

TESTES DE SENSIBILIDADE UTILIZANDO O WRF-SOLAR NA ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA GLOBAL HORIZONTAL EM CINCO REGIÕES CLIMÁTICAS DO BRASIL

Samira de Azevedo Santos Emiliavaca – samira.emiliavaca@gmail.com

Ana Cleide Bezerra Amorim

Vanessa Almeida Dantas

Alan Rodrigues de Sousa

Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis – ISI-ER

Julliana Larise Mendonça Freire

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Resumo. A versão 4.4.1 do modelo WRF-Solar foi utilizado para simular a Irradiância Global Horizontal (GHI) de cinco regiões climáticas brasileiras: Sousa-PB, São João do Piauí-PI, Ilha Solteira-SP, Mossoró-RN e Bom Jesus da Lapa-BA. O objetivo principal foi verificar o desempenho do algoritmo Fast All-sky Radiation Model Solar Applications (FARMS) em dois experimentos, para o mês chuvoso e o mês seco de cada localidade. Para validação dos dados foram usados dados de GHI medidos por estação solarimétrica automáticas (ESAs) instaladas e operadas pelo Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis, em cada uma das localidades. Os dados observacionais foram qualificados conforme proposto pela Baseline Surface Radiation Network (BSRN). Para execução da modelagem utilizaram-se dados de entrada de reanálises do ERA5. O Ano Meteorológico Típico (Typical Meteorological Year, TMY) foi calculado a partir do método Sandia. A utilização do algoritmo FARMS reduziu ligeiramente o RMSE relativo da GHI durante o mês chuvoso de três estações, no entanto no mês seco os resultados não mostraram mudanças significativas. Os resultados mostraram erros entre 8 e 20%, entre o mês chuvoso e seco, valores bem menores que literatura exibe, e em geral os testes de sensibilidade apresentaram resultados mais eficientes para os meses secos.

Palavras-chave: Modelagem numérica, Recurso solar, WRF.

1. INTRODUÇÃO

Os impasses tecnológicos e econômicos para o crescimento da participação da energia solar na matriz elétrica brasileira vêm sendo vencidos nos últimos anos. No entanto, ainda existem lacunas relacionadas à variabilidade de oferta e dependências das condições de tempo e do clima (Machado *et al.*, 2016; De Sousa Stilpen *et al.*, 2015). Apesar da maior parte do território brasileiro situar-se na região tropical, que recebe grande incidência de radiação solar ao longo do ano, com pouca variabilidade interanual (Pereira *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2008a). Para o desenvolvimento de sistemas solares a caracterização precisa do recurso solar é imprescindível, uma vez que a radiação atinge a superfície de forma variável, principalmente devido à atuação de sistemas meteorológicos e sazonalidade.

As condições atmosféricas de tempo (escala de horas a poucos dias) e clima (escala de meses a anos) são uma barreira que se opõe à exploração e uso pleno do recurso solar. A disponibilidade e variabilidade, temporal e espacial, do recurso solar está intrinsecamente associado às condições de tempo e clima da região. Isto ocorre porque alguns sistemas meteorológicos provocam alterações na nebulosidade e nas concentrações de gases e aerossóis, afetando direta e indiretamente os processos de transferência radiativa que atenuam a radiação solar incidente (Pereira *et al.*, 2017).

A região tropical do Brasil apesar de apresentar alto potencial de radiação solar, também apresenta alto índice de nebulosidade. Parâmetros meteorológicos como, temperatura, vapor d'água, concentração de aerossóis, velocidade e direção do vento podem provocar flutuações nos módulos fotovoltaicos e, com isso, causar instabilidade nas usinas solares (Yagli *et al.*, 2019; Nobre, 2015).

Mesmo com o potencial energético solar bem reconhecido no Brasil, dados confiáveis ainda são escassos. Diversos pesquisadores encontraram dificuldades ao investigarem a disponibilidade e variabilidade da irradiância solar no Brasil, devido a baixa densidade de estações solarimétricas (Pereira *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2016; Martins; Pereira, 2011; Martins *et al.*, 2007; Leal e Tiba, 2006). A coleta de dados observacionais de radiação ainda é bastante onerosa, o que torna as séries temporais históricas contínuas escassas. Com isso, a aplicação da modelagem numérica da atmosfera vem sendo uma ferramenta importante para o mapeamento do recurso solar, tanto para suprir esse déficit de dados radiométricos, como por contabilizar o impacto das condições climáticas. As previsões de irradiância são muito importantes para auxiliar no planejamento energético. A previsão precisa dos recursos energéticos implicará em uma otimização da produção de energia e o domínio de ferramentas, como a modelagem numérica, que possibilitem informações como essa, estarão na vanguarda da geração de energia por fontes renováveis.

