

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

EWERTON DE SOUZA MUNIZ

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA EFICIÊNCIA DOS
PAINÉIS SOLARES E MAPEAMENTO SOLARIMÉTRICO UTILIZANDO
MODELO ATMOSFÉRICO (WRF) PARA O ESTADO DE ALAGOAS**

Maceió,AL

2024

EWERTON DE SOUZA MUNIZ

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA EFICIÊNCIA DOS
PAINÉIS SOLARES E MAPEAMENTO SOLARIMÉTRICO UTILIZANDO
MODELO ATMOSFÉRICO (WRF) PARA O ESTADO DE ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Atmosféricas - ICAT da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior

Maceió,AL

2024

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Girlaine da Silva Santos – CRB-4 – 1127

M966i Muniz, Ewerton de Souza.

Influência das variáveis meteorológicas na eficiência dos painéis solares e mapeamento solarimétrico utilizando modelo atmosférico (wrf) para o Estado de Alagoas / Ewerton de Souza Muniz. – 2024.

40 f. : il. color.

Orientador: Rosiberto Salustiano da Silva Junior.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia : Bacharelado) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 36-40.

1. Radiação solar. 2. Energia solar. 3. Energia solar fotovoltaica - (AL). I. Título.

CDU: 551.521.11(813.5)

Folha de aprovação

EWERTON DE SOUZA MUNIZ

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NA EFICIÊNCIA DOS PAINÉIS SOLARES E MAPEAMENTO SOLARIMÉTRICO UTILIZANDO MODELO ATMOSFÉRICO (WRF) PARA O ESTADO DE ALAGOAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Atmosféricas – ICAT da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia, aprovada em 18 de novembro de 2024.

Documento assinado digitalmente



ROSIBERTO SALUSTIANO DA SILVA JUNIOR

Data: 26/11/2024 11:50:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador - Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior

Documento assinado digitalmente



ERICKA VOSS CHAGAS

Data: 26/11/2024 13:35:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Banca Examinadora:

Examinadora Interna - Dr. Ericka Voss Chagas

Documento assinado digitalmente



MARCOS ANTONIO LIMA MOURA

Data: 26/11/2024 08:03:46-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Interno - Dr. Marcos Antônio Lima Moura

Documento assinado digitalmente



LUAN SANTOS DE OLIVEIRA SILVA

Data: 26/11/2024 10:31:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Examinador Externo (SENAI/CIMATEC) - Bel. Luan Santos de Oliveira

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente aos meus pais Evilmerodach Muniz de Oliveira e Evandra Maria de Souza Muniz e a minha avó Mirian Lins de Souza pelo amor incondicional, os ensinamentos e a educação necessária por todo meu caminho até aqui.

Ao meu professor orientador Prof.Dr. Rosiberto Salustiano da Silva Junior pela paciência, gentileza e por todas as conversas no laboratório que me enriqueceram de forma profissional e humana.

A banca examinadora Profa.Dra.Ericka Voss Chagas, ao Prof.Dr. Marcos Antônio Lima Moura e ao Bel. Luan Santos de Oliveira Silva, pelos incentivos, sugestões e enriquecimento do trabalho.

A toda a equipe do LABMODEL que me ajudou a seguir esse caminho com mais alegria.

A todos meus amigos do bloco de Meteorologia/ICAT da UFAL, em especial, ao Bruno, a Brisa, a Luana, a Akza e ao Mattheus por proporcionarem momentos únicos durante a graduação.

E aos meus amigos mais presentes durante toda a vida Marcelo, Vagner, Winicius, Thiago, Álvaro e Nathan.

RESUMO

A utilização de energia fotovoltaica tem crescido bastante em escala global, uma vez que essa fonte de energia é crucial no combate às mudanças climáticas, já que reduz significativamente a emissão de CO₂, além de aproveitar a luz solar para geração de energia, que é um recurso abundante e inesgotável gerando eletricidade sem impactos negativos ao meio ambiente. A adoção de painéis solares contribui para a diversificação da matriz elétrica, com isso, o estudo do desempenho dos painéis fotovoltaicos está ganhando cada vez mais foco, já que com o cálculo da Taxa de Desempenho (PR), pode-se obter o verdadeiro desempenho do arranjo fotovoltaico. O PR foi calculado para avaliar a eficiência real do sistema em relação à sua capacidade nominal, onde foi utilizado um arranjo fotovoltaico instalado com microinversores, que de acordo com a literatura são os que obtêm melhores resultados de PR. Feita análise das variáveis meteorológicas, além de levar em consideração o efeito da sujeira no desempenho do arranjo fotovoltaico. A instalação obteve bons resultados, onde o valor médio do PR foi de acima de 80%. A partir da análise do desempenho, foi feito o desenvolvimento da equação fotovoltaica, que foi desenvolvida pelos modelos de regressão linear e regressão linear múltipla, utilizando a produção do arranjo fotovoltaico e as variáveis meteorológicas, onde a partir disto, foi feito um mapa espacial do potencial fotovoltaico utilizando a melhor equação desenvolvida, especializando os resultados a partir do modelo WRF-Solar. A correlação de resultados de PR em relação a Irradiação Solar e Temperatura do Ar forem inversamente proporcionais -0,76 e -0,74 respectivamente, já com umidade relativa do ar e precipitação, foram de 0,52 e 0,46 (com INMET) e 0,48 (com a EMA), essa correlação moderada se dá ao fato de ambas as variáveis serem responsáveis para o resfriamento do sistema, com isso aumentando o desempenho dos painéis fotovoltaicos. Com a espacialização do mapa fotovoltaico, foram encontrados valores de 2,4 kWh/kWp à 4,8 kWh/kWp ao longo de todo estado.

Palavra-Chave: Energia fotovoltaica, taxa de desempenho, equação fotovoltaica.

ABSTRACT

The use of photovoltaic energy has been growing significantly on a global scale, as this energy source is crucial in combating climate change by reducing CO₂ emissions. Additionally, it harnesses solar light to generate energy, a resource that is abundant and inexhaustible, producing electricity with no negative environmental impacts. The adoption of solar panels contributes to the diversification of the energy matrix, making the study of the performance of photovoltaic panels increasingly important. By calculating the Performance Ratio (PR), one can obtain the true performance of the photovoltaic array. The PR was calculated to evaluate the real efficiency of the system in relation to its nominal capacity, where a photovoltaic array installed with microinverters was used. According to the literature, microinverters provide the best PR results. The analysis took into account meteorological variables and the effect of dirt on the performance of the photovoltaic array. The installation achieved good results, with the average PR value being above 80%. Based on the performance analysis, a photovoltaic equation was developed using linear regression and multiple linear regression models, utilizing the array's output and meteorological variables. From this, a spatial map of photovoltaic potential was created using the best-developed equation, specializing the results based on the WRF-Solar model. The correlation of PR results in relation to solar radiation and air temperature was inversely proportional (-0.76 and -0.74, respectively). The correlation with relative humidity and precipitation was 0.52 and 0.46 (with INMET) and 0.48 (with EMA). This moderate correlation is due to the fact that both variables are responsible for cooling the system, thus improving the performance of the photovoltaic panels. With the spatial mapping of the photovoltaic map, values ranging from 2.4 kWh/kWp to 4.8 kWh/kWp were found across the entire state.

Keywords: Photovoltaic energy, performance ratio, photovoltaic equation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Ilustração da conversão de energia solar até a corrente alternada. 15
- Figura 2: Área de estudo, Média Pluviométrica Acumulada Anual entre os anos de 2002 até 2022 para a base de dados MERGE-CPTEC, arranjo fotovoltaico utilizado e Estação Meteorológica Automática (EMA). 17
- Figura 3: Relação entre as variáveis meteorológicas (irradiação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação da estação do INMET e a precipitação da EMA) e a PR, com base nos valores médios diários, no período de 10/03/2024 a 09/08/2024) 24
- Figura 4: Ilustração da variação horária da Radiação no topo da atmosfera (R_a) a variação da radiação ao longo das horas (R_g) e a variação da transmitância da atmosfera (K_t). 27
- Figura 5: Comparação da produtividade observada e estimada, onde a linha verde é a equação 10 proposta pela Regressão Linear (RL), já a linha vermelha é a equação 11 proposta através da Regressão Linear Múltipla (RLM) 29
- Figura 6: Dispersão de dados referente a produtividade e métricas estatísticas (correlação, viés e RMSE) realizadas a partir das medições da microusinina e a estimativa resultante do modelo de Regressão Linear (RL) e Regressão Linear Múltipla (RLM). 30
- Figura 7: Mapa da irradiação solar utilizando os modelos (A) NASA-POWER e (B) WRF-Solar. 32
- Figura 8: Mapa da média diária das variáveis meteorológicas de (A) Velocidade do Vento (m/s), (B) Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$), (C) Umidade Relativa do Ar (%) e (D) Precipitação Acumulada (mm). 33
- Figura 9: Mapa Fotovoltaico do estado de Alagoas utilizando a equação proposta pelo modelo RLM. 34

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1: Métricas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema de energia fotovoltaica. 18
- Tabela 2 Esquemas de configuração e parametrização utilizados no WRF-Solar. 21
- Tabela 3: Tabela 3: Avaliação da correlação de pearson entre o PR (Taxa de Desempenho) e as variáveis meteorológicas, onde: Irrad - Irradiação Solar, Temp - Temperatura do Ar, VV - Velocidade do Vento, UR - Umidade Relativa do Ar, PREC - Precipitação utilizando dados de médias diárias e o KT - Transmitância atmosférica de forma horária (10/03/2024 - 09/08/2024). 24
- Tabela 4: Avaliação estatística média avaliando a precisão e a consistência dos modelos atmosféricos utilizando dados de forma horária durante o período de:10/03/2024 - 18/06/2024. 31
- Tabela 5: Comparação do potencial de vários arranjos fotovoltaicos em comparação ao do estudo atual. 34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PIB - Produto Interno Bruto

BEN - Balanço Energético Nacional

NEB - Nordeste do Brasil

PR - Performance Ratio ou Taxa de Desempenho

IEC - International Electrotechnical Commission

ONU - Organização das Nações Unidas

ODS - Objetivo de Desenvolvimento Sustentável

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

DOLs - Distúrbios Ondulatórios de Leste

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA - Agência Internacional de Energia

EMA - Estação Meteorológica Automática

Kt – Transmissão Atmosférica

RL - Regressão Linear

RLM - Regressão Linear Múltipla

WRF - Weather Research and Forecasting

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

FNL - Final Analysis

MERRA-2 - Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications

GEOS - Goddard Earth Observing System

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Objetivos.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 Área de Estudo e Dados Utilizados.....	16
3.2 Indicadores de desempenho fotovoltaico.....	18
3.3 Estação Meteorológica Automática (EMA).....	18
3.4 Transmittância Atmosférica (Kt).....	19
3.5 Regressão Linear e Regressão Linear Múltipla.....	19
3.6 Ferramentas Estatísticas Utilizadas.....	20
3.7 Modelo Weather Research Forecasting (WRF).....	21
3.8 Modelo NASA-POWER.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	23
4.1 Relação entre PR x variáveis meteorológicas.....	23
4.2 Estimativa da produção elétrica.....	27
4.3 Mapa Solarimétrico.....	30
4.4 Mapa Fotovoltaico.....	33
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

1. INTRODUÇÃO

A grande demanda global por energia dos países está muitas vezes relacionados com o PIB (Produto Interno Bruto) e seus respectivos setores da economia (indústria, comércio, e agricultura, além do consumo residencial), e impulsionada pelo rápido crescimento dos grandes centros urbanos, sendo mais recentemente impactado pelo aumento significativo do crescimento da utilização de veículos elétricos. Vale ressaltar que a substituição de veículos a combustão por elétrico, causa teoricamente impactos ambientais positivos para buscar fontes alternativas de energia. Entre elas, a energia solar se destaca como a mais conveniente, devido à sua abundância, renovabilidade e sustentabilidade (Rubbi *et al.*, 2020).

