RJ. 2018.
37. ONS - Operador Nacional do Sistema. CARGA E GERAÇÃO. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-agora/carga-e-geracao/>. Acesso em: 18 maio 2023.
38. MASCARENHAS, Bruno Severino; FILHO, Edson Pereira Marques; PEPE, Iuri Muniz; GOMES, Leonardo Rafael Teixeira Cotrim; OLIVEIRA, Amauri P.; FRANÇA, Jose Ricardo de Almeida. CARACTERIZAÇÃO DAS COMPONENTES DE RADIAÇÃO DE ONDA CURTA EM SALVADOR. UFBA. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar. Salvador - Bahia, 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/736>>.
39. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Tabela de Estações Meteorológicas. <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A001>. Acesso em: 05 abr. 2023.

Jornandes Dias da Silva
Thiago Maciel da Silva

 conhecimentolivre.org/home
 contato@conhecimentolivre.org
 [editoraconhecimentolivre](https://www.instagram.com/editoraconhecimentolivre)

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PARÂMETROS ENERGÉTICOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA E ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DE UM MÓDULO FOTOVOLTAICO