Os modelos numéricos de previsão de tempo e clima são amplamente usados nos centros meteorológicos e são comumente aplicados em diversas áreas como, agricultura, recursos hídricos, transporte e, mais recentemente no setor energético. Esses modelos são capazes de simular os principais processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera. As previsões de precipitação, temperatura e vento são amplamente utilizadas pela comunidade científica. As previsões numéricas das variáveis associadas ao setor energético como, a irradiância solar e vento, também tem sido largamente explorada. O conhecimento em alta resolução da distribuição espacial do recurso solar deve ser alcançado com uso de modelos numéricos.

Para um melhor desempenho dos modelos numéricos, testes de sensibilidade são necessários com diferentes esquemas de parametrizações para seleção apropriada da melhor configuração que possa representar a variável simulada. A literatura, de modo geral, mostra que o desempenho da simulação se torna dependente da região, da escala e do objeto de estudo (Ruiz *et al.*, 2010; Zepka, 2011; Bussoni *et al.*, 2022). Assim este estudo propõe avaliar a sensibilidade do modelo numérico WRF-Solar em sua versão 4.4.1 nas estimativas da Irradiância Global Horizontal em cinco regiões climáticas do Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Área de estudo

A localização das cinco áreas de interesse desse trabalho, onde foram instaladas estações solarimétricas e que foram usadas como área de estudo estão localizadas nos município de Sousa – PB (ESA01), São João do Piauí – PI (ESA02), Ilha solteira – SP (ESA03), Mossoró – RN (ESA04) e Bom Jesus da Lapa – BA (ESA 05). Todas as estações foram instaladas e o processo de aquisição e qualificação dos dados tem sido feito periodicamente. A localização geográfica pode ser observada na Fig. 1.