No Brasil, a fonte que compõe a maior parte da matriz elétrica é uma fonte renovável, a hidráulica com 58,9%, onde após essa fonte os outros meios com maior distribuição de energia é composta pela Eólica (13,2%) e Solar (7%). De acordo com o Balanço Energético Brasileiro (BEN) de 2024, a energia fotovoltaica obteve-se um crescimento maior que todas as outras fontes de energia elétrica, obtendo um crescimento de 68,1% em comparação a 2022, isso deve-se ao fato da maior implementação de geradores fotovoltaicos em residências. O Nordeste do Brasil (NEB) obteve valores de 62% de capacidade de geração de energia instalada em todo o país de acordo com o relatório final do BEN 2023, sendo considerada a maior produtora de energia fotovoltaica no país, porém a porcentagem para Alagoas localização do estudo é de, aproximadamente, 4,86% ou seja, possui uma participação relativamente pequena, indicando um espaço para expansão. De acordo com Pereira *et al.* (2017), a região do NEB tem um grande potencial solar onde a variabilidade anual da radiação solar global na região é muito pequena, indicando assim uma maior estabilidade na produção de energia solar ao longo de todo ano.

A maneira mais eficaz de avaliar o recurso solar é por meio de dados de alta qualidade sobre a radiação solar medida localmente, o que representa o cenário ideal para fortalecer a viabilidade financeira de um grande projeto solar. Contudo, tais medições estão limitadas a um período bastante curto ou representam apenas pequenas áreas dentro de um campo de visão limitado (Luiz *et al.*, 2018). Uma alternativa é utilizar bancos de dados preexistentes de irradiância, derivados de satélites ou modelagem atmosférica. Nos últimos anos, várias técnicas baseadas em dados de satélite surgiram, proporcionando estimativas razoáveis da irradiação solar na superfície (Martins *et al.*, 2007; Bhattacharya *et al.*, 2013; Alexandri *et al.*, 2017; Pereira *et al.*, 2017; Letu *et al.*, 2020; Vamvakas *et al.*, 2020). No entanto, as medições da irradiação solar por si só não atendem plenamente às necessidades dos operadores de sistemas de energia. A conversão deste recurso em produção real de energia é uma etapa

essencial, frequentemente subestimada devido às grandes incertezas que podem surgir quando as características detalhadas do sistema fotovoltaico não são devidamente consideradas (Reindl *et al.*, 2017). Por isso, é fundamental combinar técnicas meteorológicas e aplicá-las para satisfazer as exigências dos operadores de sistemas de energia e dos proprietários de instalações de fontes renováveis (Silva *et al.*, 2024).

No tocante a eficiência dos sistemas fotovoltaicos e o alto investimento frequentemente associado à instalação e aquisição de equipamentos para geração de energia solar residencial, é essencial otimizar ao máximo a geração de energia, tanto em aplicações residenciais quanto comerciais. Verificar o desempenho das instalações fotovoltaicas, através de um método amplamente conhecido como *Performance Ratio* (PR) ou Taxa de Desempenho, é fundamental para medir a eficiência real de um sistema fotovoltaico em comparação com sua capacidade nominal (Bentouba *et al.*, 2021). O cálculo dessa métrica foi proposto e desenvolvido pela IEC 61724-1, utilizando dados mensais ou diários para quantificar o rendimento do sistema. Lira *et al.* (2022) enfatizaram que a garantia dada pelo fabricante de desempenho de 80% é válida por 25 anos, porém a potência de saída gerada depende de alguns fatores como temperatura, na qual o aumento da mesma pode fazer com que a potência do módulo seja reduzida. De acordo com Araújo *et al.* (2019) a sujidade faz com que a captação da célula seja reduzida fazendo com que a produção seja diminuída, além de reduzir a vida útil do painel. A instalação incorreta do sistema também acarreta no menor desempenho do sistema, como por exemplo, inclinação fora do ideal, utilização de cabos curtos (gerando aumento da temperatura), inversores ruins, etc. Por outro lado, a velocidade do vento é capaz de reduzir a temperatura das células e proporcionar melhor desempenho do sistema fotovoltaico. A obtenção desses dados é fundamental para verificar se o arranjo fotovoltaico está operando em sua capacidade máxima, pois os fatores mencionados podem reduzir a produção e resultar em perda de parte da energia gerada, levando a um aproveitamento inadequado do sistema instalado (Souza *et al.*, 2019; Shaik *et al.*, 2023).

1.1 Objetivos

Com o intuito de observar o desempenho de um arranjo fotovoltaico, bem como identificar espacialmente os índices de radiação solar do estado de Alagoas, os objetivos deste trabalho são: 1) identificar o quão as variáveis meteorológicas interferem no desempenho de um arranjo fotovoltaico, 2) gerar uma equação para estimar a produção fotovoltaica para todo o estado, 3) utilização do modelo WRF-Solar comparando-o com o NASA-POWER para

implementação dos resultados de radiação solar e 4) verificar as diferentes regiões que são promissoras para instalação de painéis fotovoltaicos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O crescimento populacional trouxe também o crescimento das cidades, ocorrendo assim uma maior preocupação relacionado ao consumo da energia. A Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015 na cidade de Paris, desenvolveu o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS), onde destacaram 17 objetivos, dentre eles, especificamente o objetivo número 7 trata da energia limpa e acessível, onde o principal foco seria a disponibilização de energia de fonte limpa a todos, aumentando drasticamente a matriz energética e elétrica global em termos de energia renovável até o ano de 2030. A diversidade da matriz elétrica reduz os riscos relacionados à falta de energia e optando por um meio limpo, diminui também os riscos ambientais. Com uma matriz elétrica pouco diversificada, o apagão de 2001 em São Paulo e no Amapá em 2020, demonstraram que a diversidade na matriz é necessária, uma vez que eventos como estes são recorrentes. De acordo com Martins *et al.* (2004) mesmo a fonte hidráulica não gerando poluentes para a atmosfera, as usinas hidrelétricas têm um grande impacto ambiental que ainda não foi devidamente avaliado, reforçando que as reservas d'água para tal meio tendem a se esgotar em breve.

Os painéis solares são dispositivos projetados para converter a luz do sol em energia elétrica, sua composição se dá através de células fotovoltaicas feitas de materiais semicondutores, como o silício. De acordo com Severino e Oliveira (2010) a geração de energia elétrica é decorrente da absorção de energia solar, que por sua vez ocorre uma diferenciação de potência no material semicondutor, criando assim o efeito fotovoltaico, além disso, vale salientar que a célula fotovoltaica em nenhum momento armazena energia, ela apenas mantém um fluxo contínuo de elétrons enquanto houver a incidência luz sobre ela, fazendo com que através do cabeamento e inversores, sejam transferidas de corrente contínua para a corrente alternada onde assim, possa ser consumida como energia elétrica (processo ilustrado na Figura 1).

Figura 1: Ilustração da conversão de energia solar até a corrente alternada.



Fonte: EnergiaEco. <https://energiaeco.com.br/energia-solar-fotovoltaica/>

As burocracias por trás das instalações dos painéis fotovoltaicos variam de acordo com país, estado ou município. No caso do Brasil, há um arcabouço legal específico para a geração distribuída, especialmente em relação à energia solar fotovoltaica residencial. A regulamentação existente no país se dá pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) através da resolução normativa nº482/2012, atualizada pela normativa nº687/2015, onde é feita uma regulamentação de compensação de energia elétrica, onde é feito o sistema chamado de net metering, que é praticamente o termo em que pode-se instalar em residências sistemas fotovoltaicos conectados à rede e ocorrer um empréstimo de energia excedente gerada para a distribuidora (no caso de Alagoas, seria a Equatorial), recebendo crédito para abater na conta de energia em consumo futuro. Em 2022 foi sancionada uma nova lei, a lei Marco Legal da Micro e Minigeração Distribuída, nº14.300/2022, definindo regras claras para consumidores que geram sua própria energia, onde os consumidores que possuíssem sistemas instalados ou protocolados de janeiro de 2023 continuariam isentos de encargos até 2045, porém, para novos sistemas encargos gradativos seriam aplicados a partir de 2023, relacionando-os ao uso da rede elétrica.

O grande empecilho da radiação solar global, principal variável para alimentação dos sistemas fotovoltaicos, é a presença de nebulosidade, então durante o período da localidade, o arranjo fotovoltaico pode render menos que o esperado já que a passagem de radiação solar na região está defasado. O período chuvoso da região de acordo com Souza *et al.* (2020) é

conhecido como quadra chuvosa do estado ocorre entre os meses de abril a julho, com isso a busca pelos fenômenos causadores de nebulosidade também devem ser analisados, uma vez que a nebulosidade é o principal fator incapacitador da radiação solar atenuar em seu máximo, onde de acordo com Silva *et al.* (2017) os principais fenômenos sinóticas causadores de intensas precipitações são Sistemas frontais, Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), entre outros fenômenos. Contudo nos períodos de nebulosidade além da radiação ser menos intensa, o modelo possivelmente irá encontrar uma maior dificuldade, uma vez que grande parte da concentração de dados do estudo presente, foi durante a quadra chuvosa.

