

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO WRF-SOLAR PARA PREVISÃO DE CURTO PRAZO DAS IRRADIÂNCIAS GLOBAL HORIZONTAL E DIRETA NORMAL

Diogo Nunes da Silva Ramos (INPE) - diogonsramos@gmail.com

Francisco José Lopes de Lima (INPE) - francisco.lopes.lima@gmail.com

Madeleine Sánchez Gácita Casagrande (UNIFESP) - madeleine.gacita@inpe.br

Rodrigo Santos Costa (INPE) - rodrigo.costa@inpe.br

André Rodrigues Goncalves (INPE) - andre.goncalves@inpe.br

Enio Bueno Pereira (INPE) - enio.pereira@yahoo.com.br

Eder Paulo Vendrasco (INPE) - eder.vendrasco@inpe.br

Resumo:

Com o crescimento contínuo da energia solar fotovoltaica no Brasil, o aprimoramento da previsão da irradiância solar de curtíssimo (minutos a poucas horas) a curto prazo (horas a 3 dias) é de suma importância. Dentre as metodologias disponíveis, a previsão numérica de tempo é uma das mais tradicionais para previsão de curto prazo. O modelo Weather Research and Forecasting - WRF foi usado neste estudo em duas versões: a versão 3.9.1.1, usada operacionalmente no CPTEC/INPE; e a versão WRF-Solar, desenvolvida para atender algumas dificuldades inerentes ao setor de energia, principalmente o efeito das nuvens e dos aerossóis atmosféricos na irradiação solar. Este trabalho avalia a previsão das irradiâncias global horizontal (GHI) e direta normal (DNI) em até 72 horas durante os meses de agosto/2015 e janeiro/2016 para Cachoeira Paulista - SP, usando três experimentos físicos nas duas versões do WRF para um domínio com resolução horizontal de 3 km. As condições iniciais e de fronteira foram provenientes das previsões operacionais do CPTEC, com resolução horizontal de 9 km e temporal de 3 h. A configuração com parametrização física de nuvens de subgrade (Experimento2) na versão WRF-Solar obteve o melhor desempenho geral em comparação com a versão operacional do CPTEC. O ganho no erro médio foi ainda mais expressivo no mês chuvoso de janeiro/2016, atingindo quase 40% para GHI e pouco mais de 60% para DNI. O ciclo diurno médio de GHI, a previsão da cobertura de nuvens e o histograma do erro médio com o WRF-Solar usando física de nuvens de subgrade (Experimento SOLAR_E2) se mostraram bastante promissores para a indústria brasileira da energia solar fotovoltaica. Contudo, estudos complementares são necessários para detalhar os impactos diretos e indiretos dos aerossóis nas previsões, assim como, avaliar o experimento SOLAR_E2 para outras regiões do Brasil.

Palavras-chave: *Previsão numérica de tempo, Aerossóis, Energia Solar*

Área temática: *Radiação Solar*

Subárea temática: *Outros Dados Meteorológicos aplicados à energias renováveis*

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO WRF-SOLAR PARA PREVISÃO DE CURTO PRAZO DAS IRRADIÂNCIAS GLOBAL HORIZONTAL E DIRETA NORMAL

Diogo Nunes da Silva Ramos – diogo.ramos@inpe.br

Francisco José Lopes de Lima – francisco.lopes@inpe.br

Rodrigo Santos Costa – rodrigo.costa@inpe.br

André Rodrigues Gonçalves – andre.goncalves@inpe.br

Ênio Bueno Pereira – enio.pereira@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Ciência do Sistema Terrestre

Eder Paulo Vendrasco – eder.vendrasco@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

Madeleine Sanchez Gácita Casagrande – madeleine.gacita@unifesp.br

Universidade Federal de São Paulo, Instituto do Mar

1. Radiação Solar. 1.2. Outros dados meteorológicos aplicados a energias renováveis

Resumo. Com o crescimento contínuo da energia solar fotovoltaica no Brasil, o aprimoramento da previsão da irradiância solar de curtíssimo (minutos a poucas horas) a curto prazo (horas a 3 dias) é de suma importância. Dentre as metodologias disponíveis, a previsão numérica de tempo é uma das mais tradicionais para previsão de curto prazo. O modelo Weather Research and Forecasting – WRF foi usado neste estudo em duas versões: a versão 3.9.1.1, usada operacionalmente no CPTEC/INPE; e a versão WRF-Solar, desenvolvida para atender algumas dificuldades inerentes ao setor de energia, principalmente o efeito das nuvens e dos aerossóis atmosféricos na irradiação solar. Este trabalho avalia a previsão das irradiâncias global horizontal (GHI) e direta normal (DNI) em até 72 horas durante os meses de agosto/2015 e janeiro/2016 para Cachoeira Paulista – SP, usando três experimentos físicos nas duas versões do WRF para um domínio com resolução horizontal de 3 km. As condições iniciais e de fronteira foram provenientes das previsões operacionais do CPTEC, com resolução horizontal de 9 km e temporal de 3 horas. A configuração com parametrização física de nuvens de subgrade (Experimento2) na versão WRF-Solar obteve o melhor desempenho geral em comparação com a versão operacional do CPTEC. O ganho no erro médio foi ainda mais expressivo no mês chuvoso de janeiro/2016, atingindo quase 40% para GHI e pouco mais de 60% para DNI. O ciclo diurno médio de GHI, a previsão da cobertura de nuvens e o histograma do erro médio com o WRF-Solar usando física de nuvens de subgrade (Experimento SOLAR_E2) se mostraram bastante promissores para a indústria brasileira da energia solar fotovoltaica. Contudo, estudos complementares são necessários para detalhar os impactos diretos e indiretos dos aerossóis nas previsões, assim como, avaliar o experimento SOLAR_E2 para outras regiões do Brasil.

Palavras-chave: Previsão numérica de tempo, Aerossóis, Energia Solar

1. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira se destaca internacionalmente há décadas pelo uso predominante oriundo de fontes renováveis, principalmente a hídrica e a biomassa (ANEEL, 2002). Contudo, este cenário tem se diversificado a partir do século XXI, com o advento de outros meios de geração de eletricidade, como as fontes eólica e solar. A indústria da energia eólica foi impulsionada a partir de políticas públicas do governo federal, como a lei nº10.438/2002 que instituiu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia, o PROINFA. A partir de então, houve um crescimento acentuado na exploração dos ventos em várias regiões brasileiras, principalmente no nordeste e sul do país. Durante este período, o desenvolvimento da energia solar no Brasil ainda estava em fase inicial, com estudos de mapeamento do seu potencial e aplicações concentradas em plantas piloto em universidades e centros de pesquisa de órgãos públicos e privados. Porém, a utilização do potencial solar tem crescido acentuadamente nos últimos 5 anos em função de alguns fatores, como: avanço tecnológico tornando os painéis solares mais eficientes; redução do custo de produção; avanços no conhecimento científico; investimento internacional, dentre outros. O Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017) apresenta as potencialidades para a exploração solar fotovoltaica, indicando sua variabilidade regional e temporal. A região nordeste possui a menor variabilidade espaço-temporal e maior potencial energético, seguido pelo centro-oeste e sudeste.

De acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar – ABENS, o Brasil deve ultrapassar o limite de 3 GW de geração fotovoltaica em 2019 e R\$ 5,2 bilhões em investimentos, com crescimento estimado de 88% em relação a 2018

e geração de milhares de empregos. A entrada da energia solar na matriz elétrica tem sido predominantemente por usinas fotovoltaicas centralizadas e por meios de geração distribuída. Um levantamento da ABENS indica que há pouco mais de 20 GW em projetos não-contratados de usinas solares fotovoltaicas aguardando os próximos leilões de energia do Governo Federal (ABENS, 2019). Logo, há uma tendência de expansão acelerada que permitirá ao país condições de se tornar uma das lideranças mundiais em energia solar ao longo dos próximos anos. Portanto, é de suma importância que haja planejamento adequado para atender aos investimentos futuros e também a crescente demanda do consumo elétrico nacional. Como a geração solar fotovoltaica possui dependência direta da incidência da radiação solar sobre a superfície terrestre, a sua previsibilidade é fundamental para uma distribuição da carga elétrica produzida ser introduzida na rede de forma segura.

Um sistema integrado de previsão de irradiação solar está em desenvolvimento no Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN), do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Dentre as metodologias empregadas, o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) está sendo avaliado para previsões de até 72 horas das componentes global horizontal e direta normal da irradiação solar. O WRF é o estado da arte em modelagem numérica da atmosfera desenvolvido por universidades e instituições de pesquisa dos Estados Unidos, com código aberto e estável, sendo flexível desde supercomputadores até máquinas domésticas e usado para fins operacionais e de pesquisa em diversos países (Powers *et al.*, 2017). No Brasil, diversas agências estaduais, universidades e empresas que atuam com meteorologia operacional utilizam o modelo para diferentes aplicações. Por exemplo, o Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE) desde agosto de 2018 usa o modelo WRF operacionalmente na previsão de tempo para todo o país.

Existem metodologias para a previsão da radiação solar em diferentes escalas de tempo que são baseadas em várias técnicas, tais como descritos por Kariniotakis (2017): modelos estatísticos; inteligência artificial; sensoriamento remoto; previsão numérica de tempo, dentre outras. É importante destacar que cada conceito possui sua escala de previsibilidade mais adequada, desde sistemas de previsão de curtíssimo prazo (i.e. *nowcasting*) a previsões de curto prazo de até 72 horas. Individualmente, os métodos se apresentam promissores e com aplicabilidade confiável em projetos de pequena escala (Diagne *et al.*, 2013). Contudo, o atual desafio é o acoplamento destes modelos para previsão de energia solar para empreendimentos de média a larga escala. Haupt *et al.* (2018) discutem esta problemática e apresentam um sistema de previsão de energia solar em desenvolvimento para os Estados Unidos, nomeado de SUN4CAST®. Em síntese, o sistema inicia a partir do diagnóstico das condições de tempo com imagens de satélite, medições solarimétricas e dos aerossóis atmosféricos, câmeras imageadoras de nuvens, seguido por diferentes tipos de modelagem (i.e. estatística, previsão numérica de tempo, etc), integração das previsões desde modelos para diferentes escalas de tempo até o pós-processamento final, com informações específicas para o setor elétrico e tomadores de decisão, como: custos operacionais, análise de reserva, monitoramento em tempo real, balanceamento de carga, dentre outras. A ferramenta de previsão numérica de tempo usada neste sistema é o WRF-Solar, uma versão do WRF com uma série de aprimoramentos físicos desenvolvidos para atender às necessidades e aplicações da indústria da energia solar (Jimenez *et al.*, 2016).

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a previsão de curto e curtíssimo prazo de componentes da irradiação solar usando duas versões do modelo WRF, a versão 3.9.1.1 usada no CPTEC/INPE e a WRF-Solar. A verificação de três configurações físicas usadas em ambos os modelos será realizada com medições solarimétricas coletadas nos meses de agosto/2015 e de janeiro/2016 para região de Cachoeira Paulista – SP.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Os dados de irradiação global horizontal (GHI) e irradiação direta normal (DNI) analisados neste estudo foram mensurados na estação solarimétrica instalada no município de Cachoeira Paulista – SP, pertencente à Rede SONDA <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>, do LABREN/CCST/INPE. As informações radiométricas e meteorológicas são disponibilizadas com frequência média de 1 minuto. As medições registradas em agosto/2015 e janeiro/2016 foram selecionados por suas diferentes características sazonais de nebulosidade/precipitação e distribuição dos aerossóis atmosféricos. O padrão climático da precipitação da região estudada possui forma altamente irregular no tempo e no espaço. De acordo com os dados climatológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a estação chuvosa em Cachoeira Paulista concentra-se nos meses de dezembro a fevereiro ($> 200 \text{ mm mês}^{-1}$), enquanto o período seco de junho a agosto ($< 40 \text{ mm mês}^{-1}$). A influência de circulações anticiclônicas favorece na variação das condições climáticas entre as faixas tropicais e subtropicais, definindo os padrões atmosféricos da região. A passagem de sistemas frontais é a condição meteorológica mais comum durante o período invernal, resultando em redução acentuada da temperatura do ar e na ocorrência de precipitação sobre a região. Após o deslocamento destas frentes há uma predominância de ar seco e estável, inibindo a formação de nuvens. Durante o verão, a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) predomina com sua faixa de nebulosidade desde o sul da Amazônia até o

Atlântico Sul-Central, favorecendo em condições locais de instabilidade convectiva. Estas características climáticas e interanuais, somadas com a exposição latitudinal da região sudeste à radiação solar, também interferem nos padrões sazonais de insolação sobre a superfície terrestre (Cavalcanti *et al.*, 2009). Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira *et al.*, 2017), o sudeste possui a maior variabilidade interanual do potencial solar no país, porém, a irradiação global média estimada é elevada, perdendo apenas a região Nordeste e equivalente a observada na região Centro-Oeste.

Durante o período estudado, as condições de tempo presentes sobre a área em agosto/2015 foram definidas pela presença de uma massa de ar seco que predominou durante o mês, segundo os boletins de tempo do CPTEC/INPE, disponíveis para consulta em <<http://tempo.cptec.inpe.br/>>. Houve registros pluviométricos de baixa intensidade apenas nos dias 19 a 25, onde neste último dia o total acumulado foi próximo a 20 mm favorecido por uma frente estacionária, enquanto nos demais não ultrapassou 5 mm. Por outro lado, a precipitação acumulada em 17 dias de janeiro/2016 foi superior a 5 mm, principalmente entre 9 a 16 e 25 a 29, favorecidos também pelo posicionamento prolongado de uma frente estacionária e pela intensidade da circulação anticiclônica sobre o Atlântico Sul. Logo, o desenvolvimento das condições sinóticas nos dois meses selecionados resultou em distribuições de nebulosidade e dos aerossóis totalmente distintas sobre a região, cujo impacto nas componentes da irradiação solar será avaliado na discussão dos resultados deste trabalho.