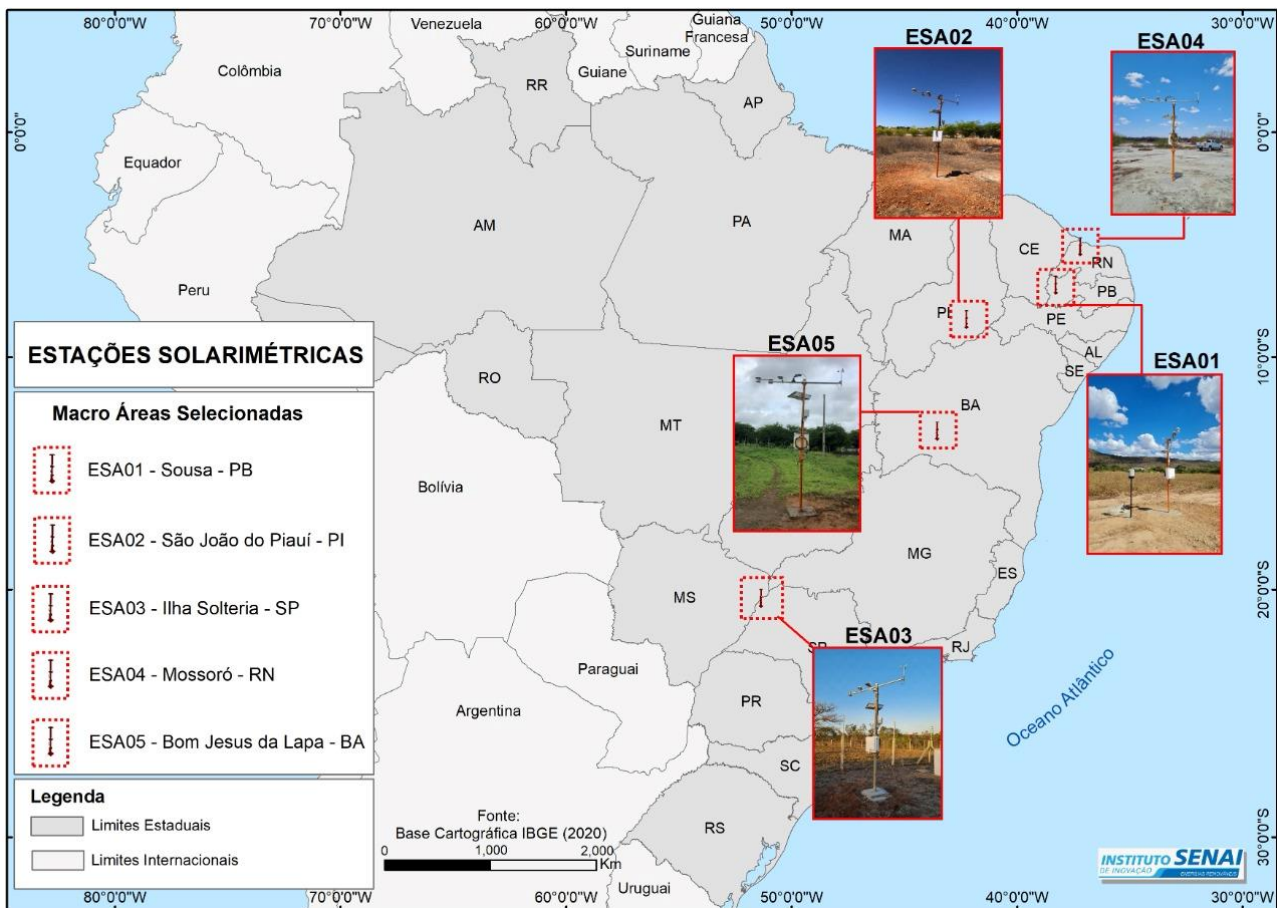


Figura 1 - Mapa de localização das estações solarimétricas: ESA01- Sousa/PB, ESA02 - São João doPiauí/PI, ESA03 - Ilha Solteira/SP, ESA04 – Mossoró/RN e ESA05 – Bom Jesus da Lapa - BA.

As estações solarimétricas são compostas por sensores de temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e irradiância global horizontal. Os dados são aquisitados a cada 1 segundo e integrados a cada 1 minuto, por um coletor de dados, que pode ser acessado via rede de internet. Uma descrição completa sobre os equipamentos pode ser observada na Tab.1.

Tabela 1- Lista de equipamentos contidos nas estações solarimétricas.

Instrumentos	Variável medida/Função	Sigla	Unidade
Datalogger CR1000X – Campbell Scientific	Aquisição de dados	-	-
Modem CELL 215 – Campbell Scientific	Transmissão dos dados via internet	-	-
Antena Unidirecional TRA6927M3PW-001 - Laird	Amplificar Sinal 4G	-	-
Painel Fotovoltaico 20M-V – Electrical Raiting	Geração de Energia	-	W
Piranômetro CPM 11 – Kipp & Zonen	Irradiância Global Horizontal	GHI 1	W/m ²
Piranômetro CPM 11 – Kipp & Zonen	Irradiância Global Horizontal	GHI 2	W/m ²
Piranômetro CPM 11 – Kipp & Zonen	Irradiância Global Refletida	GRI	W/m ²
Termohigrômetro Hygro VUE10 – Campbell Scitenfic	Temperatura do ar	Temp	°C
Anemômetro Wind SPD Sensor – Met One Instruments	Velocidade do Vento	Vel	m/s
Célula de referência RC18 series	Irradiância Global Horizontal	GHI 3	W/m ²

Os dados de Irradiância Global Horizontal - GHI foram ajustados de acordo com o algoritmo proposto pela *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) (Long e Shi, 2008). Dados do *National Solar Radiation Database* (NSRDB) - *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (Sengupta *et al.*, 2018) foram utilizados para estimar o ano meteorológico típico (*Typical Meteorological Year*, TMY) para as cinco localidades, Kim *et al.*, (2020; 2022).

2.2. Ano Meteorológico Típico - TMY

Entre os diferentes métodos para o cálculo do TMY, o *Sandia National Laboratories* é um dos métodos mais aceitos (Skeiker, 2006; Hall *et al.*, 1978). O TMY foi estimado com dados do NSRDB/NREL (Sengupta *et al.*, 2018). O TMY são meses individuais que representa a disponibilidade do recurso de energia solar visando o desenvolvimento de projetos para aproveitamento do recurso energético. Mais detalhes a respeito do método Sandia encontra-se em Wilcox *et al.* (2008).

