

SISTEMA OPERACIONAL *WEATHER ON DEMAND*: DESCRIÇÃO, AVALIAÇÃO E APLICAÇÃO NA GERAÇÃO EÓLICA DO NORDESTE BRASILEIRO

Dr. João A. Hackerott¹
Dr. Ólafur Rögnvaldsson²

Resumo: Pela primeira vez, no segundo semestre de 2018, foi operacionalizado o sistema *Weather On Demand* (WOD) para atender ao mercado eólico do Nordeste brasileiro. Este trabalho descreve o sistema WOD implementado e compara as previsões realizadas em dois períodos (de 10 a 16 de setembro de 2018 e de 13 a 19 de dezembro de 2018) com as previsões do modelo *Global Forecast System* (GFS) e com os registros coletados em quatro torres anemométricas. Os resultados mostram que o sistema WOD apresenta superioridade de 40% para o índice estatístico MAE e 30% para o RMSE frente às previsões feitas pelo modelo GFS. Além disso, enquanto o modelo GFS tende a subestimar o vento entre 1 m s^{-1} e $2,5 \text{ m s}^{-1}$, o sistema WOD proporciona previsões com viés praticamente nulo. O sistema WOD demonstrou ser uma ferramenta bastante precisa na previsão de sistemas meteorológicos de meso-escala, contemplando tanto circulações locais quanto linhas de instabilidade que ocorrem no Nordeste brasileiro.

Abstract: For the first time, in the second half of 2018, the *Weather On Demand* (WOD) system was implemented to serve the Brazilian Northeast wind market. This work describes the WOD system implemented and compares the forecasts made for two periods (10 to 16 September 2018 and 13 to 19 December 2018) with the forecasts from the *Global Forecast System* (GFS) model and with the observations taken at four anemometric towers. The results show that the WOD system presents a superiority of 40% for the MAE statistical index and 30% for the RMSE compared to the forecasts made by the GFS model. In addition, while the GFS model tends to underestimate the wind between 1 m s^{-1} and 2.5 m s^{-1} , the WOD system provides forecasts with virtually no bias. The WOD system has been shown to be a very accurate tool in the forecasting of meso-scale meteorological systems, considering both local circulation and instability lines that occur in the Brazilian Northeast.

Palavras-chave: Energia eólica, Previsão do tempo, Sistema operacional WOD, modelo WRF.

1 INTRODUÇÃO

A geração eólica brasileira vem crescendo consistentemente na última década, ocupando atualmente a terceira maior fatia da matriz elétrica do Brasil com 8,4% da geração total, de acordo com os dados consolidados de geração para o ano de 2018, produzidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). Este fato faz da previsão operacional de geração eólica uma ferramenta fundamental, não apenas para agentes geradores, como também para comercializadoras e de transmissoras.

Devido à grande variabilidade intra-diária de fontes renováveis como eólica e solar, há urgência em alterar a frequência de atualização dos preços da energia elétrica no Brasil, passando de base semanal para base diária. A Comissão Permanente para Análise de Metodologias e Programas Computacionais do Setor Elétrico³ já previu esta alteração para o início de 2020,

¹ Meteorologista doutor, CEO da Tempo OK. Email: joao.hackerott@tempook.com

² Meteorologista doutor, CEO da Belgingur. Email: or@belgingur.is

³ CPAMP/MME: Nota Informativa CPAMP - 06-06-2018. Brasília

seguindo o modelo de precificação utilizado em países europeus. Assim, o cálculo da geração de energias renováveis para o horizonte de médio prazo (1 a 10 dias) e sua precificação tendem a exigir cada vez mais previsões meteorológicas de meso-escala, com alta resolução temporal e espacial. A importância e valor deste tipo de previsão já vêm sendo rotineiramente noticiado na imprensa européia (STARN, 2018; NORD POOL, 2019). Além disso, previsões meteorológicas assertivas possibilitam ao setor de energia eólica três otimizações: otimização no uso de guindastes nas operações de O&M; otimização no planejamento de manutenção preventiva dos módulos geradores; e otimização no despacho de energia na rede de transmissão.