2.2 Modelo WRF

O modelo WRF possui suas variáveis discretizadas horizontalmente na grade C de Arakawa, e sua estrutura vertical é resolvida através de coordenada η . A distribuição vertical das camadas segue naturalmente a inclinação da superfície terrestre, sendo eficiente no cálculo da advecção de temperatura e de vento, principalmente sobre terrenos planos ou suavizados. Entretanto, pode apresentar limitações em regiões com variações acentuadas de topografia, como em áreas costeiras ou montanhosas. Este trabalho fez uso de duas versões do modelo, o WRF-Solar e o WRF 3.9.1.1, denominado aqui de WRF-CPTEC. Segundo Jimenez *et al.* (2016), em síntese, as principais melhorias e novidades desenvolvidas no WRF-Solar são: a) disponibilidade das componentes de irradiação 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 de aerossol (Ginoux *et al.*, 2001; Thompson e Eidhammer, 2014; Thompson *et al.*, 2015); 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 FARMS – *Fast All-sky Radiation Model for Solar Applications* (Xie *et al.*, 2016), que calcula a irradiação solar em superfície para cada passo de tempo do modelo, diferentemente do método padrão que faz interpolação entre os intervalos de saída das previsões.

Configuração dos experimentos. O domínio foi definido com resolução horizontal de 3 km, 31 níveis verticais, 308 e 188 pontos de grades longitudinais e latitudinais, respectivamente, cobrindo uma área parcial da região sudeste (Fig. 1). As informações extraídas do modelo foram para o ponto mais próximo da estação SONDA de Cachoeira Paulista (22°41'22,65" S; 45°00'22,28" O; altitude de 574 m). As integrações numéricas foram iniciadas em 00 UTC de todos os dias de agosto/2015 e janeiro/2016, com duração de 72 horas. As condições iniciais e de fronteira usadas foram produzidas com o modelo WRF operacional do CPTEC, com resolução temporal de 3 horas e espacial de 9 km. A inicialização do WRF operacional no CPTEC foi configurada com condições iniciais e de contorno das análises, e não das previsões, do modelo global GFS do NCEP, na resolução espacial de 0,5° e temporal de 3 horas. A estratégia *Análise GFS → Previsões WRF 9 km → Previsões WRF 3 km* foi usada buscando reduzir a propagação dos erros em virtude do tamanho e da resolução espacial do domínio avaliado neste trabalho. O impacto dos aerossóis nos campos analisados foi verificado usando também como condições de contorno auxiliares para as informações da profundidade óptica dos aerossóis (AOD) de 550 μm a partir das reanálises do *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications version 2* – MERRA2 (Buchard *et al.*, 2017). Estes dados de AOD possuem resolução espacial de 0,5° (latitude) x 0,625° (longitude) e frequência temporal de 3 horas. O valor médio mensal do AOD para o ponto estudado foi próximo de 0,125 em janeiro/2016 e 0,1 em agosto/2015, sendo coerente com as medições próximas obtidas no *Aerosol Robotic Network* - AERONET/NASA <<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>>.

O conjunto de parametrizações físicas definidas operacionalmente no CPTEC foram usadas como controle no experimento 1, nomeado de E1. A segunda combinação de parametrizações (E2) adiciona a física de nuvens de subgrade, onde opções distintas foram usadas para cada versão do modelo, como mostra a Tab. 1. A parametrização de cumulus foi desligada em todos os experimentos. O esquema de Deng *et al.* (2014) leva em consideração a contribuição da energia cinética turbulenta (TKE, em inglês) como parâmetro de estabilidade atmosférica nos cálculos de entranhamento no topo das nuvens e por isso a parametrização de camada limite também teve que ser alterada para uma que resolva o TKE, onde o esquema escolhido foi MYNN2. Como o esquema de Deng *et al.* (2014) não está disponível no WRF-CPTEC, adotou-se a opção de GRIMS (Hong e Jang, 2018) por sua compatibilidade com todas as configurações de controle E1. Por fim, o experimento E3 inclui o efeito indireto dos aerossóis na microfísica de nuvens. O uso desta opção no WRF depende das informações médias climatológicas da distribuição tridimensional de

propriedades higroscópicas de nucleação dos aerossóis por água e por gelo (Thompson e Eidhammer, 2014). A base destas informações é derivada para múltiplas espécies de aerossóis a partir de dados simulados pelo modelo *Goddard Chemistry Aerosol Radiation and Transport* – GOCART para o período mensal entre 2001 a 2007, com resolução espacial de 0.5° de longitude por 1.25° de latitude (Ginoux *et al.*, 2001).

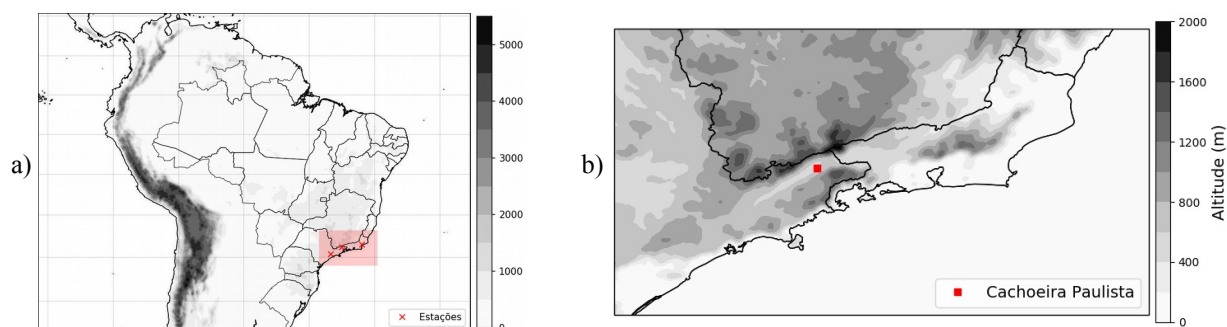


Figura 1: (a) Domínio das condições iniciais e de contorno do WRF 9km, destacando a área do domínio de 3 km, ampliada em (b)

Tabela 1: Parametrizações físicas usadas nos três experimentos nas versões WRF-CPTEC (1) e WRF-Solar (2).