2.3. Modelagem Atmosférica em mesoescala: WRF-Solar.

O modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*) tem uma versão desenvolvida para estudos de energia solar, o WRF-Solar. Nesta versão foram feitas melhorias e novos desenvolvimentos para atender a demanda dos estudos de energia solar. Jimenez *et al.* (2016) destaca que as principais alterações são: a) disponibilidade das componentes de irradiância solar global horizontal (GHI), direta normal (DNI) e difusa horizontal (DHI), usadas na indústria deste setor; b) parametrização de efeito direto do aerossol com melhorias na representação das interações entre radiação solar-aerossol e radiação-nuvem (Ruiz-Arias *et al.*, 2014); c) parametrização do efeito indireto do aerossol, que considera os processos físicos entre formação de nuvem e as propriedades higroscópicas do aerossol (Ginoux *et al.*, 2001; Thompson; Eidhammer, 2014); d) parametrização de nuvens de subgrade com tratamento híbrido, resolvendo nuvens rasas e profundas e seus efeitos na radiação de onda curta (Deng *et al.*, 2014); e) implementação do algoritmo *Fast All-sky Radiation Model for Solar Applications* (FARMS, Xie *et al.*, 2016), que calcula a irradiância solar em superfície para cada passo de tempo do modelo, diferentemente do método padrão que faz interpolação entre os intervalos de saída das previsões.

A versão WRF-Solar tem sido amplamente utilizada pela comunidade científica mundial tanto para publicação de artigos científicos como para a produção de atlas solarimétricos. Diversos autores têm divulgado as previsões de irradiação solar no Brasil utilizando esse modelo em todas as escalas de previsão, os resultados têm sido satisfatórios (Lima *et al.*, 2020; Ramos *et al.*, 2020). No entanto, ainda é necessário expandir esses estudos para calibrar o modelo e, assim, minimizar os erros associados.

Testes de sensibilidade são necessários com diferentes esquemas de parametrizações para seleção apropriada e que melhor representassem a variável GHI. A literatura, de modo geral, mostra que o desempenho da simulação se torna dependente da região, da escala e do objeto de estudo (Ruiz *et al.*, 2010; Zepka, 2011; Bussoni *et al.*, 2022). Os testes foram executados para o período chuvoso e seco da região. A Tab.2 mostram dois conjuntos de parametrizações utilizados nos testes de sensibilidade, P1 e P2. Para cada experimento foi adicionada a saída GHI, quando esta foi extraída da versão *default* do modelo, esta foi denominada GHI1, e quando extraída a partir do algoritmo FARMS, a variável irradiância global horizontal foi chamada de GHI2.

Tabela 2 - Parametrizações físicas usadas nos experimentos do WRF-Solar para o período chuvoso e menos chuvoso.

	Parametrização (P1)	Parametrização (P2)
Microfísica	Single-Moment 5-class (4)	Single-Moment 5-class (4)
Radiação de onda longa	RRTMG (4)	RRTMG (1)
Radiação de onda curta	RRTMG (4)	RRTMG (1)
Camada superficial	MYNN (5)	MYNN (5)
Processos de superfície	Unified Noah Land Surface model (2)	Unified Noah Land Surface model (2)
Camada limite planetária	MYNN 2.5 level TKE (5)	MYNN 2.5 level TKE (5)
Cumulus	Grell 2D (5)	Grell 2D (1)

Para a avaliação da GHI foram criados dois domínios, 6 e 2 km de resolução horizontal, no entanto os resultados se limitam para o domínio de 6 km. A grade mãe foi centrada sobre a latitude e longitude de cada estação solarimétrica conforme coordenadas definidas na Tab.3.

Tabela 3 – Coordenadas Geográficas das estações solarimétrica e pontos de grade.