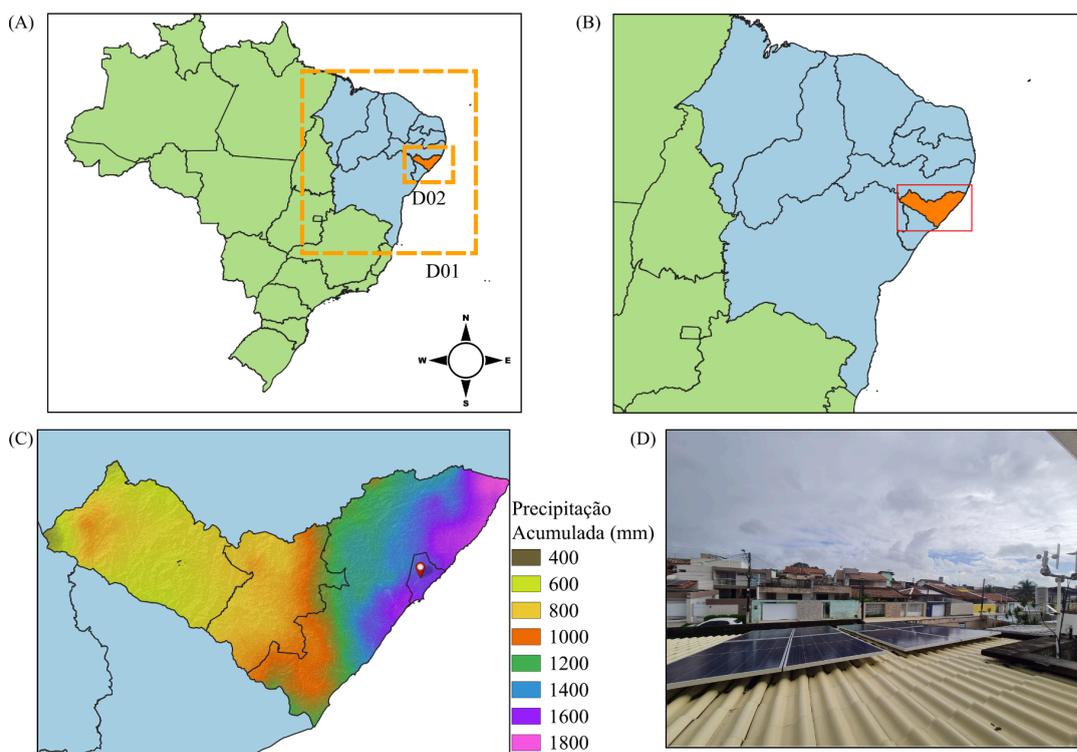
3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo e Dados Utilizados

O estado de Alagoas possui uma área aproximada de 27.830,661 km² (IBGE, 2022), representando aproximadamente 0,33% do território brasileiro. Está limitado ao Norte (N) e Oeste (O) com o estado de Pernambuco, ao sul (S) com os estados de Sergipe e Bahia e a Leste (L) com o oceano Atlântico (Figura 2B). Atualmente, o estado de Alagoas está dividido em três mesorregiões: o Leste, o Agreste e o Sertão Alagoano (Figura 2C). O mapa do acumulado médio anual (2002 à 2022) da precipitação foi confeccionado a partir dos dados disponibilizados pelo CPTEC. O produto MERGE é formado pela combinação da precipitação observada juntamente com estimativas por satélite. Tal abordagem tem como intuito identificar as áreas de maior índice pluviométrico que, por sua vez, está relacionada a uma possível maior taxa de nebulosidade, ou seja, acarretando numa atenuação da radiação solar (Júnior *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023).

A mesorregião Leste Alagoano apresenta precipitação anual entre 1000 e 1800 mm, com um aumento gradual do Sul para o Norte. No Agreste, uma faixa subúmida com precipitação entre 800 e 1000 mm é causada pelo relevo acentuado do planalto da Borborema, que força a elevação e condensação dos ventos alísios de Sudeste/Leste, resultando em chuvas. Já o Sertão é a região mais seca do estado, exceto no extremo oeste, onde áreas mais úmidas são influenciadas pela orografia, devido às altitudes mais elevadas.

Figura 2: (A) Espacialização dos domínios utilizados nas simulações do estudo (D01 e D02), (B) Área de Estudo, (C) Média Pluviométrica Acumulada Anual entre os anos de 2002 até 2022 para a base de dados MERGE-CPTEC, também sinalizando da Estação Meteorológica Automática (EMA) e do arranjo fotovoltaico, (D) arranjo fotovoltaico utilizado e da EMA.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os dados observados foram coletados a partir de uma microunidade situada na região metropolitana da cidade de Maceió no estado de Alagoas, localizado na costa Nordeste do Brasil, nas seguintes coordenadas: $-9,59^\circ$ (latitude) e $-35,77^\circ$ (longitude) (Figura 1D). O sistema fotovoltaico é composto por oito módulos policristalinos RESUN, cada um com potência nominal de 320 Wp, eficiência de 17,53% e área de 1,94 m², totalizando 2,72 kWp de potência instalada. A energia gerada em corrente contínua pelos módulos é convertida para corrente alternada por dois inversores *Hoymiles* de 1200 W cada.

Conforme as especificações do fabricante, o inversor suporta sobrecargas de até 20% de sua potência nominal. Atualmente, o sistema opera com uma sobrecarga de 6% (1280W), dentro dos parâmetros de segurança. Os componentes do sistema demonstram alta tolerância a temperaturas elevadas, com o inversor operando até 85°C e os módulos fotovoltaicos até 65°C. A configuração do sistema, caracterizada por um "oversizing" dos módulos fotovoltaicos, proporciona um aumento significativo na geração de energia em horários de

menor insolação, otimizando o aproveitamento da energia solar. Essa estratégia, embora limite a produção em picos de radiação, garante um desempenho mais consistente ao longo do dia, alinhado à capacidade do inversor.

3.2 Indicadores de desempenho fotovoltaico

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para a avaliação de desempenho, conforme definido pela Agência Internacional de Energia (IEA, 2014). As mesmas métricas de desempenho foram empregadas em diversos trabalhos da literatura para comparar sistemas de energia fotovoltaica com diferentes configurações, designs e tecnologias de conversão em operação ao redor do mundo (Mpholo *et al.*, 2015; Hacen Jed *et al.*, 2020; Gonzalez & Martins, 2024). O rendimento de referência (Y_r) compara a irradiação solar incidente na superfície do módulo (H_i) com a irradiância solar global de referência (G_{STC}), conforme definido na norma IEC 61538. O rendimento final ou do sistema (Y_f) é a relação entre a energia de saída em corrente alternada (E_{AC}) e a potência nominal (P_0) do sistema fotovoltaico, podendo ser interpretado como o número de horas em que o sistema operou em plena potência. A PR é um indicador amplamente aceito para avaliar o desempenho de usinas fotovoltaicas conectadas à rede, considerando as perdas ópticas, térmicas e elétricas.

Tabela 1: Métricas utilizadas para avaliar o desempenho do sistema de energia fotovoltaica.

Métricas	Equação	Unidade
Rendimento de referência	$Y_r = \frac{H_i}{G_{STC}}$	kWh/kWp
Rendimento final	$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_0}$	kWh/kWp
Taxa de desempenho	$PR = 100 \cdot \frac{Y_f}{Y_r}$	%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.3 Estação Meteorológica Automática (EMA)

Para complementar o monitoramento do sistema foi instalada uma Estação Meteorológica Automática (EMA) o mais próximo possível do arranjo de produção de energia solar, com o objetivo de avaliar sob quais condições meteorológicas (radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, e precipitação) estariam

condicionando a produção de energia. Todos os sensores meteorológicos foram instalados à 1,5m do nível de altura das placas solares e microinversores, e a precipitação no mesmo nível. Destaca-se a disposição do telhado de 2,30m de altura da residência piloto, a título de informação. Todos os sensores foram conectados a um CR800 da Campbell, onde são escaneados em intervalos de 10 minutos e depois trabalhados e analisados a cada 1 hora, para o período compreendido entre o intervalo de 10/03/2024 - 09/08/2024. Como o pluviômetro instalado na EMA não registraram dados para o primeiro mês do estudo, os dados de precipitação também foram analisados e estudados a estação automática disponibilizada pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a estação nomeada de A303, nas coordenadas geográficas de latitude e longitude, -9,55 e -35,77 respectivamente, onde ao traçar uma linha reta entre ambas as estações dão menos de 4 km de distância, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial, os dados contidos nessa distância ainda são válidos.

3.4 Transmitância Atmosférica (Kt)

A transmitância atmosférica (Kt) demonstra a transmitância da atmosfera, com isso, pode ser observado o quanto a atmosfera está atenuando a radiação, em virtude da nebulosidade bem como material particulado, onde $Kt < 1$ indica que a atmosfera está mais turva, ou seja, reduz a quantidade de radiação solar que chega à superfície, já o Kt mais próximo de 1 indica que a radiação que chega à superfície é próxima de quanto chega no topo da atmosfera. A equação é definida, como:

$$Kt = \frac{R_g}{R_a} \quad (4)$$

Onde, é a razão entre a radiação solar global que atinge a superfície da Terra em W/m^2 (R_g) e a que atinge o topo da atmosfera que é aproximadamente $1367 W/m^2$ (R_a). O resultado indicará o quanto de fato de radiação solar global atinge a superfície.

3.5 Regressão Linear e Regressão Linear Múltipla

A Regressão Linear (RL) é uma técnica estatística utilizada para modelar a relação entre uma variável dependente e uma variável independente, com objetivo de encontrar a melhor linha reta ou mesmo plana, que consiga descrever melhor a relação das duas variáveis. A equação é definida como:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x \quad (5)$$

Onde, y é a saída (alvo) do modelo, x representa a entrada independente do modelo, b_0 o intercepto da reta e b_1 é o coeficiente do modelo de regressão que indica o quão inclinada a reta será.

A Regressão Linear Múltipla (RLM) é uma técnica estatística que busca modelar a relação entre uma variável dependente e um conjunto de variáveis independentes. Este método permite identificar a contribuição específica de cada variável independente (ou preditora) para a determinação da variável dependente, facilitando assim a compreensão de como diferentes fatores influenciam o resultado final. A equação é definida como:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_n \cdot x_n \quad (6)$$

Onde, y é a saída (alvo) do modelo; $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ representam as entradas independentes do modelo; enquanto $[b_1, b_2, \dots, b_n]$ são os coeficientes do modelo de regressão.

Neste estudo, a regressão linear e a linear múltipla foi implementada utilizando a biblioteca *sklearn*, que é uma das mais populares para aprendizado de máquina em *Python*.