Neste contexto, o sistema operacional diário de previsão do tempo WOD - *Weather On Demand* (ROGNVALDSSON; RAGNARSSON; STANISLAWSKA, 2017) foi implementado no Nordeste do Brasil em agosto de 2018, pela Tempo OK⁴. Esse sistema disponibiliza previsões de variáveis meteorológicas importantes para o mercado de energias renováveis. O sistema WOD gera previsões diárias com resolução temporal de 30 minutos e espacial de 2,5 km para 5 dias e 12,5 km para 10 dias.

O objetivo do presente trabalho é descrever o sistema WOD implementado no Nordeste brasileiro, avaliando seus resultados a partir da comparação com o modelo meteorológico de previsão do tempo *Global Forecast System* (GFS) amplamente utilizado no mercado eólico nacional. Esta avaliação considerou previsões da variável velocidade do vento para até 5 dias. Os resultados foram comparados com dados coletados em quatro torres anemométricas cordialmente cedidos⁵ pelas empresas Omega Energia⁶ e Atlantic Energias Renováveis⁷.

Os dados observados foram coletados ao longo de dois períodos. O primeiro corresponde ao período entre os dias 10 e 16 de setembro de 2018, quando ocorreram recordes consecutivos de geração eólica no Nordeste brasileiro (ONS, 2018; ORDOÑEZ, 2018). O segundo período corresponde aos dias 13 a 19 de dezembro de 2018, quando a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) influenciou significativamente a região Nordeste brasileira e no dia 18 houve a passagem de uma intensa linha de instabilidade (FERREIRA; MELLO, 2005).

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA WOD

Diversos estudos mostram que modelos de meso-escala são os mais adequados para previsão de geração eólica (MARIA; COSTA; SOMBRA, 2008; SANTOS et al., 2018; ARCHER et al., 2017). O sistema WOD, em operação no Nordeste brasileiro desde agosto de 2018, é baseado no modelo meteorológico de meso-escala *Weather Research and Forecast* - WRF (SKAMAROCK et al., 2008; HACKEROTT, 2018), versão 3.9.1. Este software meteorológico é conhecido atualmente como o modelo atmosférico mais popular do mundo (POWERS et al., 2017). Ele foi desenvolvido inicialmente pelo *National Center for Atmospheric Research*

⁴ Tempo OK Tecnologia em Meteorologia Ltda. < <http://www.temppook.com.br> >

⁵ Os autores agradecem à Omega Energia e à Atlantic Energias Renováveis o fornecimento dos dados de torres anemométricas utilizados neste trabalho.

⁶ Omega Energia < <http://www.omegaenergia.com.br> >

⁷ Atlantic Energias Renováveis S.A. < <http://atlanticenergias.com.br> >

(NCAR) em parceria com diversas instituições governamentais norte americanas, com sua primeira versão disponibilizada publicamente em dezembro de 2000. Atualmente, o WRF é um verdadeiro modelo comunitário, continuamente aperfeiçoado por contribuições sugeridas por pesquisadores de diversas empresas e institutos em 162 países (POWERS et al., 2017).

A versão do modelo WRF atualmente implementada no sistema WOD possui as seguintes características em seu núcleo dinâmico, onde são resolvidas as equações de Navier-Stokes:

- Equações no sistema Euleriano não hidrostático, conservativo para variáveis escalares.
- Coordenada vertical híbrida sigma-pressão ($\sigma - P$), que acompanha a topografia (SKAMAROCK et al., 2008) nos níveis entre a superfície e $\sigma = 0,2$, e mantém níveis constantes de pressão acima disso.
- Grade horizontal do tipo C de Arakawa.
- Integração no tempo: esquema de 3^a ordem de Runge-Kutta.
- Discretização espacial: esquema de 6^a ordem para advecção.
- Interação entre domínios aninhados com dupla direção (*two-way*).

O modelo WRF possui uma vasta quantidade de opções para esquemas de microfísica, de convecção, de fluxos turbulentos, de fluxos sub-superfície e de radiação. As configurações utilizadas nas operações no Nordeste brasileiro não se limitam às recomendações internacionais⁸, foram considerados os ajustes do modelo WRF processado para o Sudeste brasileiro, pela Tempo OK, e operacional desde novembro de 2017.