Estação Solarimétrica	Cidade	Latitude	Longitude	Pontos de grade (e_we e e_sn)
ESA01	Sousa-PB	-6,77	-38,20	100 e 106
ESA02	São João do Piauí-PI	-8,36	-42,25	100 e 92
ESA03	Ilha Solteira-SP	-20,43	-51,34	100 e 106
ESA04	Mossoró-RN	-5,18	-37,34	100 e 106
ESA05	Bom Jesus da Lapa-BA	-13,14	-43,24	120 e 100

Os dados de entrada para as simulações foram de reanálises do ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A resolução espacial do ERA5 é aproximadamente 25 km, resolução temporal de 1 em 1 hora e a vertical utilizada foi de 38 níveis, com pressão no topo da atmosfera de 10 hPa. As simulações apresentam saídas a cada 1 hora, sendo retiradas as primeiras 24 horas de *spin-up*, que representa o tempo para ajuste das simulações.

Para a execução das simulações computacionais de mesoescala, foi utilizado o Cluster do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho (NPAD) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal. Todo o ambiente computacional foi preparado para receber adequadamente as simulações. A instalação do modelo e suas dependências encontram-se disponíveis no sistema. As simulações têm um custo computacional relativamente alto, devido à necessidade do refinamento da grade.

2.4. Métricas de desempenho

O erro sistemático e a habilidade do WRF-Solar foram avaliados a partir da correlação de person r , a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o $rmse$ relativo, Wilks (2006).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida de associação linear entre variáveis definida pela Eq. (1). A raiz do erro quadrático médio (RMSE) disponibiliza valores do erro na mesma unidade de medida da variável analisada e pode ser descrita na Eq. (2). As simulações são representadas pela S e os dados observados O .

$$r = \sum \frac{(s_i - \bar{s})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{(s_i - \bar{s})^2 + (o_i - \bar{o})^2}} \quad (1)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O TMY foi calculado para as coordenadas de cada estação solarimétrica, e foram realizados os testes de sensibilidade para o mês mais chuvoso e o mês seco de cada localidade. Os resultados dos meses típicos utilizados nesse trabalho podem ser observados na Tab.4.

Tabela 4 – Mês mais seco e mês chuvoso de acordo o TMY de cada estação solarimétrica.

Estação Solarimétrica	Cidade	Mês seco	Mês chuvoso
ESA01	Sousa-PB	09/2001	03/2021
ESA02	São João do Piauí-PI	08/2000	02/2003
ESA03	Ilha Solteira-SP	07/2010	01/2013
ESA04	Mossoró-RN	11/1998	04/2021
ESA05	Bom Jesus da Lapa-BA	07/2005	12/2011

As Tab.5 a 8 mostram a habilidade da simulação do WRF-Solar para os experimentos P1 e P2, e suas respectivas saídas *default* e FARMS (GHI1 e GHI2) para as cinco regiões estudadas. De um modo geral o modelo mostrou resultado mais eficientes para os meses secos. Período que a literatura discute que o WRF-Solar simula satisfatoriamente, ou seja, sob condições sem nuvens (Gueymard e Jimenez, 2018). A literatura exhibe erros do modelo WRF-Solar entre 20 e 25% (Fountoukis *et al.*, 2018) e esse tipo de resultado na simulação de GHI é comum em diversas partes do mundo (Ruiz-Arias *et al.*, 2013; Zempila *et al.*, 2016; Fountoukis *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2022). Os resultados mostraram erros entre 8 e 20%, entre o mês chuvoso e seco, valores bem menores que literatura exibiu.

Observa-se que na ESA01 (Tab. 5) para o mês chuvoso, os RMSE's variaram de 137,89 a 158,98 W/m², contudo a P1 apresentou melhor desempenho com a GHI2 nos resultados a partir do RMSE. O erro foi de 13% e a correlação de 0,94. Para o mês chuvoso, as métricas da P2 com a saída *default* GHI1 apresentou os melhores resultados, com um RMSE de 103,63, erro de 10% e correlação de 0,97.

Na Tab. 6 observa-se os resultados do teste de sensibilidade para a ESA2 e pode-se observar que para o mês chuvoso o melhor resultado foi apresentado pela P2 com a saída *default* GHI1, com RMSE de 172,36 W/m², erro de 16% e correlação de 0,89. Enquanto que para o mês seco o RMSE da P2 com saída GHI1 apresentou a melhor configuração, 96,58 W/m², erro de 9% e correlação de 0,97.