3.6 Ferramentas Estatísticas Utilizadas

O Coeficiente de Correlação de Pearson (r), calculado usando a equação 6, foi empregado para quantificar a correlação linear entre o PR e cada uma das variáveis meteorológicas. Nesse contexto, $COV(X,Y)$ representa a covariância entre X e Y, enquanto σ_x e σ_y são os desvios padrão de X e Y, respectivamente. O coeficiente r varia de +1 a -1, onde os valores próximos a +1 indica uma forte relação direta, 0 significa ausência de correlação linear, e valores próximos a -1 indica uma forte relação inversa (Devore, 2009). A Equação é definida como:

$$r = \frac{COV(X,Y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

Outras métricas estatísticas foram calculadas nesta etapa para avaliar a dispersão e correlação entre dos dados da produtividade observada e estimada, incluindo o erro médio (viés) que indica o quanto os dados estão superestimando ou subestimando os valores e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) que indica a magnitude do erro dos resultados, conforme descrito a seguir:

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (9)$$

3.7 Modelo Weather Research Forecasting (WRF)

O WRF é um modelo numérico de mesoescala utilizado para previsão e simulação do tempo, desenvolvido pela *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Onde no presente trabalho foi utilizado a sua versão criada especialmente para atender as demandas de energia solar sendo denominada de WRF-Solar onde a versão utilizada para o trabalho foi a versão 4.5.

Tabela 2 Esquemas de configuração e parametrização utilizados no WRF-Solar.

Parâmetros	WRF
Microfísica	WSM 6-class graupel scheme (Hong <i>et al.</i> , 2006)
Cumulus	Grell-Freitas ensemble scheme (Grell <i>et al.</i> , 2014)
Radiação de ondas curtas	RRTMG scheme (Iacono <i>et al.</i> , 2008)
Radiação de ondas longas	RRTMG scheme (Iacono <i>et al.</i> , 2008)
Camada Limite Superficial	Monin-Obukhov (Monin e Obukhov, 1954)
Camada Limite Planetária	Mellor-Yamada-Janjic (Janjic, 1994)
Modelo de Superfície	NOAH

Terrestre	(Chen e Dudhia, 2001)
AOD	J. A. Ruiz-Arias (Ruiz-Arias <i>et al.</i> , 2014)

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

As parametrizações foram selecionadas devido alguns testes realizados utilizando algumas parametrizações, onde foi feito correlação de pearson, viés e o RMSE de cada parametrização em comparação aos dados de radiação solar global, a parametrização que manteve melhores resultados foram as escolhidas, além disto, foi feito um levantamento literário para verificar se mais pesquisas foram desenvolvidas utilizando as mesmas parametrizações (Liu *et al.*, 2020; Comin *et al.*, 2021; Tian *et al.* 2021; Garcia *et al.*, 2023, Souza *et al.*, 2024), com isto, vale ressaltar que as parametrizações são recomendadas para região de estudo e locais similares a tal.

Além disto, os dados de entrada para realizar as simulações foi utilizando a série produzida pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), chamado *Final Analysis* (FNL), possuindo uma resolução espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ (aproximadamente 111×111 km) e uma temporal de 6 horas.

Destaca-se ainda o cálculo realizado para estimativa da umidade relativa do ar à 2m de altura, como mostrado na equação 10, 11 e 12:

$$es = 10 * 0.6112 * e^{(17.67(T2-T0)/(T2-29.65))} \quad (10)$$

$$UR = \frac{EPS * es}{(0.01 * PSFC - (1.-EPS) * es)} \quad (11)$$

$$UR2m = 100.*amax1(amin1(Q2/UR,1.0),0.0) \quad (12)$$

Onde, *es* é a saturação do vapor d'água, *T2* temperatura do ar a 2 metros, *T0* é 273.16, *EPS* é a razão de mistura do vapor d'água (0,622), *PSFC* refere-se à pressão atmosférica na superfície, *UR* umidade relativa do ar, *Q2* é a razão da mistura do vapor d'água a 2 metros.

3.8 Modelo NASA-POWER

O NASA-POWER, em inglês, *Prediction of Worldwide Energy Resource*, é uma versão aprimorada e mais abrangente do antigo conjunto de produtos e serviços de Meteorologia de Superfície e Energia Solar desenvolvido pela NASA. Esta ferramenta oferece diversas variáveis meteorológicas de código aberto, como precipitação, temperatura da

superfície, radiação solar, velocidade do vento, umidade relativa e pressão atmosférica, e representa uma importante fonte de dados para a análise de recursos energéticos renováveis em escala global. Uma das melhorias mais notáveis é a expansão da resolução espacial de $1 \times 1^\circ$ para $0,5 \times 0,5^\circ$. Esse refinamento na escala proporciona uma representação mais detalhada das condições meteorológicas e de energia solar em diferentes regiões do globo, permitindo análises mais precisas.

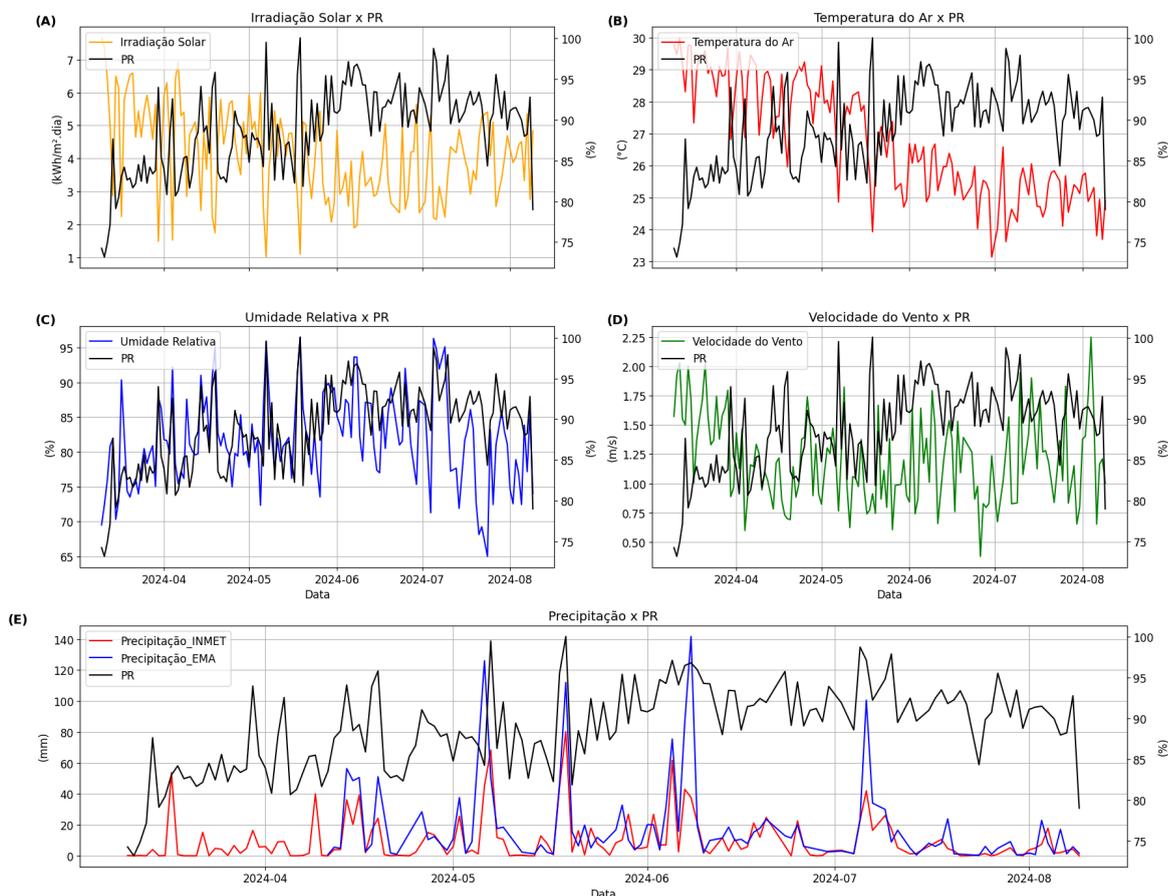
O projeto NASA-POWER fornece uma plataforma online de fácil utilização para acessar uma ampla variedade de dados climáticos globais com base nos produtos de assimilação da *Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications* (MERRA-2), disponíveis em <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. As variáveis meteorológicas do NASA-POWER são principalmente derivadas do modelo de assimilação GMAO MERRA-2 e do *Goddard Earth Observing System* (GEOS). Além disso, o período de dados foi significativamente ampliado, passando de 1983 a 2005 para um horizonte temporal contínuo desde 1983 até o presente. Possui um conjunto de dados robusto e atualizado, com escalas horárias, diárias, mensais, anuais e climatológicas, que permitem a análise de tendências, dos padrões climáticos e variações do recurso solar ao longo de décadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Relação entre PR x variáveis meteorológicas

Os resultados mostraram que as variáveis meteorológicas tem um impacto bastante significativo no desempenho de um sistema fotovoltaico, onde valores de irradiação solar atingiram valores de $4,17 \text{ kWh/m}^2.\text{dia}$ e demonstraram ter uma correlação inversa ao PR juntamente com a Temperatura do ar que obtiverem valores médios de $26,3 \text{ }^\circ\text{C}$, com isto, vale afirmação de que temperaturas baixas tendem a aumentar o desempenho do sistema fotovoltaico, uma vez que os valores de temperaturas mais elevados geram estresse no sistema de conversão de energia e afins. Ambas as variáveis de correlação negativa demonstraram que operam de forma conjunta, uma vez que a irradiância alta intensifica a temperatura, com isto, diminui o desempenho, já a velocidade do vento mesmo que teoricamente seja uma variável meteorológica que ajude o desempenho, já que ela ajuda na limpeza dos painéis e resfriamento, a correlação foi negativa fraca, isso se deve a ter obstrução do vento nas proximidades da instalação da EMA. Já a Umidade Relativa do Ar e a Precipitação obtiveram os únicos resultados de correlação positivos, porém indicam apenas uma correlação moderada, ambos atuam na mesma função, resfriamento e limpeza do módulo.

Figura 3: Relação entre as variáveis meteorológicas (irradiação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação da estação do INMET e a precipitação da EMA) e a PR, com base nos valores médios diários, no período de 10/03/2024 a 09/08/2024)



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Tabela 3: Avaliação da correlação de Pearson entre o PR (Taxa de Desempenho) e as variáveis meteorológicas, onde: Irrad - Irradiação Solar, Temp - Temperatura do Ar, VV - Velocidade do Vento, UR - Umidade Relativa do Ar, PREC - Precipitação utilizando dados de médias diárias e o KT - Transmitância atmosférica de forma horária (10/03/2024 - 09/08/2024).