Por ser um modelo regional, o WRF requer dados de condições de fronteira para informar as condições atmosféricas nas quatro laterais de sua grade de mais baixa resolução (também chamada de grade mãe ou *d1*). Para isso, o sistema WOD utiliza dados do modelo *Global Forecast System* (GFS), processado pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e disponibilizado com uma resolução horizontal de $0,25^\circ$ em latitude e longitude e com campos de previsão atualizados a cada 3 horas. O modelo WRF aplica uma regressão linear entre os tempos do modelo GFS para atualizar as suas laterais a cada instante de integração (intervalos na ordem de poucos minutos). Para os dados do instante “zero” da previsão (também conhecido por análise), o sistema WOD utiliza os dados do GFS, desta vez interpolados espacialmente e com campo de vento rotacionado para a grade do modelo WRF.

A posição e tamanho das grades do modelo WRF foram configuradas no sistema WOD para o Nordeste brasileiro respeitando cinco premissas (WARNER, 2011; HACKEROTT, 2013):

1. O ponto de interesse deve estar distante da lateral da grade *d2* por onde passa o fluxo predominante que atinge a localidade de interesse.

⁸ http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wrf.html

2. A grade $d1$ deve ser grande o suficiente para resolver por completo os sistemas sinóticos que influenciam a região de interesse.
3. As laterais da grade $d1$ devem estar longe o suficiente do ponto de interesse para que efeitos de descontinuidade causados pela baixa frequência das atualizações do modelo que fornece as condições de contorno sejam minimizados.
4. As laterais das grades $d1$ e $d2$ não devem atravessar regiões com topografia acentuada.
5. A grade $d2$ deve ser grande o suficiente para resolver os fenômenos de meso-escala que influenciam a região de interesse.

As posições das grades $d1$ e $d2$ configuradas no sistema WOD para o Nordeste brasileiro estão ilustradas na Figura 1. A grade $d1$ possui 520×620 pontos de grade com espaçamento definido em 12,5 km. Esta grade engloba praticamente toda a região influenciada climatologicamente pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) do Atlântico. A grade $d2$ possui 566×516 pontos de grade com espaçamento definido em 2,5 km. Esta grade engloba os principais parques eólicos do Nordeste brasileiro com pelo menos 50 pontos de grade distantes das laterais, além de todos os fenômenos meteorológicos de meso-escala que ocorrem na região: brisas locais, linhas de instabilidade e complexos convectivos.

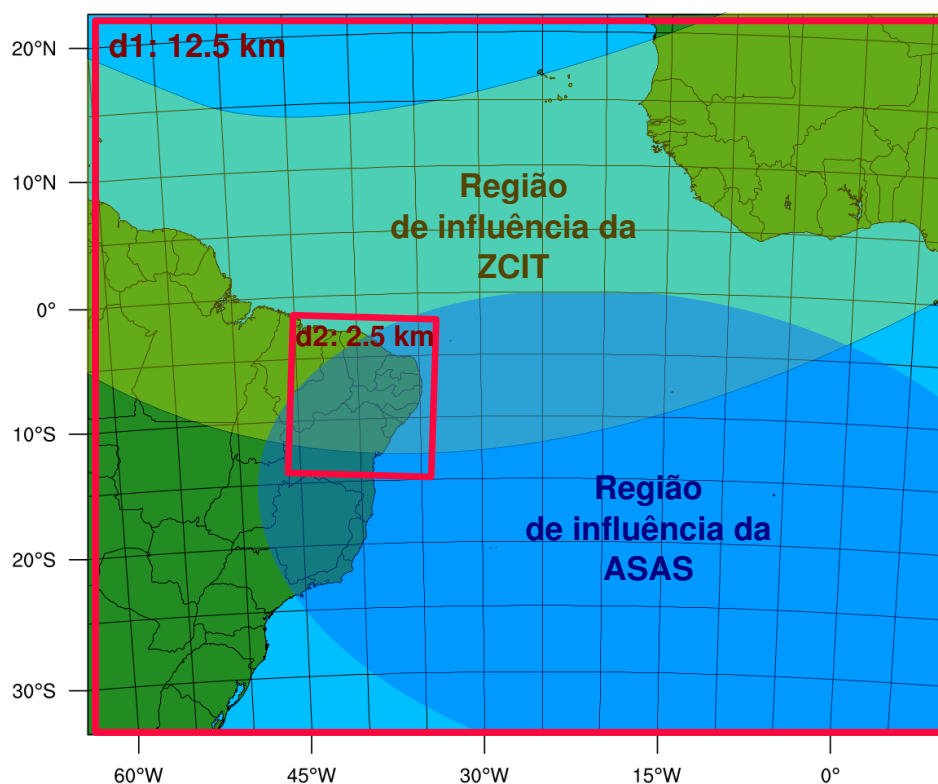


Figura 1 – Posição das duas grades $d1$ e $d2$ do modelo (retângulos vermelhos) e região média de influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