Para a ESA03 (Tab.7) os RMSE's foram consideravelmente menores, variaram de 62,67 a 67,42 W/m² para P1 e 73,41 a 73,14 W/m² no P2, o percentual de erro apresentou-se entre 8 e 9% e as correlações acima de 0,9. O experimento P1 foi apresentou menores RMSE, e percentual de erro menor ficou na GHI1, o modelo FARMS não corrigiu erros no período seco de Ilha Solteira.

Na Tab.8 observa-se os resultados para a ESA04. Observa-se que nessa estação o modelo FARMS melhorou a configuração do modelo tanto no mês chuvoso, quanto no mês seco, com RMSEs de 137,59 e 142,20 W/m² respectivamente. Os erros foram de 13% em ambos os meses, enquanto que as correlações foram 0,91 (mês chuvoso) e 0,93 (mês seco).

Para a ESA5 (Tab.9) para o mês chuvoso, a P1 com saída GHI1 apresentou as melhores métricas: RMSE de 207,46 W/m², erro de 19% e correlação de 0,85. Para o mês seco, o algoritmo FARMS melhorou a P1, com RMSE de 69,53 W/m², erro de 8% e correlação de 0,97

Tabela 5 – Métricas entre as simulações do WRF-Solar entre P1 e P2 para a ESA 01-Sousa-PB.

ESA01 – Sousa-PB				
Março (mês chuvoso)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	140,07	13%	0,92
	GHI2	137,89	13%	0,94
P2	GHI1	148,67	14%	0,93
	GHI2	158,98	14%	0,93
Setembro (mês seco)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	114,36	11%	0,95
	GHI2	104,10	10%	0,96
P2	GHI1	103,63	10%	0,97
	GHI2	105,56	10%	0,94

Tabela 6 – Métricas entre as simulações do WRF-Solar entre P1 e P2 para a ESA 02-São João do Piauí-PI.

ESA02 – São João do Piauí-PI				
Fevereiro (mês chuvoso)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	175,19	16%	0,86
	GHI2	175,8	16%	0,87
P2	GHI1	172,36	16%	0,89
	GHI2	192,17	17%	0,87
Agosto (mês seco)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	103,67	10%	0,96
	GHI2	100,40	10%	0,96
P2	GHI1	96,58	9%	0,97
	GHI2	100,1	10%	0,97

Tabela 7 – Métricas entre as simulações do WRF-Solar entre P1 e P2 para a ESA 03-Ilha Solteira-SP.

ESA03 – Ilha Solteira-SP				
Janeiro (mês chuvoso)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	205,83	19%	0,84
	GHI2	201,58	18%	0,85
P2	GHI1	210,85	19%	0,85
	GHI2	216,27	19%	0,85
Julho (mês seco)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	62,67	8%	0,97
	GHI2	67,42	9%	0,97
P2	GHI1	73,41	9%	0,96
	GHI2	73,14	9%	0,97

Tabela 7 – Métricas entre as simulações do WRF-Solar entre P1 e P2 para a ESA 04-Mossoró-RN.

ESA04 – Mossoró-RN				
Abril (mês chuvoso)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	155,76	15%	0,88
	GHI2	137,59	13%	0,91
P2	GHI1	159,07	15%	0,91
	GHI2	174,32	16%	0,91
Novembro (mês seco)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	146,9	14%	0,92
	GHI2	142,2	13%	0,93
P2	GHI1	146,7	14%	0,94
	GHI2	159,3	15%	0,93

Tabela 8 – Métricas entre as simulações do WRF-Solar entre P1 e P2 para a ESA 05-Bom Jesus da Lapa-BA.

ESA05 – Bom Jesus da Lapa-BA				
Dezembro (mês chuvoso)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	207,46	19%	0,85
	GHI2	213,67	19%	0,85
P2	GHI1	209,92	19%	0,87
	GHI2	226,22	20%	0,85
Julho (mês seco)				
		RMSE (W/m ²)	nRMSE (%)	r (adimensional)
P1	GHI1	74,47	8%	0,97
	GHI2	69,53	8%	0,97
P2	GHI1	120,52	13%	0,92
	GHI2	119,78	13%	0,93

4. CONCLUSÕES

O desempenho da simulação se torna dependente das condições do clima da região, assim a necessidade de testes de sensibilidade com diferentes esquemas de parametrizações é considerada uma etapa decisiva na modelagem atmosférica. Foram realizados testes de sensibilidade em cinco regiões climáticas diferentes. Os testes foram executados para os meses chuvoso e seco, e os resultados mostraram que o WRF-Solar apresentou-se eficiente, principalmente no mês seco. Os resultados mostraram erros entre 8 e 20%, entre o mês chuvoso e seco, valores bem menores que literatura mostrou que variavam entre 20 e 25%.