	Métrica	Irrad	Temp	VV	UR	PREC	KT
EMA	r	-0,76	-0,74	-0,20	0,52	0,48	-0,68
INMET	-	-	-	-	-	0,46	-

Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Os valores de irradiação solar na área de estudo, de acordo com o Atlas Solarimétrico do Estado de Alagoas (ELETROBRAS, 2008) o estado atingiu valores mínimos de média mensal durante o inverno de 3611 Wh/m².dia, onde durante o inverno já foram demonstrados valores superiores no presente. Com esses resultados pode-se fazer um planejamento para melhoria e otimização do arranjo. A análise do PR no sistema fotovoltaico demonstrou uma média de 88,68%, indicando um bom desempenho. Entretanto, foram observadas variações significativas na PR ao longo do período analisado, influenciadas por diversos fatores. A Figura 3 revela que os menores valores da PR foram registrados no início da série temporal, coincidindo com um período de pouca precipitação e possivelmente associados ao maior acúmulo de sujeira nos painéis.

A predominância de temperaturas mais baixas e maior frequência de precipitação em decorrência da estação chuvosa, que ocorre entre os meses de abril a julho (Silva Junior *et al.*, 2022), contribuíram para um aumento significativo no PR, devido à limpeza natural dos painéis e a temperatura amena. Há também uma relação inversa entre a temperatura do ar e a PR nos dias com temperatura acentuada. Essa relação é esperada, pois a eficiência dos painéis solares tende a diminuir em dias mais quentes. De acordo com Seme *et al.* (2019), à medida que a temperatura sofre um aumento a eficiência diminui de forma contínua, uma vez que as condições para operação do módulo fotovoltaico são para condições de teste padrão, ou seja, a operação é feita em um conjunto de condições específicas estabelecidas para medir o desempenho de módulos fotovoltaicos de maneira consistente, de modo a permitir comparações entre diferentes painéis solares.

A análise realizada com base na Figura 3, permite uma compreensão mais aprofundada da relação entre a taxa de desempenho do sistema fotovoltaico e a umidade relativa do ar. Conforme apontado por Gholami *et al.* (2023) a umidade relativa do ar elevada faz com que a sujeira seja fixada nos painéis fotovoltaicos estando associado a maior concentração de vapor d'água presente na atmosfera, ou seja, dificultando ainda mais a retirada da sujeira para ação simples, e, portanto, sendo necessário ventos mais intensos ou precipitações para diminuir a sujeira do painel de forma espontânea. A ocorrência de precipitação promove a limpeza parcial e natural dos painéis, removendo a sujeira acumulada e aumentando a eficiência do sistema, justamente por isso foram utilizadas as duas bases de dados, já que a EMA não contém valores do primeiro mês do estudo, onde ao observar ambos valores, ficam bem próximos e atuam de forma positiva com o PR.

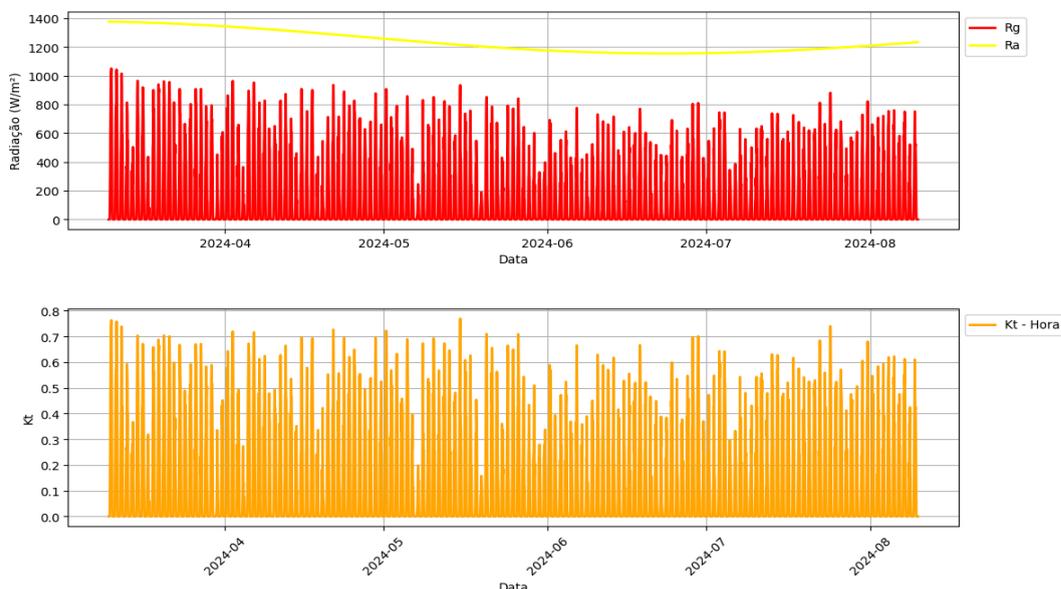
Nota-se ainda na Figura 3 que a velocidade do vento influencia a PR, onde em teoria ventos mais intensos ajudam a diminuir a temperatura do sistema de geração de energia e consequentemente mantendo os painéis mais frescos e limpos, e, portanto, aumentando a eficiência na conversão de energia contínua (gerada pelos painéis) em alternada (utilizada nas residências). Estes resultados corroboram com os estudos de Salimi *et al.* (2023) que observaram como a velocidade do vento influencia diretamente na diminuição da perda por temperatura, ou seja, mesmo nas condições onde não ocorra precipitação para a diminuição da temperatura, a velocidade do vento pode suprir a carência para diminuição da mesma, porém vale lembrar que a presença de sujeira nos painéis fotovoltaicos com umidade relativa alta, a velocidade do vento necessita ser mais intensa para remoção desta sujeira.

Com o auxílio da Tabela 2, que mostra a análise estatística com base na correlação linear entre a PR e as variáveis meteorológicas que podem influenciar o desempenho dos painéis fotovoltaicos. A irradiação solar e a temperatura do ar são apontadas como as variáveis com maior impacto sobre a PR. Uma vez que valores elevados destas variáveis meteorológicas podem aumentar as perdas no inversor e reduzir a eficiência dos módulos, onde é demonstrado com mais detalhes por Debastiani *et al.* (2022) e Tahir *et al.* (2022).

A umidade relativa e a precipitação também mostraram uma correlação moderada com o PR. A correlação moderada apresentada entre as variáveis, deve-se principalmente à maior refrigeração do sistema, que por sua vez reflete também na diminuição da temperatura por sua relação inversamente proporcional. Nesta mesma linha de raciocínio, dias chuvosos tendem a elevar a umidade relativa, porém a nebulosidade faz diminuir a produção de energia.

Na figura 4 é o resultado do Kt utilizado de forma diária justamente para observar em relação ao PR, onde mesmo com o Kt registrando os maiores valores no início da pesquisa o PR continuou baixo, isso pode coincidir justamente com o período de maior sujidade do painel fotovoltaico e também maior temperatura, uma vez que são registrados o maior índice de irradiação solar e temperatura no mesmo período, com isto, a correlação do Kt com a radiação solar global é alta onde foi encontrado resultados de 0,90 neste estudo, reforçando que ambos caminham positivamente juntos. O Kt foi analisado para observar o quanto a nebulosidade e a sujidade interferem no desempenho do painel fotovoltaico, assim como destaca Srivastava *et al.* (2021).

Figura 4: Ilustração da variação horária da Radiação no topo da atmosfera (Ra) a variação da radiação ao longo das horas (Rg) e a variação da transmitância da atmosfera (Kt).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4.2 Estimativa da produção elétrica

Como o tamanho dos sistemas fotovoltaicos variam por local, a potência de saída de cada sistema é normalizada de acordo com a capacidade instalada antes que os métodos de regressão sejam treinados. Conseqüentemente, todos os valores e erros são independentes do tamanho do sistema e podem ser comparados diretamente. Dessa maneira foi desenvolvido duas equações, uma seguindo o método de Regressão Linear (Equação 10) e outra seguindo com base em um modelo utilizando regressão linear múltipla (Equação 11), obtidas através da relação da produção de energia solar da microusina e a estação meteorológica automática instalada próxima e no mesmo nível de medição.

$$Y_f = 2.2 \cdot Irrad + 0.837 \quad (13)$$

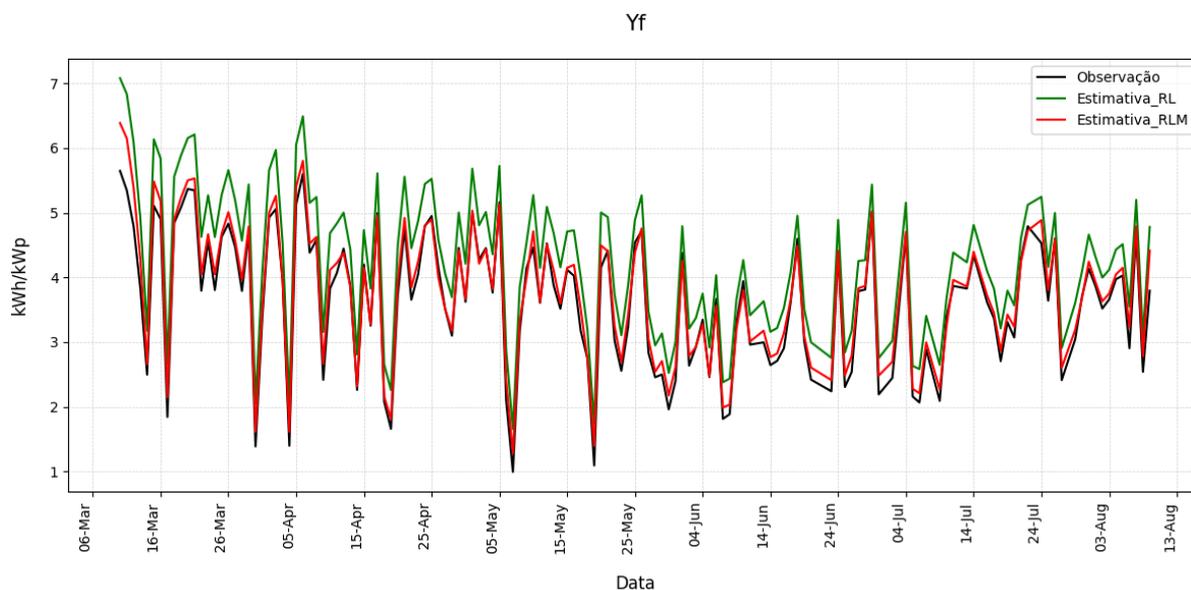
$$Y_f = 0.777354285 \cdot Irrad - 0.000201556456 \cdot VV - 0.051202157 \cdot Temp - 0.00656119524 \cdot UR - 0.00116137982 \cdot PREC + 2.414172883754501 \quad (14)$$

onde, Irrad - Irradiação Solar (kWh/m².dia), VV - Velocidade do Vento a 10 metros (m/s), Temp - Temperatura do Ar a 2 metros (°C), UR - Umidade Relativa do Ar (%) e PREC - Precipitação (mm).