A escolha dos valores de 12,5 km e de 2,5 km de espaçamento de grade para $d1$ e $d2$ respeitaram as seguintes condicionantes: (a) O fator de *downscaling* 5 (resultado da divisão entre a resolução das duas grades) vem sendo recomendado pelo NCAR⁹ por ser uma razão em que o centro dos pontos de grade entre diferentes domínios se coincidem e o valor não é tão grande a ponto de gerar instabilidades nas proximidades das laterais. (b) Ambas as grades estão fora do intervalo entre 4 e 10 km, conhecido com *cumulus gray-zone* (DUDHIA, 2014), onde os esquemas numéricos para convecção geralmente não apresentam bons resultados e, ao mesmo tempo, os esquemas de microfísica não são capazes de resolver toda convecção. (c) Para o domínio $d1$, de 12,5 km de resolução, o esquema convectivo *New Tiedtke* (ZHANG; WANG; HAMILTON, 2011) é aplicado para resolver convecção, e para o domínio $d2$, de 2,5 km, possui resolução suficiente para resolver explicitamente processos convectivos através dos esquemas de microfísica, de forma que o esquema de convecção é desligado. (d) Espaçamentos de grade próximos ou abaixo de 1 km não são recomendados por estarem na região onde a turbulência atmosférica é parcialmente resolvida explicitamente pelo modelo WRF e ao mesmo tempo implicitamente resolvido por esquemas de camada limite planetária (WYNGAARD, 2004). Testes feitos pela Tempo OK com espaçamento de grade abaixo de 2 km, mostraram intensificações exageradas de circulações de meso-escala, indicando super-estimativa de fluxos turbulentos graças à sobreposição dos resultados gerados explicitamente e implicitamente pelo modelo WRF.

As informações de vegetação e topografia utilizadas no modelo WRF pelo sistema WOD são provenientes do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), com resolução espacial de 30 arcsec (aproximadamente 90 m) e 20 tipos diferentes de vegetação. Apesar de ser processado em resoluções maiores, o modelo WRF permite utilização de informações de sub-grade ao longo de sua integração, tornando importante o uso de altas resoluções nos dados de topografia e vegetação. A Figura 2 ilustra como o modelo WRF, configurado no sistema WOD “enxerga”, a topografia e vegetação na grade $d2$.

⁹ www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/namelist_best_prac_wps.html