Parametrização	E1	E2	E3
Microfísica	<i>Ferrier</i>	<i>Ferrier</i>	<i>Thompson Aerosol-Aware</i>
Radiação atmosférica	<i>RRTMG</i>	<i>RRTMG</i>	<i>RRTMG</i>
Superfície terrestre	<i>NOAH</i>	<i>NOAH</i>	<i>NOAH</i>
Camada superficial	<i>Jimenez</i>	<i>Jimenez (1)</i> <i>MYNN2 (2)</i>	<i>Jimenez</i>
Camada limite	<i>YSU</i>	<i>YSU (1)</i> <i>MYNN2 (2)</i>	<i>YSU</i>
Nuvens de subgrade	-	<i>GRIMS (1)</i> <i>DENG (2)</i>	-

2.3 Métricas de verificação

A verificação das variáveis GHI e DNI prevista nos experimentos com frequência de 30 minutos foi realizada através de métricas comumente adotadas em estudos similares na literatura, como o erro médio (EM) e a raiz do erro médio quadrático (RMSE). Não foram usadas técnicas para remoção de erros sistemáticos pois o objetivo é justamente identificar as particularidades entre as diferentes versões do modelo WRF. A análise da distribuição das probabilidades das previsões foi realizada através de gráfico quantil – quantil, pois este tipo de gráfico permite identificar o comportamento dispersivo dos dados indo do menor ao maior da variável analisada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados para agosto/2015 serão descritos mas não serão apresentados pois os experimentos tiveram resultados equivalentes, com pequena vantagem ao WRF-Solar E2. Como os períodos de inverno na região são caracterizados tipicamente por condições céu claro, todos os experimentos obtiveram desempenho similar. Vale destacar que apenas a configuração SOLAR_E2 atingiu as menores diferenças em relação às observações, com erro médio de GHI de 60 W m^{-2} e 47 W m^{-2} para 24 e 72 horas de previsão, respectivamente. Este resultado foi inesperado e precisa ser melhor investigado futuramente, uma vez que o erro médio das previsões tende a aumentar ao longo do tempo. Uma hipótese é que as nuvens de subgrade do WRF-Solar necessite de mais tempo de spin up, ou seja, para harmonizar instabilidades ondulatórias das condições iniciais para o estado atmosférico resolvido apenas pelo modelo. Nas demais configurações, o erro médio para 24 e 72 horas variou próximo a 68 e 80 W m^{-2} , respectivamente. O RMSE de GHI com o experimento SOLAR_E2 foi de 151 a 139 W m^{-2} para 24 a 72 horas de previsão, enquanto nos demais experimentos estes valores foram de 148 a 169 W m^{-2} nos mesmos tempos de prognóstico. Os resultados indicam uma qualidade

promissora, uma vez que estudos anteriores obtiveram valores superiores mesmo com a aplicação de técnicas de pós-processamento usando este modelo, como Verbois *et al.* (2018) para Cingapura.

A avaliação do ciclo diurno médio dos valores observados e previstos de GHI e DNI para agosto de 2015 reproduz uma das características típicas do período invernos da região, que é a condição de céu claro predominante (figura não mostrada). Na média, todos os experimentos foram eficazes na representação da ausência de nuvens, com pequena vantagem para a configuração SOLAR_E2, principalmente após o meio dia local. O SOLAR_E2 foi o único experimento que reduziu o erro médio com o tempo, de 200 W m^{-2} para abaixo de 100 W m^{-2} . Não há diferença significativa com o aumento do horizonte de previsão na maioria dos experimentos, cujo padrão imprevisível pode ser uma resposta ao método de uso das condições iniciais e de contorno usadas neste estudo preliminar. A configuração E1 mostrou dificuldades na determinação das irradiâncias durante agosto/2015. Este conjunto de parametrizações usadas no CPTEC/INPE foi escolhido por obter os melhores índices métricas para campos meteorológicos de maior interesse da população em geral, como precipitação e temperatura do ar. Logo, é possível que estas deficiências nas componentes da irradiância solar não sejam conhecidas pelo Centro. Este item destaca os experimentos para janeiro/2016, por ser um período com maior variabilidade e complexidade das condições meteorológicas.

A Fig. 2 apresenta o ciclo diurno médio das irradiâncias para janeiro de 2016, a cada 30 minutos. A diferença entre os experimentos é mais evidente, uma vez que a nebulosidade é mais comum neste período, e este é o principal modulador da intensidade da irradiância solar. O experimento que faz uso da microfísica de *Thompson Aerosol-Aware* (E3) atingiu a maior diferença com as observações de GHI, enquanto novamente o experimento SOLAR_E2 reproduziu com qualidade a série média registrada em Cachoeira Paulista. Em relação ao DNI, os experimentos E2 tiveram maior eficiência na determinação do ciclo diurno médio, principalmente com o WRF-Solar, onde o erro médio foi inferior a 100 W m^{-2} , atingindo valores menores que 50 W m^{-2} após o meio dia local. Este resultado permite afirmar que a inclusão dos efeitos das nuvens de subgrade nas duas versões do WRF favoreceram uma reprodução mais próxima das condições reais de nebulosidade sobre a região. Vale ressaltar que nenhum experimento fez uso da opção física de cumulus, que busca resolver apenas nuvens profundas, uma vez que a resolução horizontal de 3 km é suficiente para resolver-las explicitamente. Porém, a característica híbrida da configuração de Deng *et al.* (2014) do WRF-Solar permite resolver, além das nuvens profundas, as nuvens rasas e os efeitos de ambas na irradiância solar.

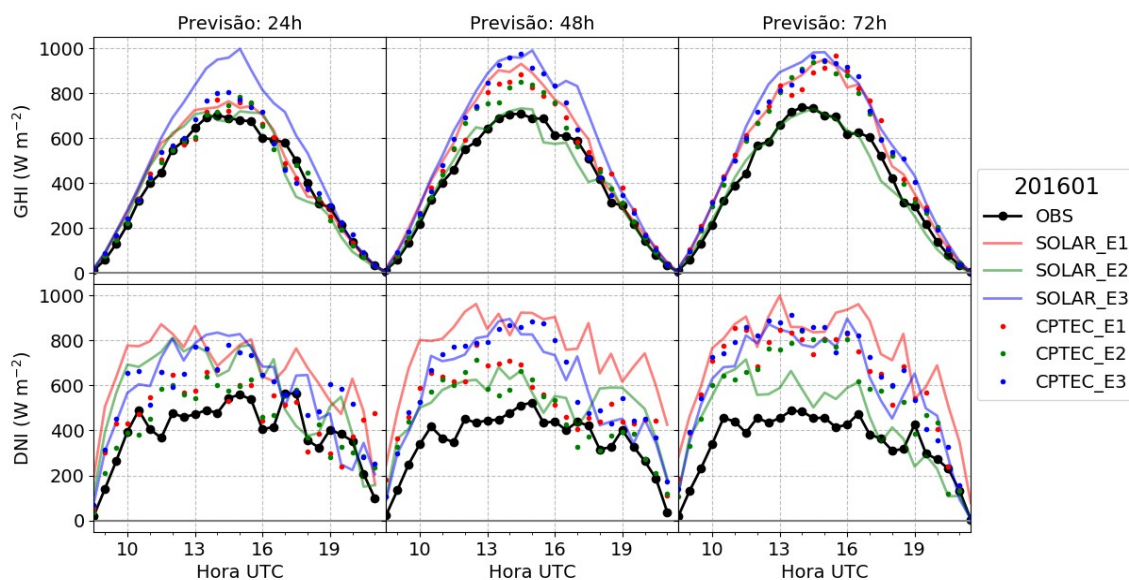


Figura 2: Ciclo diurno médio das observações e previsões de GHI e DNI para janeiro/2016.