Essencialmente, a produtividade está relacionada à irradiação. Contudo, a temperatura do ar é um fator crucial para definir a produtividade. A temperatura do sistema fotovoltaico é influenciada principalmente pela velocidade do vento, que atua no sentido de resfriamento no módulo fotovoltaico. Importante ressaltar que a precisão das estimativas realizadas, depende do conjunto de dados utilizados e trabalhados, sendo essencial selecionar dados que sejam consistentes e representativos ao longo do período de estudo. Isso garante que o conjunto de dados capture uma ampla gama de variações temporais, o que contribui para melhorar a precisão da equação.

Já a Figura 5, é possível avaliar a produtividade registrada pela microusinina (linha preta), comparado com as estimativas realizadas com a equação linear (linha verde, RL) e regressão linear múltipla (linha vermelha, RLM), sendo esta estimativa realizada a partir dos dados das medições meteorológicas da EMA, confrontados com a produção de energia da microusinina. Observa-se que o resultado das equações divergem no tocante principalmente a intensidade da produção de energia solar, sendo a RL superestimando a produção de energia solar registrada pela microusinina e a RLM apresentando resultados precisos na estimativa, a principal justificativa para isso, seria o fato da RL, diferente da RLM, considerar apenas a variável Radiação Solar na estimativa (o que representaria a máxima eficiência do sistema), não incluindo por exemplo situação de diminuição da eficiência por conta do aquecimento do cabeamento, quanto na condição de temperaturas elevadas, pouco vento e baixa umidade relativa do ar. Fator este que provoca diminuição na transmissão de energia, bem como no funcionamento do microinverso (converte energia contínua em alternada) e placas solares, estarem possivelmente trabalhando em temperatura próxima a não recomendada pelo fabricante (entre 65°C e 85°C), podendo ser incluída nessa análise o efeito da sujidade pensando na área das placas e do sensor de radiação solar.

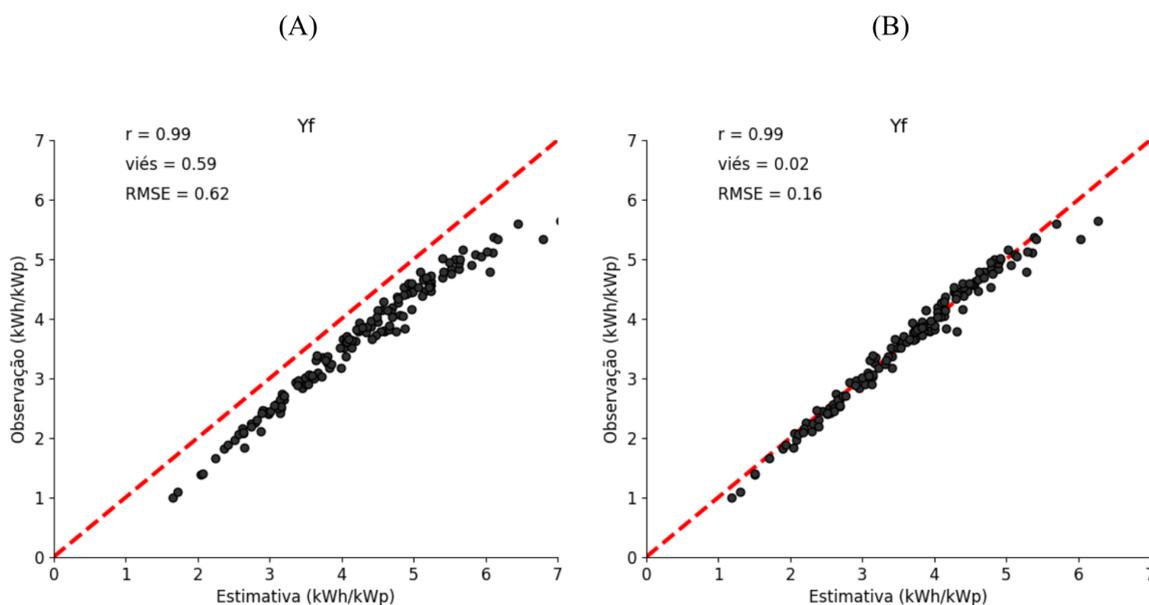
Figura 5: Comparação da produtividade observada e estimada, onde a linha verde é a equação 13 proposta pela Regressão Linear (RL), já a linha vermelha é a equação 14 proposta através da Regressão Linear Múltipla (RLM).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Reforçando a discussão, a Figura 6, mostra a dispersão e as métricas estatísticas a partir do confronto entre a produtividade estimada pelos modelos de regressão e os dados produção de energia da microusinas. Fica evidente que os resultados dos modelos de regressão seguem de perto a tendência das medições do sistema fotovoltaico. No entanto a RLM obteve melhores resultados já que a correlação deu quase perfeita ($r=0,99$), viés (0,02), e sendo RMSE próximo de zero (0,16), sugere uma precisão perfeita aos dados de teste do modelo de regressão, e a depender da disponibilidade de equipamentos meteorológicos disponíveis torna a utilização da RLM indicada para a estimativa espacial do potencial de produção fotovoltaica de energia de uma dada região. Porém, caso o fator limitante seja os equipamentos meteorológicos, a ML mostra também ser uma alternativa importante para avaliar o potencial de geração de energia solar de forma espacial, pois considera apenas a radiação solar.

Figura 6: Dispersão de dados referente a produtividade e métricas estatísticas (correlação, viés e RMSE) realizadas a partir das medições da microusinha e a estimativa resultante do modelo de (A) Regressão Linear (RL) e (B) Regressão Linear Múltipla (RLM).



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4.3 Mapa Solarimétrico

A partir dos métodos utilizados, foram feitas simulações utilizando o modelo atmosférico WRF-SOLAR, para avaliar espacialmente o potencial solar do estado de Alagoas, utilizando os ajustes e avanços obtidos na comparação realizadas com a geração de energia solar da microusinha e as medições realizadas com a EMA. De modo a confrontar as bases de dados do NASA-POWER e simulações com o modelo atmosférico WRF-SOLAR, a tabela 4, mostra a avaliação estatística da comparação realizada com os dados observados, sendo possível observar que a base de dados NASA-POWER apresenta melhores resultados estatísticos, como demonstrado na Tabela 4, porém deixa a desejar em relação aos dados de forma espacial, devido ao tamanho da resolução horizontal de sua grade, como demonstrado na Figura 7. Vale destacar também, que o período que está em evidência na Tabela 4, é um

período com bastante nebulosidade devido ser o período chuvoso da região, com isto, possivelmente o modelo WRF tenha apresentado maiores dificuldade de representar a variação da intensidade da radiação solar, com isto, a média anual encontrada por Silva *et al* (2024), foram valores de 6500 Wh/m², contudo ultrapassam os valores estipulados para o investimento de energia fotovoltaica.

Tabela 4: Avaliação estatística média avaliando a precisão e a consistência dos modelos atmosféricos utilizando dados de forma horária durante o período de:10/03/2024 - 18/06/2024.

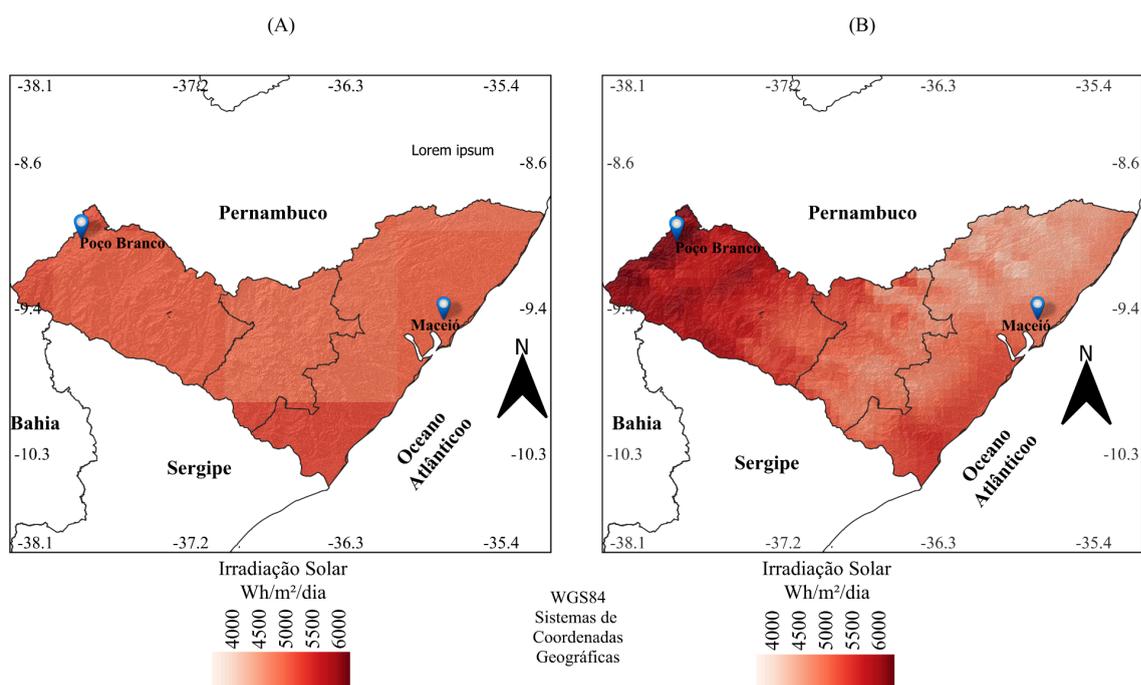
	WRF 4.5	NASA-POWER
Correlação	0,61	0,88
viés	824,47	894,99
RMSE	119,22	88,65
Média	4951,18	5021,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Depois de ter avaliado a eficiência pontual das bases de dados: modelo WRF e NASA-POWER, partiu-se para realizar estimativas espaciais da irradiância solar, ver figura 5. Sendo possível notar que mesmo o modelo NASA-POWER apresentar melhor condição estatística de forma pontual, espacialmente ele não tem tanta eficiência na estimativa da radiação solar, devido a sua baixa resolução espacial para a área de estudo, 0,5° x 0,5°, e para o setor elétrico e especialmente para a produção de energia solar, essa informação seja crucial para implantação de microusinas e parques solares para uma dada região. Com base na Figura 5, as estimativas realizadas com o modelo WRF-SOLAR indicam que os valores obtidos são superiores aos mencionados por Farina et al. (2017), que caracterizam o potencial para energia fotovoltaica como alto em locais com valores próximos a 3611 Wh/m².dia. Isso reforça que todo o estado possui um excelente potencial para a geração de energia solar, com destaque para as regiões do Sertão e Agreste, que apresentam os maiores índices de irradiância solar. Esse cenário pode estar associado à menor taxa de precipitação (Figura 2C,

relacionada teoricamente à menor nebulosidade) e à maior distância do oceano, refletindo o efeito da continentalidade.