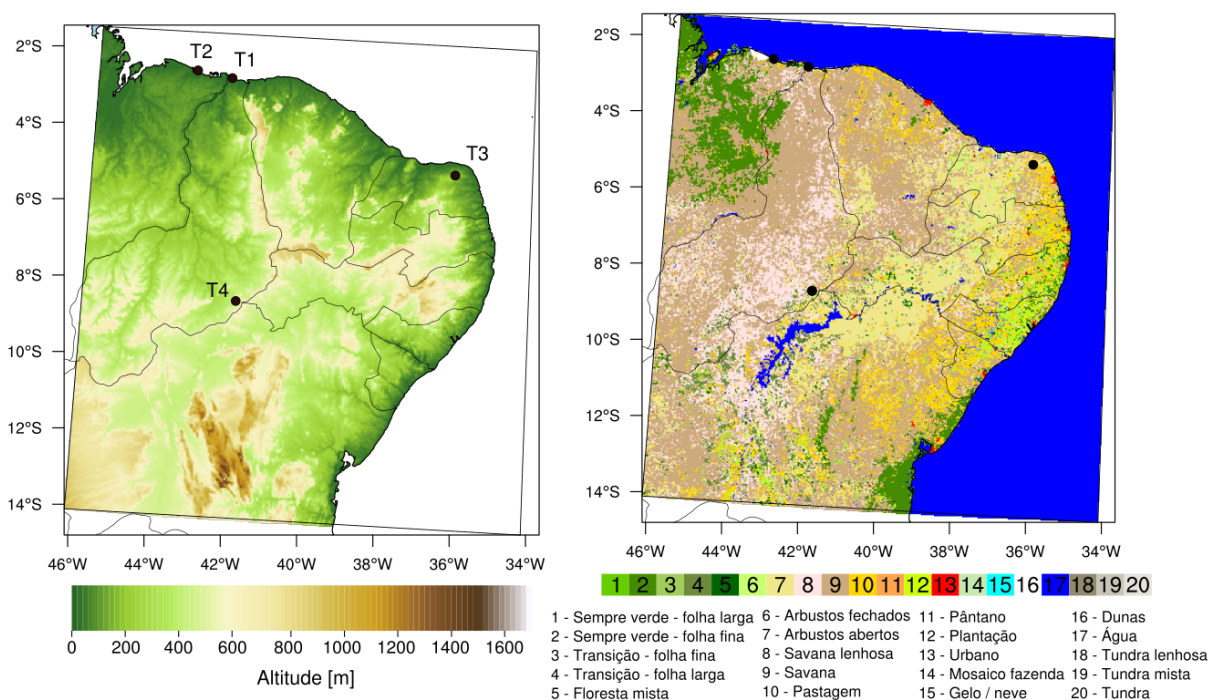


Figura 2 – Mapa de topografia (esquerda) e vegetação (direita) em cada ponto de grade do domínio de alta resolução (2,5 km de espaçamento de grade). Os pontos pretos indicam a posição das quatro torres anemométricas utilizadas neste trabalho.

O sistema WOD adota 41 níveis verticais acima da superfície, distribuídos de acordo com a Figura 3. Esta distribuição foi testada pela Tempo OK para o continente sulamericano e se mostrou estável e satisfatória.

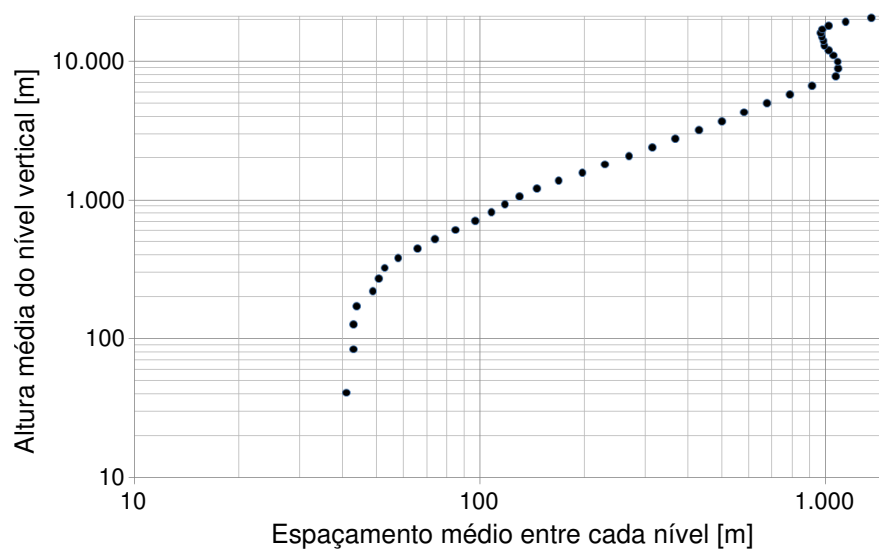


Figura 3 – Altura média [m] dos 41 níveis verticais utilizados no sistema WOD comparada com o espaçamento vertical entre cada nível do modelo WRF [m].