A Fig. 3 resume o desempenho estatístico do erro médio e do RMSE para GHI e DNI obtidos nas previsões para janeiro/2016. O prognóstico de 24 horas para GHI apresentou um erro médio bastante satisfatório se comparado com estudos que fizeram uso do mesmo modelo (Verbois *et al.*, 2018; Jimenez *et al.*, 2016). O principal destaque é direcionado ao experimento SOLAR_E2, cuja avaliação estatística indica um ganho superior a 30% em relação às demais configurações. Com a exceção desta configuração, o erro médio se eleva nos demais experimentos com o aumento de tempo de previsão, sendo uma resposta esperada em função da natureza caótica da atmosfera e das limitações inerentes na representação numérica do estado atmosférico por meio das equações governantes e suas parametrizações físicas.

O prognóstico de DNI possui uma escala de erro maior por sua sensibilidade direta a presença de nuvens. Logo, os experimentos que fazem considerações especiais ao tratamento numérico das nuvens, nuvens de subgrade para E2 e microfísica de nuvens para E3, deveriam apresentar uma resposta melhor em relação ao E1, como confirmam os valores

mostrados nas Figuras 3b (erro médio) e 3d (RMSE). Recentemente, Gueymard e Jimenez (2019) indicaram a alta sensibilidade na previsão de DNI no WRF-Solar também com a intensidade dos aerossóis presentes na atmosfera. O erro médio do SOLAR_E2 se torna menor a partir de 48 horas de previsão em relação ao controle, com ganho aumentado de 10% a 63% em 72 horas. A principal hipótese para a obtenção deste desempenho está relacionada com a estratégia adotada no uso das condições iniciais e de contorno das análises do GFS nas previsões do WRF 9 km. Estudos futuros precisam verificar se a aplicação direta das previsões do GFS no domínio das previsões do WRF 3 km reproduz um resultado próximo ao demonstrado nestas figuras. Os valores de RMSE mostram que a previsão de DNI para o WRF-Solar E2 obteve um ganho de 10% em comparação ao controle CPTEC_E1, enquanto o WRF-CPTEC E3 é um pouco melhor, com um ganho de 15% em comparação ao mesmo controle.

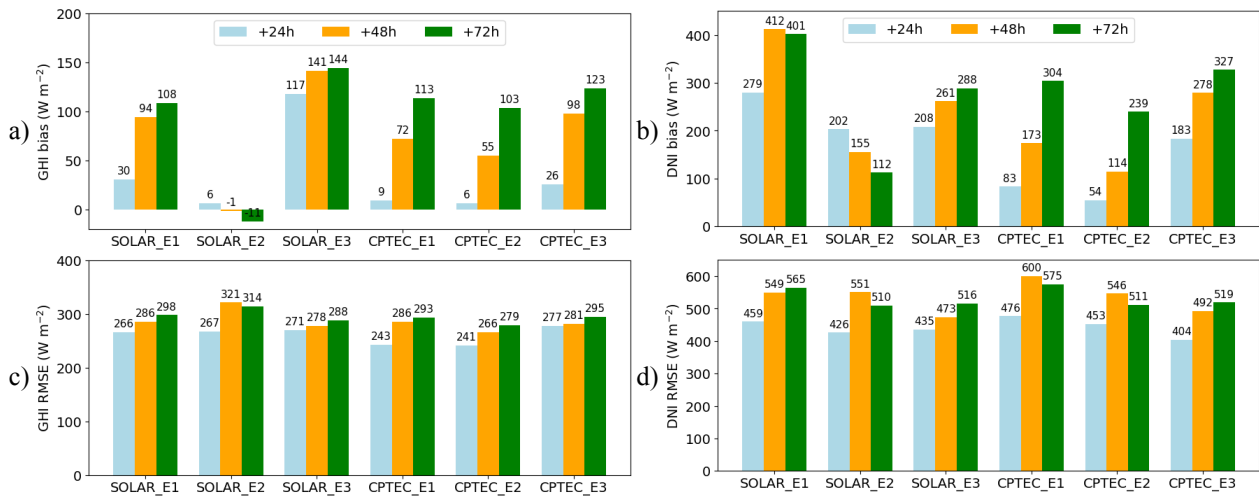


Figura 3: Valores do erro médio (superior) e do RMSE (inferior) das componentes GHI (esquerda) e DNI (direita) nos experimentos para cada versão avaliada do modelo WRF para cada alcance de previsão em janeiro/2016.

O histograma do erro médio apresentado na Fig. 4 compara o desempenho das previsões subhorárias de GHI e de DNI do SOLAR_E2 em relação ao controle CPTEC_E1 para janeiro/2016. As previsões de 24 horas possuem comportamento semelhante entre as versões do WRF, em ambas as variáveis analisadas, principalmente no intervalo realçado de -50 a $50 W m^{-2}$. Nos demais horizontes de previsão foi identificado um padrão de superestimativas e de subestimativas de GHI para o controle e para o SOLAR_E2, respectivamente. A distribuição para DNI tende a superestimativas em ambos os experimentos nos três períodos de previsão, embora a concentração do SOLAR_E2 próximo o limiar de -50 a $50 W m^{-2}$ tenha sido maior. A defasagem da concentração das distribuições denota que ao longo do tempo o experimento controle tende a ser mais dispersivo, principalmente para o DNI.

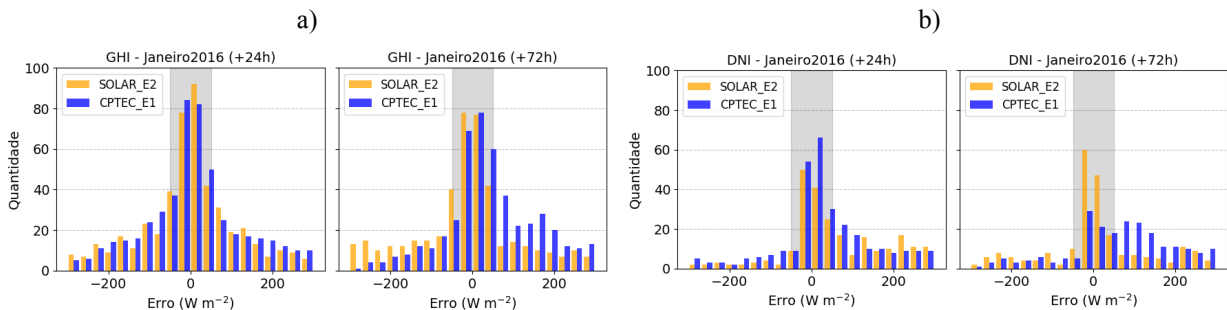


Figura 4: Histograma do erro das previsões de GHI (a) e do DNI (b) para os experimentos WRF-Solar E2 e WRF-CPTEC E1 em janeiro/2016. A área em cinza destaca o intervalo de -50 a $50 W m^{-2}$.