Figura 7: Mapa da irradiação solar utilizando os modelos (A) NASA-POWER e (B) WRF-Solar, onde marca a região com maior índice de radiação, área próxima à cidade de Poço Branco/AL e Maceió/AL, onde foi realizado o presente estudo.

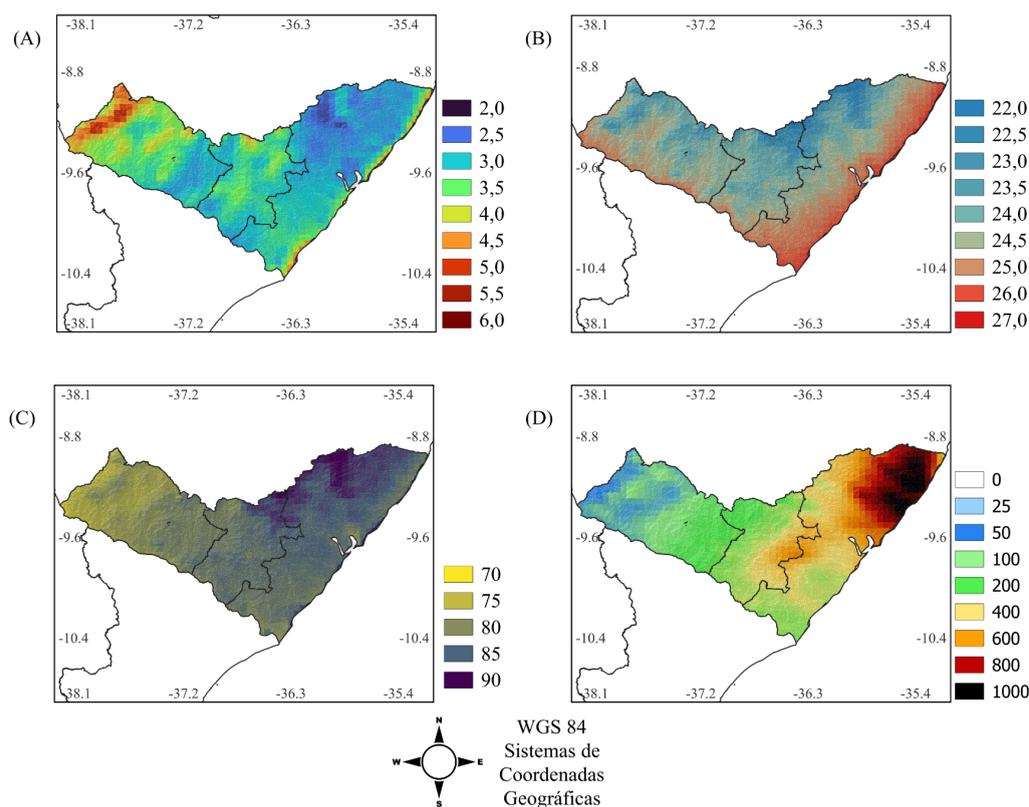


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

Também foi feito mapa para as variáveis meteorológicas extraídas do modelo atmosférico WRF, velocidade do vento a 10 metros, temperatura do ar a 2m, e umidade relativa do ar a 2m utilizando a equação 11. Com o intuito relacionar e explicar as possíveis variações da intensidade espacial da radiação solar. Percebe-se com o auxílio da figura 8, que as variáveis meteorológicas citadas, especialmente exercem ou são influenciadas pela variação espacial da radiação solar, o que mostra que a utilização da RLM de fato é uma ótima alternativa para realizar estimativas espaciais da produção de energia fotovoltaica, com isto, foi feito a análise apenas para o modelo WRF, partindo também do pressuposto que a outra base de dados NASA-POWER não apresentar melhores resultados no tocante a mapeamento. Novamente com o auxílio da figura 8, é possível notar que devido a orográfica

no sertão alagoano a temperatura e velocidade do vento são maiores do que até mesmo em locais próximo ao litoral.

Figura 8: Mapa da média diária das variáveis meteorológicas de (A) Velocidade do Vento (m/s), (B) Temperatura do Ar (°C), (C) Umidade Relativa do Ar (%) e (D) Precipitação Acumulada (mm).

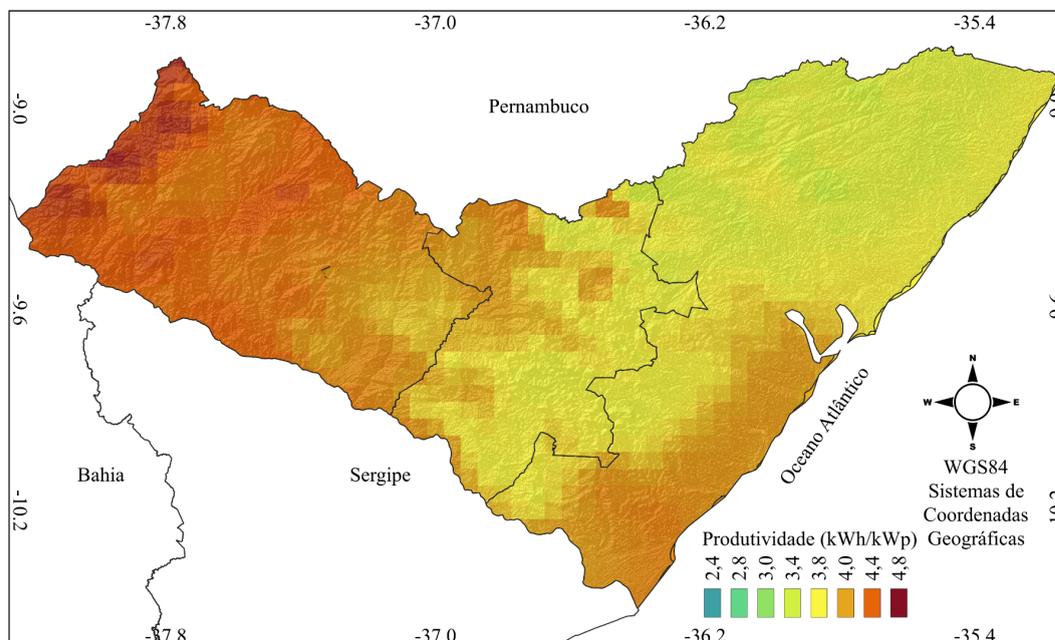


Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

4.4 Mapa Fotovoltaico

O mapa fotovoltaico (Figura 9) foi gerado a partir estimativa realizada com a RLM, Equação 11, pois estatisticamente apresentou melhores resultados. Onde o maior local de produtividade de energia solar seria a região do sertão alagoano, evidentemente a região que tem maior índice de irradiação solar (ver Figura 7), com isto seguindo esta linha de raciocínio seria o local de maior produção fotovoltaica, sendo assim, os municípios localizados nesta região como Poço Branco, abrigariam facilmente grandes usinas de energia solar, porém com um estudo prévio também de logística para instalação.

Figura 9: Mapa Fotovoltaico do estado de Alagoas utilizando a equação proposta pelo modelo RLM.



Fonte: Elaborada pelo autor (2024)

De acordo com a Tabela 5, onde foi feito uma comparação com diferentes estudos e diferentes localidades, o presente estudo tem um grande potencial, uma vez que os dados utilizados foram durante a época com muita nebulosidade, ou seja, menor taxa de irradiação e consequentemente menor rendimento, porém, ainda foram obtidos valores razoáveis para implementação do meio fotovoltaico no estado. Com isto, vale ressaltar que o estado de Alagoas tem um bom limiar para instalação distribuída de um sistema fotovoltaico, porém para instalação centralizada recomenda-se a região do sertão, como por exemplo a cidade de Poço Branco, onde a variabilidade da irradiação é muito baixa.

Tabela 5: Comparação do potencial de vários arranjos fotovoltaicos em comparação ao do estudo atual.

Localidade	Tamanho do sistema (kWp)	Yf (h/dia)	PR (%)	Referência
------------	--------------------------	------------	--------	------------

Maseru, Lesoto	281	4,17	67	Mpholo <i>et al.</i> , 2015
Adrar, Argélia	28	4,42	81,42	Sahouane <i>et al.</i> ,2019
Tânger, Marrocos	2	4,72	80,29	Herbazi <i>et al.</i> ,2019
Santos, Brasil	1,32	3,6	89,8	Gonzalez e Martins, 2024
Maceió, Brasil	2,72	3,44	88,69	Este estudo

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vale ressaltar a importância da temperatura e umidade relativa do ar, quando se trata de produção de energia solar (PR), pois os maiores coeficientes de correlação (tirando a própria irradiação solar) -0,74 e 0,52 demonstram que a eficiência na conversão de radiação solar para energia solar, também é impactada pela condição de operação do sistema de geração de energia. E a correlação negativa de -0,76 entre PR x Irradiância Solar, demonstra que a produção pode ser alta, porém pelos componentes estarem superaquecidos podem ter a eficiência diminuída, logo sugerindo aparelhos que proporcionem a refrigeração dos equipamentos, como instalações de cooler. Onde também foi notável a capacidade da precipitação em aumentar o PR, onde obteve correlação de 0,46 (com uma estação localizada a 5km de distância) e 0,48 (utilizando a EMA), concluindo que a precipitação ajuda no resfriamento e na limpeza, aumentando assim, o desempenho do sistema. Contudo as análises com Kt reforçaram que o PR não depende da irradiação solar global, uma vez que mesmo com irradiação solar alta o PR diminui, pelos fatores como temperatura, cabeamento e etc.

Quanto a instalação do sistema fotovoltaico, apesar da inclinação dos painéis da microusina ser de 8,53°, ou seja, estarem abaixo do recomendado da latitude de 9,59°, o arranjo fotovoltaico apresenta bons resultados. No entanto, é recomendado a correção para melhorar ainda mais a eficiência. Já no tocante a taxa de desempenho, o arranjo fotovoltaico demonstrou bons resultados, uma vez que os fabricantes garantem uma eficiência de 80% do microinversor, e os valores obtidos neste estudo ultrapassam os 85%.

Ressaltando que os valores resultantes de ambas as equações fotovoltaicas demonstraram ótimos índices, onde a equação proposta através do modelo RL tende a

superestimar, sendo válida e recomendada a utilização do modelo RLM uma vez que foi registrado os maiores rendimentos da produção e os maiores resultados da irradiação solar no Sertão alagoano, como esperado. Porém na aquisição apenas de um instrumento para medição da radiação solar a equação RL pode ser utilizada, uma vez que é um método mais econômico para utilização.