A partir da realização desse trabalho verificou-se que a região climática da ESA01-Sousa-PB apresentou os menores erros. As regiões climáticas da ESA01-Sousa-PB, ESA02-São João do Piauí-PI e ESA05-Bom Jesus da Lapa-BA a parametrização default apresentou erros menores que os apresentados pela parametrização FARMS durante o período chuvoso.

Verificou-se que no mês chuvoso apesar das limitações que a literatura discute, os resultados também mostraram eficiência no uso da modelagem para o setor da indústria solar. O modelo FARMS corrigiu ligeiramente os erros da GHI em algumas regiões para o período chuvoso, no entanto estudos mais aprofundados estão em andamento para trazer resultados mais robustos em relação a recente melhoria do WRF-Solar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto SENAI de Inovação em Energias Renováveis - ISI-ER pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, e à CTG Brasil pelo aporte financeiro atual no âmbito do projeto ANEEL PD-10381-0620/2022 e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil (MCTI) pela bolsa de pesquisa no âmbito do projeto “Mapeamento do Recurso Eólico da Margem Equatorial Brasileira”, número de concessão 920008/2021, concedida a segunda autora.

REFERÊNCIAS

- Bussoni, C. V. A., Moreira, D. S., & Machado, J. P. (2022). Avaliação do Modelo WRF para Aplicação de um índice de Previsão de Geadas na Região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 279-287.
- De Sousa Stilpen, D. V.; Cheng, V. Solar fotovoltaics in Brazil: A promising renewable energy market. In: 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). IEEE, 2015. p. 1-5.
- Deng, A.; B. J. Gaudet; J. Dudhia; K. Alapaty. Implementation and evaluation of a new shallow convection scheme in WRF. 26th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/22nd Conf. on Numerical Weather Prediction, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 12.5. Available online at <https://ams.confex.com/ams/94Annual/webprogram/Paper236925.html>. 2014.
- Fountoukis, C., Martín-Pomares, L., Perez-Astudillo, D., Bachour, D., Gladich, I., 2018. Simulating global horizontal irradiance in the Arabian Peninsula: Sensitivity to explicit treatment of aerosols, *Solar Energy*, v. 163, p. 347 – 355. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.00>
- Ginoux, P.; Chin, M.; Tegen, I.; *et al.* Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 106, n. D17, p. 20255–20273, 2001