O gráfico quantil-quantil, mostrado na Fig. 5, representa a estimativa baseada nas distribuições de probabilidade para as amostras de GHI observadas e previstas nos experimentos para janeiro/2016. O resultado evidencia a capacidade da configuração SOLAR_E2 manter seu desempenho em torno do intervalo realçado ao longo das previsões, principalmente para valores superiores a $400 W m^{-2}$. Não obstante, o desempenho do WRF-CPTEC prognósticos de 24 horas indicou que a probabilidade das previsões se ajustarem à distribuição observada tende a ser mais igualitária que o WRF-Solar em todo o intervalo de valores de GHI. Uma característica importante também encontrada foi o padrão superdispersivo das previsões, principalmente com a configuração E3, que considera o efeito indireto dos aerossóis na

microfísica de nuvens. Existem duas potenciais hipóteses para justificar este comportamento: a) As principais limitações das configurações E1 e E3 ocorrem nos intervalos de condição de céu encoberto, de céu parcialmente encoberto e de menor intensidade das irradiâncias (amanhecer e entardecer); b) A natureza física das nuvens da região estudada não está adequadamente parametrizada com robustez no modelo WRF, principalmente nuvens de subgrade e de camada limite. Para responder preliminarmente estas hipóteses se faz necessário verificar os padrões observados e simulados de cobertura de nuvens sobre o domínio estudado.

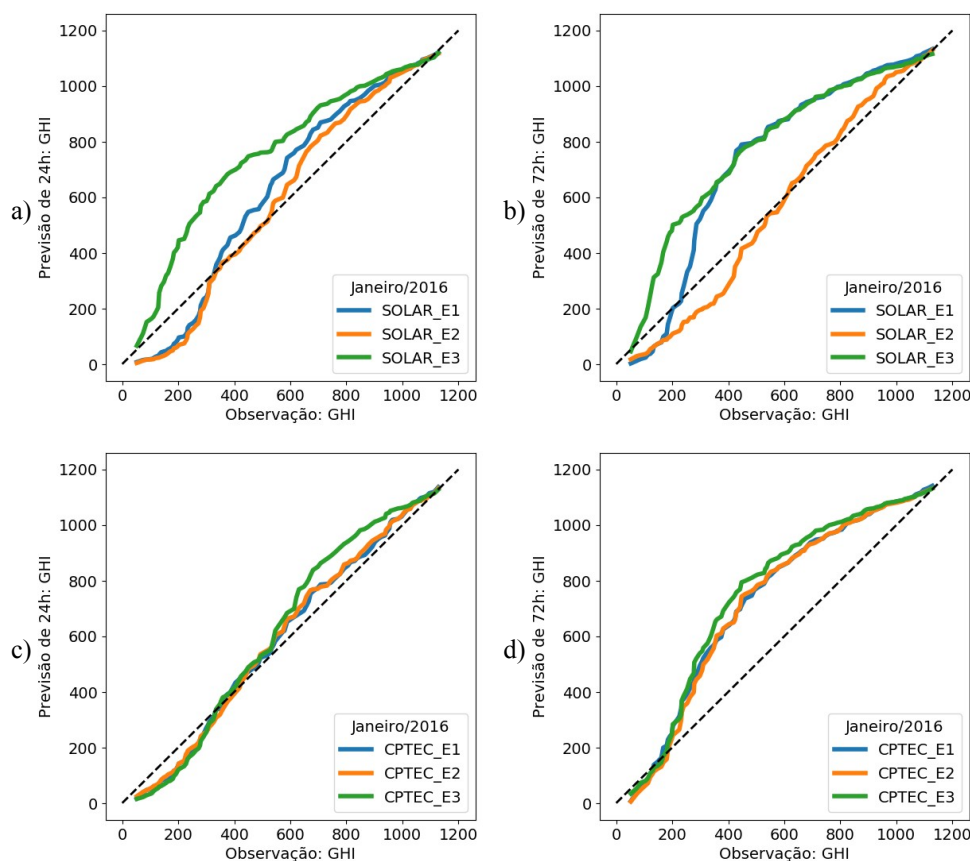


Figura 5: Gráfico quantil - quantil da componente GHI para as versões WRF-Solar (superior) e WRF-CPTEC (inferior) considerando horizontes de previsão de 24 (esquerda) e 72 h (direita) de janeiro de 2016.

A confirmação parcial desta hipótese pode ser observada no exemplo apresentado na Fig. 6, referente a 18 UTC de 7/janeiro/2016. As imagens de satélite indicam um padrão de nebulosidade tipicamente de nuvens rasas e com nuvens quentes, comuns para esta época do ano na região. Um dos principais mecanismos de formação destas nuvens é o ciclo diurno da camada limite convectiva, cujos vórtices turbulentos transportam calor, umidade e *momentum* desde a superfície até a base destas nuvens. Em virtude da escala espacial e temporal destes processos físicos não ser resolvida explicitamente por um modelo de mesoescala, esta solução depende principalmente das parametrizações físicas de camada limite escolhidas (Huang *et al.* 2013). Portanto, é possível observar uma diferença substancial na determinação da fração de cobertura de nuvens em 2 km de altura entre as previsões com o SOLAR_E2 e CPTEC_E1. A versão do WRF-CPTEC evidencia um comportamento bastante local e bem delimitado na determinação destas nuvens, ora 0 a 20 % ora 80 a 100%. Por outro lado, a configuração de nuvens de subgrade de Deng *et al.* (2014) usada no WRF-Solar se apresenta mais realística, principalmente para 72 horas de previsão onde acerta com maior qualidade a região e intensidade das nuvens mais profundas no noroeste do domínio, sobre Minas Gerais. A distribuição das nuvens sobre o oceano também se mostrou mais eficaz com a versão solar do WRF, diferentemente do modelo usado operacionalmente no CPTEC/INPE. Contudo, é importante destacar que as imagens de satélite indicaram nebulosidade sobre o oceano próximo dos litorais norte de São Paulo e sul do Rio de Janeiro e nenhum dos experimentos conseguiu reproduzir. Além disto, os resultados obtidos com o experimento CPTEC_E2 foram similares ao mostrado na figura. Tal condição reforça a hipótese de que a representação deste tipo de nuvem não depende apenas da parametrização de subgrade, mas também de camada limite. Além disso, a distribuição vertical das camadas do modelo também exerce um impacto na reprodução deste tipo de nuvens rasas. Como o CPTEC faz uso de 31 níveis verticais na sua configuração operacional, investigações futuras também poderão avaliar se uma maior quantidade de camadas verticais, assim como, um maior refinamento de níveis na baixa troposfera, impactaria positivamente nestes resultados.