Futuramente uma melhor averiguação do mesmo arranjo fotovoltaico com mais dados será realizada, para assim verificarmos os diferentes resultados do desempenho do painel fotovoltaico com variações sazonais. Além de também pegar um período maior para ambos os modelos, com intuito de verificar a assertividade do modelo WRF em um período com menor nebulosidade e com outras parametrizações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRI, G. et al. A high resolution satellite view of surface solar radiation over the climatically sensitive region of Eastern Mediterranean. **Atmospheric Research**, v. 188, p. 107-121, 2017.

AMORIM, Ana Cleide Bezerra et al. DESEMPENHO DA ALTA RESOLUÇÃO DO WRF-SOLAR NA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL NA CIDADE DE MACAPÁ-AP. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2024.

ARAÚJO, Danielly Norberto; DE CARVALHO, Paulo César Marques; DUPONT, Ivonne Montero. Efeitos da acumulação de sujeira sobre o desempenho de módulos fotovoltaicos. **Revista Tecnologia**, v. 40, n. 2, 2019.

BENTOUBA, Said et al. Performance assessment of a 20 MW photovoltaic power plant in a hot climate using real data and simulation tools. **Energy Reports**, v. 7, p. 7297-7314, 2021.

BHATTACHARYA, Bimal K. et al. Assessing solar energy potential using diurnal remote-sensing observations from Kalpana-1 VHRR and validation over the Indian landmass. **International journal of remote sensing**, v. 34, n. 20, p. 7069-7090, 2013.

BREYER, Barbara Simões et al. ANÁLISE DA ESTRUTURA DOS MAPAS SOLARES DA ALEMANHA E O MAPA SOLAR DO RIO DE JANEIRO: ESTRATÉGIAS DE PROMOÇÃO DA ENERGIA SOLAR. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2022. p. 1-7.

CHEN, Fei; DUDHIA, Jimy. Coupling an advanced land surface–hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. **Monthly weather review**, v. 129, n. 4, p. 569-585, 2001.

COMIN, Alcimoni Nelci et al. Extreme rainfall event in the Northeast coast of Brazil: a numerical sensitivity study. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 133, p. 141-162, 2021.

DEBASTIANI, Gilson et al. Comparação do impacto da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos estáticos e com sistemas de rastreamento solar (LO, LO+NS). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, p. e12311427220-e12311427220, 2022.

Devore, J. L. (2009). **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**.

ELETROBRAS. *Atlas Solarimétrico do Estado de Alagoas*. Relatório técnico. Maceió: Eletrobras, 2008.

FARINA, Flávia C.; AYUP-ZOUAIN, Ricardo N.; DA SILVA, Tatiana Silva. Análise do potencial energético renovável baseado em sistemas de informação geográfica: caso do litoral norte, RS. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 11, n. 1, p. 33-47, 2017.

GARCIA, Denis William; REBOITA, Michelle Simões; CARVALHO, Vanessa Silveira Barreto. Evaluation of WRF performance in simulating an extreme precipitation event over the South of Minas Gerais, Brazil. **Atmosphere**, v. 14, n. 8, p. 1276, 2023.

GHOLAMI, Aslan et al. Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling. **Solar Energy**, v. 252, p. 176-194, 2023. DE OLIVEIRA GONZALEZ, Júlia; MARTINS, Fernando Ramos. Performance study of a photovoltaic system operating on the southeastern coast of Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 22, n. 5, p. 410-417, 2024.

GONZALEZ, Júlia de Oliveira; MARTINS, Fernando Ramos. Performance study of a photovoltaic system operating on the southeastern coast of Brazil. **IEEE Latin America Transactions**, v. 22, n. 5, p. 410-417, 2024.

GRELL, Georg A.; FREITAS, Saulo R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 14, n. 10, p. 5233-5250, 2014.

HERBAZI, Rachid et al. Performance evaluation and analysis of polycrystalline photovoltaic plant located in Northern Morocco. **International Journal of Ambient Energy**, v. 43, n. 1, p. 1262-1268, 2022.

HONG, Song-You; LIM, Jeong-Ock Jade. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 42, n. 2, p. 129-151, 2006.

IACONO, Michael J. et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D13, 2008.

IEA. (2014). Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems, Report IEA-PVPS T13-03. In **IEA Pypvs**.

JANJIC, Zaviša I. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Monthly weather review**, v. 122, n. 5, p. 927-945, 1994.

JED, Mohamed El Hacen et al. Performance analysis of 954,809 kWp PV array of Sheikh Zayed solar power plant (Nouakchott, Mauritania). **Renewable Energy Focus**, v. 32, p. 45-54, 2020.

JÚNIOR, José Marcelo Lopes et al. Frequência e probabilidade de ocorrência de transmitância atmosférica global para a região de Maceió-Alagoas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14685-14700, 2021.

JUNIOR, Rosiberto Salustiano da Silva et al. Avaliação de eventos extremos de precipitação, associados a desastres naturais. 2022.

LETU, Husi et al. High-resolution retrieval of cloud microphysical properties and surface solar radiation using Himawari-8/AHI next-generation geostationary satellite. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111583, 2020.

LIRA, André Luiz de Oliveira et al. AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS POLICRISTALINOS NA CIDADE DE NATAL APÓS 4 ANOS DE EXPOSIÇÃO AO AR LIVRE. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2022. p. 1-8.

LIU, Yang et al. Impact of different microphysics and cumulus parameterizations in WRF for heavy rainfall simulations in the central segment of the Tianshan Mountains, China. **Atmospheric research**, v. 244, p. 105052, 2020.

LUIZ, Eduardo Weide et al. Analysis of intra-day solar irradiance variability in different Brazilian climate zones. **Solar Energy**, v. 167, p. 210-219, 2018.

MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; ECHER, Mariza Pereira de Souza. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário: o Projeto Swera. **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 145-159, 2004.

MARTINS, F. Ramos; PEREIRA, E. Bueno; ABREU, S. L. Satellite-derived solar resource maps for Brazil under SWERA project. **Solar Energy**, v. 81, n. 4, p. 517-528, 2007.

MONIN, Andreï Sergeevich; OBUKHOV, Aleksandr Mikhailovich. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. **Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR**, v. 151, n. 163, p. e187, 1954.

MPHOLO, Moeketsi; NCHABA, Teboho; MONESE, Molebatsi. Yield and performance analysis of the first grid-connected solar farm at Moshoeshoe I International Airport, Lesotho. **Renewable energy**, v. 81, p. 845-852, 2015.

PEREIRA, Enio Bueno et al. Atlas brasileiro de energia solar. **São José dos Campos: Inpe**, v. 1, 2017.

REINDL, Thomas et al. Energy meteorology for accurate forecasting of PV power output on different time horizons. **Energy Procedia**, v. 130, p. 130-138, 2017.

RUBBI, Fazlay et al. Performance optimization of a hybrid PV/T solar system using Soybean oil/MXene nanofluids as A new class of heat transfer fluids. **Solar Energy**, v. 208, p. 124-138, 2020.

RUIZ-ARIAS, José A.; DUDHIA, Jimy; GUEYMARD, Christian A. A simple parameterization of the short-wave aerosol optical properties for surface direct and diffuse irradiances assessment in a numerical weather model. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1159-1174, 2014.

SAHOUANE, Nordine et al. Energy and economic efficiency performance assessment of a 28 kWp photovoltaic grid-connected system under desertic weather conditions in Algerian Sahara. **Renewable Energy**, v. 143, p. 1318-1330, 2019.

SALIMI, Hossein et al. Effect of dust concentration, wind speed, and relative humidity on the performance of photovoltaic panels in Tehran. **Energy sources, Part A: recovery, utilization, and environmental effects**, v. 45, n. 3, p. 7867-7877, 2023.

SEME, Sebastijan et al. Analysis of the performance of photovoltaic systems in Slovenia. **Solar Energy**, v. 180, p. 550-558, 2019.

SEVERINO, M.& OLIVEIRA, M. Fontes e Tecnologias de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas. **Energia, Economia, Rotas Tecnológicas: textos selecionados**, Palmas, ano 1, p. 265-322, 2010.

SHAIK, Feroz; LINGALA, Syam Sundar; VEERABOINA, Punnaiah. Effect of various parameters on the performance of solar PV power plant: a review and the experimental study. **Sustainable Energy Research**, v. 10, n. 1, p. 6, 2023.

SILVA, Bruce Francisco Pontes da et al. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 323-338, 2011.

Silva, L. S. de O., Junior, R. S. da S., Querino, C. A. S., Júnior, J. M. L., & Moura, M. A. L. (2023). Impactos das mudanças de cobertura vegetal no saldo de radiação e fluxo de calor no solo nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **Geografia**, 48(1983–8700).

SILVA, Luan Santos de Oliveira et al. Avaliação da complementaridade entre os recursos eólico-solar e considerações sobre estabilidade no setor elétrico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 3, p. 1942-1960, 2024.

SOUZA, Amaury de et al. Efeitos da temperatura ambiente e da velocidade do vento no desempenho de módulos solares fotovoltaicos. 2019.

SOUZA, Edson de Oliveira et al. Estimativa e espacialização da erosividade em mesorregiões climáticas no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. spe, p. 769-783, 2020.

SOUZA, Lucio Silva de et al. Evaluation of Cumulus and Microphysical Parameterization Schemes of the WRF Model for Precipitation Prediction in the Paraíba do Sul River Basin, Southeastern Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 181, n. 2, p. 679-700, 2024.

SRIVASTAVA, Ankur et al. Global analysis of atmospheric transmissivity using cloud cover, aridity and flux network datasets. **Remote Sensing**, v. 13, n. 9, p. 1716, 2021.

TAHIR, Zia R. et al. Effect of Temperature and Wind Speed on Efficiency of Five Photovoltaic Module Technologies for Different Climatic Zones. **Sustainability**, v. 14, n.23, p. 15810, 2022.

TIAN, Jiyang et al. Evaluation of the WRF physical parameterisations for Typhoo rainstorm simulation in southeast coast of China. **Atmospheric Research**, v. 247, p. 105130, 2021.

TIEPOLO, Gerson Máximo et al. Comparação entre o potencial de geração fotovoltaica no estado do Paraná com Alemanha, Itália e Espanha. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2014.

VAMVAKAS, Ioannis et al. Estimation of global horizontal irradiance using satellite-derived data across Middle East-North Africa: The role of aerosol optical properties and site-adaptation methodologies. **Renewable Energy**, v. 157, p. 312-331, 2020.