Esta distribuição foi escolhida seguindo as seguintes premissas:

1. Distribuir homogeneamente a quantidade de níveis verticais nas três camadas atmosféricas definidas por: abaixo de 1 km, entre 1 e 10 km e acima de 10 km (KIMBALL; DOUGHERTY, 2006; MA et al., 2012). O sistema WOD possui 14, 16 e 11 níveis nestas três camadas, respectivamente.
2. Posicionar o primeiro nível do modelo entre 25 e 50 m (SHIN; HONG; DUDHIA, 2012; MA et al., 2014; ZÄNGL et al., 2008). O sistema WOD possui o primeiro nível em 40 m.
3. Manter o espaçamento vertical nos primeiros níveis da atmosfera o mais próximo possível de 40 m (SMITH et al., 2018). Os cinco primeiros níveis verticais do sistema WOD possuem espaçamento vertical inferior a 50 m.
4. Reduzir ao máximo possível o espaçamento vertical na região da tropopausa, 10-15 km (CHOU, 2011). O sistema WOD possui espaçamento vertical limitado em 1 km nesta região.
5. Posicionar o topo do modelo na estratosfera, preferencialmente acima de 50 hPa (MA et al., 2012), equivalente a 20 km de altitude. O topo do modelo WRF está definido em 50 hPa no sistema WOD.

Além de seguir as prescrições descritas anteriormente, que ajudam a garantir estabilidade e eficiência computacional durante a integração das simulações, o sistema WOD utiliza um algoritmo conhecido como *adaptive time step*, que estima o intervalo de integração de cada passo no tempo conforme limites de estabilidade pré-definidos. A estabilidade também é garantida por filtros que removem ondas de muito alta frequência que são propagadas para os níveis mais altos da atmosfera e são refletidas no topo do modelo WRF, gerando instabilidade numérica.

2.1 DESCRIÇÃO DO HARDWARE DO SISTEMA WOD

O processamento do sistema WOD descrito neste trabalho ocorre em super-computadores da empresa islandesa Belgingur¹⁰, representada no Brasil pela Tempo OK, mais especificamente no *Verne* que está ilustrado na Figura 4.

¹⁰ Belgingur Reiknistofa I Vedurfradi Ehf. < <http://belgingur.eu/> >



Figura 4 – Fotografia da sala de servidores da Belgingur.

Este super-computador possui as seguintes configurações técnicas:

- Sistema operacional *CentOS 7 Enterprise*;
- Servidor mestre com 32 núcleos de processamento *Intel E5-2690 2.3 GHz* e 256 GB de memória RAM;
- Cluster computacional consiste de 40 nós com 16 núcleos de processamento *Intel E5-2690 2.6 GHz* 64 Gb de memória RAM cada;
- Todos os nós são interconectados por rede *InfiniBand* de baixa latência, assim como 10 Gbit *ethernet*.
- Servidor de arquivos adicional com 12 núcleos de processamento *Intel E5-2603 1.9 GHz*, 128 GB de memória RAM e 50 Tb de HD SAS.

Cada previsão de cinco dias do sistema configurado para o Nordeste brasileiro consome cerca de cinco horas de processamento em aproximadamente 300 núcleos de processamento dedicados apenas para esta operação. O sistema WOD foi desenhado para monitorar e coordenar todos os processos desde o download dos dados de condições de fronteira até a geração e disponibilização *online* de informação pós-processada, como por exemplo, dados de geração eólica em um determinado parque, garantindo eficiência e robustez ao processo. A alta capacidade do cluster computacional onde o sistema WOD é processado permite a manutenção do hardware mesmo durante operações diárias, garantindo a continuidade das operações.

3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE PREVISÕES

Este trabalho utilizou dados de velocidade do vento medidos a 90 m de altura em quatro torres anemométrica, **T1**, **T2**, **T3** e **T4**, localizadas no norte do Piauí, no Maranhão, no Rio Grande do Norte e no oeste do Piauí, respectivamente, conforme ilustrado anteriormente na Figura 2. As torres **T1** e **T2** estão próximas ao litoral, enquanto que as torres **T3** e **T4** estão no interior do Nordeste brasileiro.

Os dois períodos analisados neste trabalho foram escolhidos criteriosamente. O primeiro, de 10 a 16 de setembro de 2018, ficou conhecido no setor eólico como um período de recordes de geração no Nordeste brasileiro, portanto, um período com elevados valores de velocidade do vento na região. O segundo, de 13 a 19 de dezembro de 2018, porém, foi um período com ventos mais fracos e com significativa oscilação na intensidade do vento medido nos parques eólicos, o que é característico para esta época do ano, quando a ZCIT se aproxima do norte do Nordeste brasileiro.