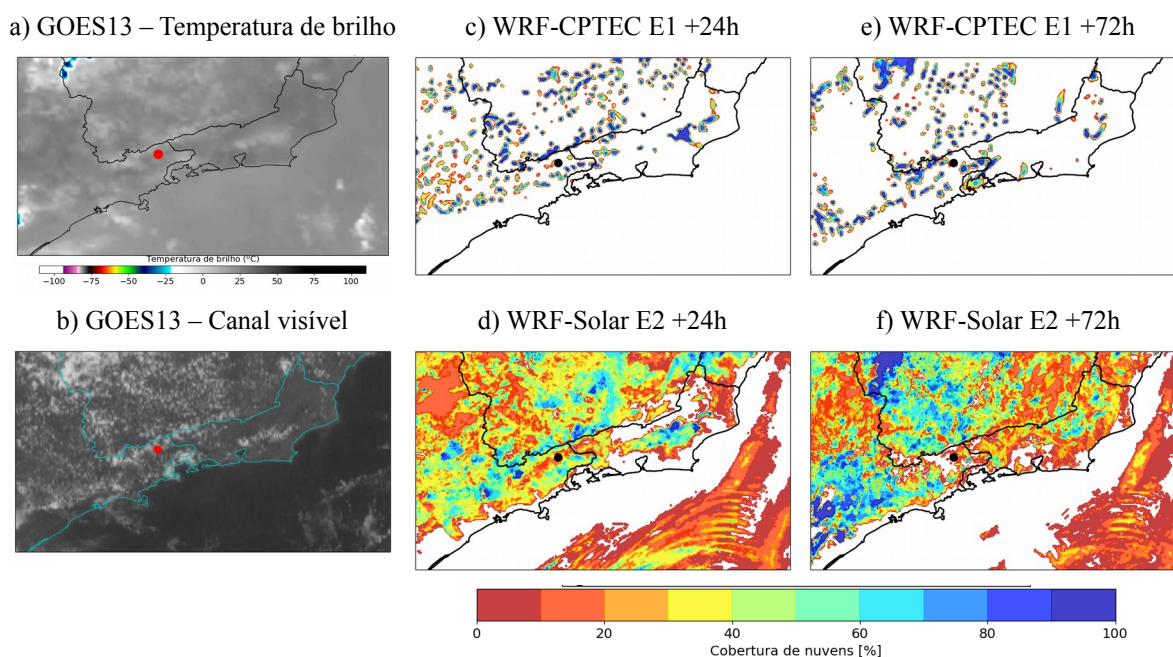


Figura 6: Imagens do satélite GOES-13 para temperatura de brilho (a) e canal visível (b) em 18UTC 07/Janeiro/2016 e a fração de cobertura de nuvens em 2 km de altitude prevista em 24h e 72h nos modelos WRF-CPTEC e WRF-Solar.

Os resultados discutidos nesta seção estão de acordo com estudos anteriores, sendo este o primeiro que avalia o desempenho do WRF-Solar para um local brasileiro. As simulações com o WRF-Solar realizadas por Jimenez *et al.* (2016) para um período de 12 meses de 2014 considerando dez estações solarimétricas nos Estados Unidos indicou uma leve melhora nos meses invernosos, igualmente os valores obtidos em agosto/2015 neste trabalho. Todavia, o ganho global para 2014 obtido pelos autores foi de 45% GHI e aproximadamente 60% para DNI. Vale ressaltar que Jimenez e colaboradores também mostraram a tendência de superestimativa de GHI pela versão solar do WRF, associando este problema a uma dificuldade na representação de nuvens subgrade que ainda precisa ser ajustada. Em relação ao tipo de nebulosidade durante o ciclo diurno, Lee *et al.* (2016) avaliou quatro estudos de caso para região oeste dos Estados Unidos e também indicou a dificuldade do WRF-Solar durante os horários da manhã. Casado-Rubio *et al.* (2017) usaram o modelo global do centro meteorológico europeu, ECMWF, para verificar a sensibilidade da previsão de DNI em locais da Espanha, com índices de RMSE equivalentes aos apresentados no início desta seção. Os autores observaram que a relação entre o tamanho horizontal da grade e a dispersão do erro da previsão possui um limiar ótimo entre 150 e 200 km. Ao considerar mais pontos de grade do modelo em torno do ponto observado, foi possível ponderar as características que eventualmente tenham sido simuladas de forma deslocada, como as nuvens. Por ter sido um estudo preliminar, as previsões obtidas com o SOLAR_E2 para Cachoeira Paulista podem ter seus erros sistemáticos corrigidos com técnicas de pós-processamento, como demonstrado por Verbois *et al.* (2018).

4. CONCLUSÕES

A análise preliminar das previsões de curto prazo de componentes da irradiância solar obtidas por duas versões do modelo WRF foi discutida neste trabalho para Cachoeira Paulista – SP durante dois meses climatologicamente distintos, agosto/2015 e janeiro/2016. As previsões de até 72 horas para um domínio de 3 km sobre parte da região sudeste indicaram as potencialidades do WRF-Solar em comparação com a versão do WRF usada operacionalmente no CPTEC/INPE para prognósticos de GHI e DNI.

Os experimentos realizados com as duas versões do WRF avaliaram a configuração física operacional usada no CPTEC/INPE (Experimento 1, E1), o uso da parametrização de nuvens de subgrade (E2) e o efeito indireto dos aerossóis na microfísica de nuvens (E3). Para previsões de até 24 horas, as duas versões avaliadas do modelo WRF tiveram desempenho similar, com erro inferior para o WRF-CPTEC_E1. Porém, a configuração SOLAR_E2 se aprimora com o tempo de previsão e atinge uma frequência do erro médio mais concentrada entre -25 a 25 $W m^{-2}$ para prognósticos de GHI entre 48 até 72 horas. A estratégia usada nas condições iniciais e de contorno pode ter influenciado no efeito de suavização da instabilidade inicial destas previsões, conhecido como *spin up time*. Considerando os três alcances de prognósticos para os dois meses analisados, o ganho percentual do SOLAR_E2 em relação ao CPTEC_E1

variou entre 20% a 38% para GHI e de 10 a 63% para DNI, respectivamente. A qualidade da versão solar foi ainda mais evidente nos períodos afetados por nebulosidade em janeiro/2016, principalmente para o DNI. A análise espacial da cobertura de nuvens entre estes dois experimentos comprovou a qualidade do experimento SOLAR_E2 em determinar com similaridade os padrões observados nas imagens de satélite em várias regiões do domínio, e as definições físicas de nuvens de subgrade e de camada limite usadas neste experimento podem justificar sua qualidade na determinação numérica da nebulosidade tipicamente estratiforme e de topo quente.