- Gueymard, C.A.; Jimenez, P.A., 2018. Validation of real-time solar irradiance simulations over Kuwait using WRF-solar. In: the 12th International Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, EuroSun2018, Rapperswil, Switzerland.
- Kim, J. H., Jimenez, P. A., Dudhia, J., Yang, J., Sengupta, M., Xie, Y., 2020. Probabilistic Forecast of All-Sky Solar Radiation Using Enhanced WRF-Solar: Preprint. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-5D00-77693.
- Kim, J. H.; Jimenez, P. A., Sengupta, M., Yang, J., Dudhia, J., Alessandrini, S., Xie, Y., 2022. The WRF-Solar Ensemble Prediction System to Provide Solar Irradiance Probabilistic Forecasts. *Journal of Photovoltaics*, v.12, n. 1.
- Leal, S. S.; Tiba, C. Iluminância e irradiação solar global na região Nordeste do Brasil. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006.
- Lima, F. J. L.; Pereira, E. B.; Martins, F. R. Forecast for surface solar irradiance at the Brazilian Northeastern region using NWP model and artificial neural networks. *Renewable Energy*, v. 87, p. 807-8186, 2016.
- Lima, F. *et al.* Comparing solar data from NWP models for Brazilian territory. *IEEE Latin America Transactions*, v. 18, n. 05, p. 899-906, 2020.
- Long, C. N., Shi, Y., 2008. “An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements”, *The Open Atmospheric Science Journal*, v.2, n.1, p.23–37. doi: 10.2174/1874282300802010023.
- Machado, I. S.; Borba, B. S. M. C.; Maciel, R. S. Modeling distributed PV market and its impacts on distribution System: A Brazilian case study. *IEEE Latin America Transactions*, v. 14, n. 11, p. 4520-4526, 2016.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B.; Abreu, S. L. Satellite derived solar resources maps for Brazil under SWERA project. *Solar Energy*, v. 81, p. 517-528, 2007.
- Martins, F. R. *et al.* Solar energy scenarios in Brazil. Part two: Photovoltaics applications. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2865-2877, 2008.
- Martins, F. R.; Pereira, E. B. Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, p. 265-276, 2011.
- Nobre, A. M. Short-term solar irradiance forecasting and photovoltaic systems performance in a tropical climate in Singapore. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina: Programa de pós-graduação em engenharia civil. Florianópolis, 2015
- Pereira, E. B. *et al.* Atlas Brasileiro de Energia Solar. INPE. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima, F. L., Rüther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>
- Ramos, D. N. S. *et al.* Avaliação preliminar do modelo wrf-solar para previsão de curto prazo das irradiações global horizontal e direta normal. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS 2018. 2020.
- Ruiz-Arias, J. A., J. Dudhia, F. J. Santos-Alamillos, and D. Pozo Vázquez, 2013: Surface clear-sky shortwave radiative closure intercomparisons in the Weather Research and Forecasting model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 9901–9913, doi:10.1002/jgrd.50778.
- Ruiz-Arias, J. A.; Dudhia, J.; Gueymard, C. 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.
- Ruiz, J. J., Saulo, S. y Nogués-Paegle, 2010. WRF Model Sensitivity to Choice of Parameterization over South America: Validation against Surface Variables. *Monthly Weather Review*, 138, 3342–3351.
- Sengupta, M. *et al.*, 2018. “The national solar radiation data base (NSRDB),” *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 89, pp. 51–60.
- Thompson, G., and T. Eidhammer, 2014: A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3636–3658, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0305.1>.
- Wilcox, S., Marion, W., 2008. Users Manual for TMY3 Data Sets. National Renewable Energy Laboratory.
- Wilks, D. S., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. International Geophysics Series. 2a. Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, v. 91, 627 p.
- Yagli, G. M.; Yang, D.; Srinivasan, D. Reconciling solar forecasts: Sequential reconciliation. *Solar Energy*, v. 179, p. 391-397, 2019
- Zempila M.-M., Giannaros T.M., Bais A. and Melas D., 2016. Evaluation of WRF shortwave radiation parameterizations in predicting global horizontal irradiance in Greece. *Renew. Energ.* 86, 831-840. doi: 10.1016/j.renene.2015.08.057
- Zepka, G.S. Previsão de Descargas Atmosféricas Usando o Modelo de Mesoescala WRF. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 178 p, 2011.
- Xie, Y., Sengupta, M., & Dudhia, J. (2016). A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications (FARMS): Algorithm and performance evaluation. *Solar Energy*, 135, 435-445.

SENSITIVITY TESTS USING WRF-SOLAR TO ESTIMATE HORIZONTAL GLOBAL IRRADIANCE IN FIVE CLIMATE REGIONS IN BRAZIL

Abstract. *Version 4.4.1 of the WRF-Solar model was used to simulate the Global Horizontal Irradiance (GHI) of five Brazilian climatic regions: Sousa-PB, São João do Piauí-PI, Ilha Solteira-SP, Mossoró-RN and Bom Jesus da Lapa-BA. The main objective was to verify the performance of the Fast All-sky Radiation Model Solar Applications (FARMS) algorithm in two experiments, for the rainy month and the dry month in each location. To validate the data, GHI data measured by automatic solarimetric stations (ESAs) installed and operated by the SENAI Institute for Innovation in Renewable Energy, in each of the locations, was used. Observational data were explored as proposed by the Baseline Surface Radiation Network (BSRN). To perform the modeling, we used input data from ERA5 reanalysis. The Typical Meteorological Year was calculated using the Sandia method. The use of the FARMS algorithm managed to improve the RMSE relative to the GHI during the rainy month of three seasons, however in the dry month the results did not show significant changes. The results showed errors between 8 and 20%, between the rainy and dry months, values much lower than the literature shows, and in general the sensitivity tests obtained more efficient results for the dry months.*

Keywords: *Numerical modeling, Solar resource, WRF.*