Um caso especial ocorreu no segundo período analisado, quando ao longo do dia 17 de dezembro e manhã do dia 18 de dezembro foi observado nos resultados do sistema WOD um fenômeno característico de linha de instabilidade. As previsões indicaram uma região em formato de linha orientada de forma paralela à costa do Nordeste brasileiro que se propagou para sudoeste. A torre anemométrica **T4** registrou o aumento da intensidade do vento relacionado a este fenômeno meteorológico na madrugada do dia 18 de dezembro. Nesta localidade, a linha de instabilidade foi precisamente resolvida pelo sistema WOD. Este fenômeno meteorológico está ilustrado na Figura 5, que compara o campo de vento a uma altura constante de 90 m acima da superfície previsto pelas simulações das 00Z do dia 17 de dezembro de 2018 para às 18Z deste mesmo dia feitas pelo sistema WOD e pelo modelo GFS.

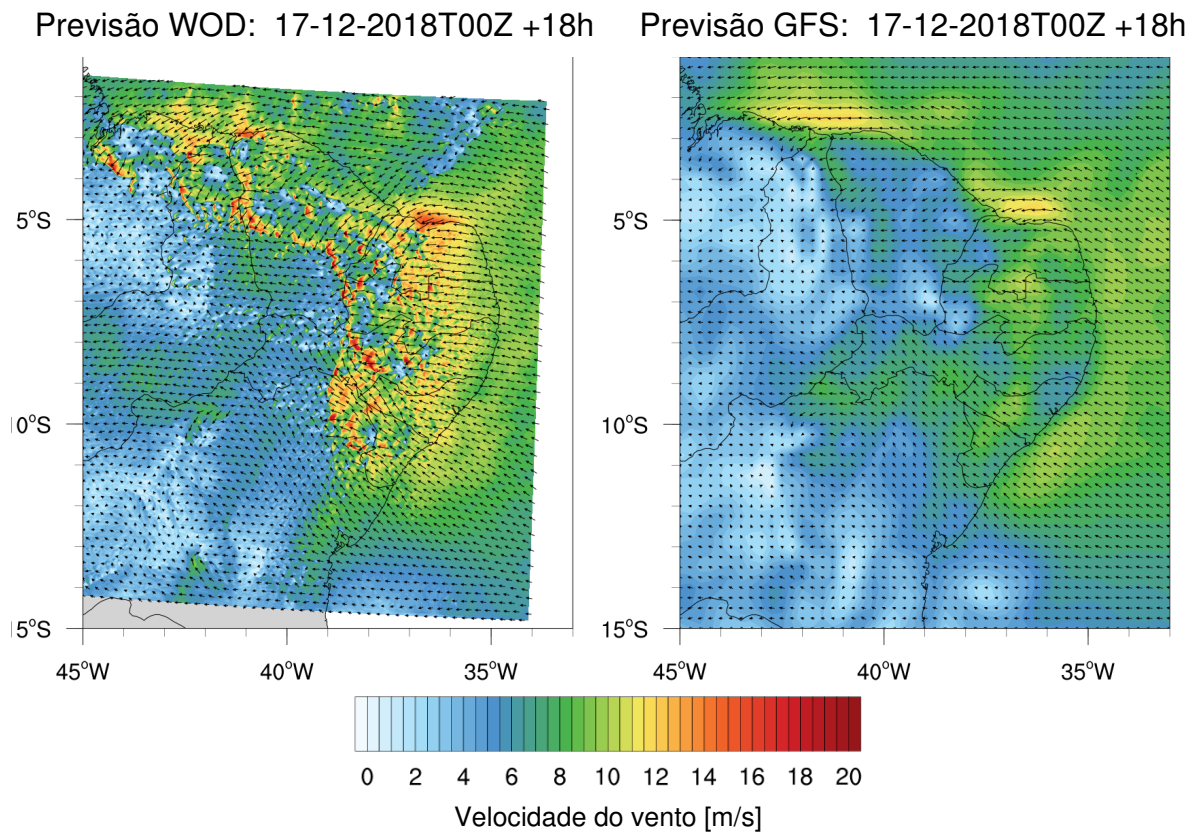


Figura 5 – Previsão da velocidade e direção do vento a 90 m acima da superfície feita pelo sistema WOD para a grade *d2* (esquerda) e pelo modelo GFS (direita) no dia 17 de dezembro de 2018 para às 18Z do mesmo dia.