Por ter sido uma avaliação preliminar do WRF-Solar, se faz necessário a realização de estudos futuros para outras regiões do Brasil, além de investigar a sensibilidade deste modelo para situações como: locais com alta intensidade de irradiância solar; diferentes intensidades de AOD; nuvens de camada limite; outras parametrizações físicas; avaliação de desempenho das previsões; resolução vertical do modelo nos níveis da baixa troposfera; dentre outros experimentos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao suporte institucional e financeiro da Petrobras, através do Projeto de P&D ANEEL PD-00553-0042/2016, vinculado à Chamada Estratégica n.º 19/2015 – Desenvolvimento e Tecnologia Nacional de Geração Heliotérmica de Energia Elétrica. Agradecem também ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-MC), através dos processos CNPq 573797/2008-0 e FAPESP 2008/57719-9. Por fim, ao apoio da FAPESP, através do processo 2019/05361-8.

REFERÊNCIAS

- ABENS, 2019. Energia solar fotovoltaica ultrapassará a marca de 3.000 megawatts no Brasil em 2019. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica – ABENS. Disponível em <<http://absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-solar-fotovoltaica-ultrapassara-a-marca-de-3000-megawatts-no-brasil-em-2019.html>>. Acesso em 11 out. 2019.
- ANEEL, 2002. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica - Brasília. 1ª Edição. 153 p.
- Buchard, V.; Randles, C. A.; Da Silva, A. M.; *et al.* 2017. The MERRA-2 Aerosol Reanalysis, 1980 Onward. Part II: Evaluation and Case Studies. *Journal of Climate*, v. 30, n. 17, p. 6851–6872.
- Casado-Rubio, J. L.; Revuelta, M. A.; Postigo, M.; Martínez-Marco, I.; Yagüe, C. 2017. A Postprocessing Methodology for Direct Normal Irradiance Forecasting Using Cloud Information and Aerosol Load Forecasts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 56, n. 6, p. 1595–1608.
- Cavalcanti, I. F. A., Ferreira, N. J., Silva, M. G. A. J., Dias, M. A. F., 2009. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, p. 197-212.
- Deng, A.; Gaudet, B.; Dudhia, J.; Alapaty, K. 2014. Implementation and Evaluation of a New Shallow Convection Scheme in WRF. *Anais do 94th American Meteorological Society Meeting, 22nd Conference on Numerical Weather Prediction*, Atlanta, GA.
- Diagne, M.; David, M.; Lauret, P.; Boland, J.; Schmutz, N., 2013. Review of solar irradiance forecasting methods and a proposition for small-scale insular grids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 27, p. 65-76.
- 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.; Jimenez, P. 2019. Validation of Real-Time Solar Irradiance Simulations Over Kuwait Using WRF-Solar. *Solar World Congress – SWC, International Solar Energy Society (ISES)*. *Anais...* p.1–11. Santiago, Chile..
- Haupt, S. E.; Kosović, B.; Jensen, T.; *et al.*, 2018. Building the Sun4Cast System: Improvements in Solar Power Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 99, n. 1, p. 121–136.
- Hong, S. Y.; J. H. Jang, 2018: Impacts of shallow convection processes on a simulated Boreal summer climatology in a global atmospheric model. *J. Asia-Pacific J Atmos Sci*. v. 54 (Suppl 1): 361. doi:10.1007/s13143-018-0013-3
- Huang, H. Y.; Hall, A.; Teixeira, J. A. 2013. Evaluation of the WRF PBL parameterizations for marine boundary layer clouds: Cumulus and stratocumulus. *Monthly Weather Review*, v. 141, n. 7, p. 2265–2271.
- Jimenez, P. A.; Hacker, J. P.; Dudhia, J.; *et al.*, 2016. WRF-Solar: Description and Clear-Sky Assessment of an Augmented NWP Model for Solar Power Prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 97, n. 7, p. 1249–1264.
- Kariniotakis, G. 2017. *Renewable energy forecasting : From models to applications*. 1st Ed. Elsevier, 388 p.
- Lee, J. A.; Haupt, S. E.; Jiménez, P. A.; *et al.* 2017. Solar Irradiance Nowcasting Case Studies near Sacramento. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 56, n. 1, p. 85–108.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Gonçalves, A. R., Costa, R. S., Lima F. J. L., Rüther, R., Abreu, S. L., Tiepolo, G. M., Pereira, S. V., Souza, J. G., 2017. *ATLAS Brasileiro de energia Solar*. 2. ed. ISBN (978-85-17-00089-8). São José dos Campos – SP. 80 p.
- Powers, J. G.; Klemp, J. B.; Skamarock, W. C.; *et al.* 2017. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 98, n. 8, p. 1717–1737.

- Ruiz-Arias, J. A.; Dudhia, J.; Gueymard, C. A. 2014. 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.
- Thompson, G.; Eidhammer, T. 2014. A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 71, n. 10, p. 3636–3658.
- Thompson, G.; Tewari, M.; Ikeda, K.; *et al.* 2016. Explicitly-coupled cloud physics and radiation parameterizations and subsequent evaluation in WRF high-resolution convective forecasts. *Atmospheric Research*, v. 168, p. 92–104.
- Verbois, H.; Huva, R.; Rusydi, A.; Walsh, W. 2018. Solar irradiance forecasting in the tropics using numerical weather prediction and statistical learning. *Solar Energy*, v. 162, p. 265–277.
- Xie, Y.; Sengupta, M.; Dudhia, J. 2016. A Fast All-sky Radiation Model for Solar applications (FARMS): Algorithm and performance evaluation. *Solar Energy*, v. 135, p. 435–445.

WRF-SOLAR MODEL EVALUATION FOR GLOBAL HORIZONTAL AND DIRECT NORMAL IRRADIANCE FORECASTING

Abstract. *The photovoltaic solar energy in Brazil has grown expansively in the recent years, so, to improve the solar forecasting from nowcasting (minutes to a few hours) to short-term scale (hours to 3 days) is essential. Among the available methodologies, numerical weather prediction is one of the most traditional for short-term forecasting. The Weather Research and Forecasting - WRF model was used in this study in two versions: version 3.9.1.1, operationally used in CPTEC/INPE; and the WRF-Solar version, developed to address some of the energy industry's scientific challenges, especially the effect of clouds and aerosols on solar radiation. This work evaluates the prediction of global horizontal (GHI) and direct normal (DNI) irradiance up to 72 hours during August/2015 and January/2016 for Cachoeira Paulista, São Paulo state, using three physical experiments in both versions of WRF at 3 km horizontal resolution. All runs were made with initial and boundary conditions from CPTEC operational forecasts, with a 9 km spatial resolution and 3 hourly time resolution. The application of a hybrid shallow-cloud physical parameterization (Experiment 2, E2) in the WRF-Solar version obtained the best overall performance compared to the operational version of CPTEC. The mean error gain was even more important in the rainy month of January 2016, reaching almost 40% for GHI and 60% for DNI. Mean daytime cycles, cloud cover fraction and the mean error histogram with SOLAR_E2 showed a very promising for the Brazilian solar photovoltaic industry. However, further studies are needed to detail the direct and indirect impacts of aerosols on predictions, as well as to evaluate the SOLAR_E2 experiment for other regions of Brazil.*

Key words: *Numerical Weather Prediction, Aerosols, Solar Energy*