Este trabalho utilizou os dados do modelo GFS para análise qualitativa e comparativa dos resultados do sistema WOD. O modelo GFS é processado pelo NCEP e disponibilizado com uma resolução espacial de $0,25^\circ$ de latitude e longitude e resolução temporal de 3 horas¹¹. O modelo GFS é um modelo global composto de quatro módulos acoplados: atmosfera, oceano, solo e gelo marinho. Por ser disponibilizado gratuitamente pelo NCEP, os resultados do modelo GFS são amplamente conhecidos e utilizados pelo mercado eólico brasileiro.

Os resultados do sistema WOD e do modelo GFS foram coletados para os pontos mais próximos das coordenadas das torres **T1**, **T2**, **T3** e **T4** para o nível de 90 m acima da superfície. No caso do modelo GFS, cujos resultados estão disponíveis apenas para os níveis de 80 e 120 m, foi feita uma interpolação linear para o nível de 90 m acima da superfície. Nenhuma metodologia de correção de pós-processamento foi aplicada aos dados de previsão.

A avaliação do sistema WOD foi feita de forma objetiva comparando todas as previsões para até 120 horas com os dados horários observados nas torres anemométricas. A análise de desvios considerou as seguintes métricas estatísticas: erro médio absoluto (MAE), viés (BIAS),

¹¹ <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>

raiz quadrada da média dos quadrados dos desvios (RMSE). Os valores de média, desvio padrão (STD), percentil de 10% (P10) e percentil de 90% (P90) das previsões e observações da velocidade do vento também foram comparados entre si. Estas métricas estão descritas a seguir, onde p é um valor previsto, o é um valor observado e x é um valor qualquer, seja previsto ou observado.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(p_i - o_i)^2} \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2} \quad (3)$$

$$média := \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (4)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

4 RESULTADOS

A comparação dos dados observados nas quatro torres anemométricas com as previsões do sistema WOD e do modelo GFS está ilustrada nas Figuras 6 (setembro de 2018) e 7 (dezembro de 2018). As previsões consideraram apenas o primeiro dia com 6 horas de *spin-up* (análise + 6h a análise + 30h). É nítida a melhor previsão do vento feita pelo sistema WOD (curvas vermelhas), quando comparado ao modelo GFS (curva azul). De forma geral, o sistema WOD representa muito mais satisfatoriamente o ciclo diurno do vento (tanto em fase quanto em magnitude), principalmente nas torres **T1**, **T2**, e **T4**. A torre **T3**, por estar numa região mais plana e afastada do litoral, não apresenta um ciclo diurno do vento tão acentuado quanto as demais torres. Mesmo assim, as pequenas oscilações observadas na madrugada dos dias 11 e 15 de setembro e 17 e 18 de dezembro, foram muito melhor simuladas pelo sistema WOD.

Destaca-se na Figura 7 o fenômeno de linha de instabilidade que passou pela torre **T4** entre 00 e 05Z do dia 18 de dezembro. Neste período, a torre **T4** registrou ventos médios de 10 m s^{-1} , quando a média do vento costuma ser inferior a 5 m s^{-1} durante a noite. A passagem desta linha de instabilidade foi precisamente prevista pelo sistema WOD tanto em magnitude como em fase com mais de 24 horas de antecedência. O modelo GFS, por não ser um modelo capaz de resolver fenômenos de meso-escala, não previu esta linha de instabilidade. Este modelo de características globais adiantou a intensificação do vento que geralmente ocorre após o amanhecer (devido ao aquecimento terrestre e consequente intensificação dos vórtices turbulentos), como se fosse uma onda de escala sinótica (Figura 5). O sistema WOD, todavia, representou

bem a desaceleração do vento após a passagem da linha de instabilidade e aceleração em seguida devido ao aquecimento da atmosfera, mesmo que ainda tenha subestimado a magnitude no período da tarde. Este fenômeno meteorológico foi previsto pelo sistema WOD em todas as suas previsões desde 5 dias de antecedência do evento, com uma pequena diferença de fase (menos que duas horas) entre as previsões.

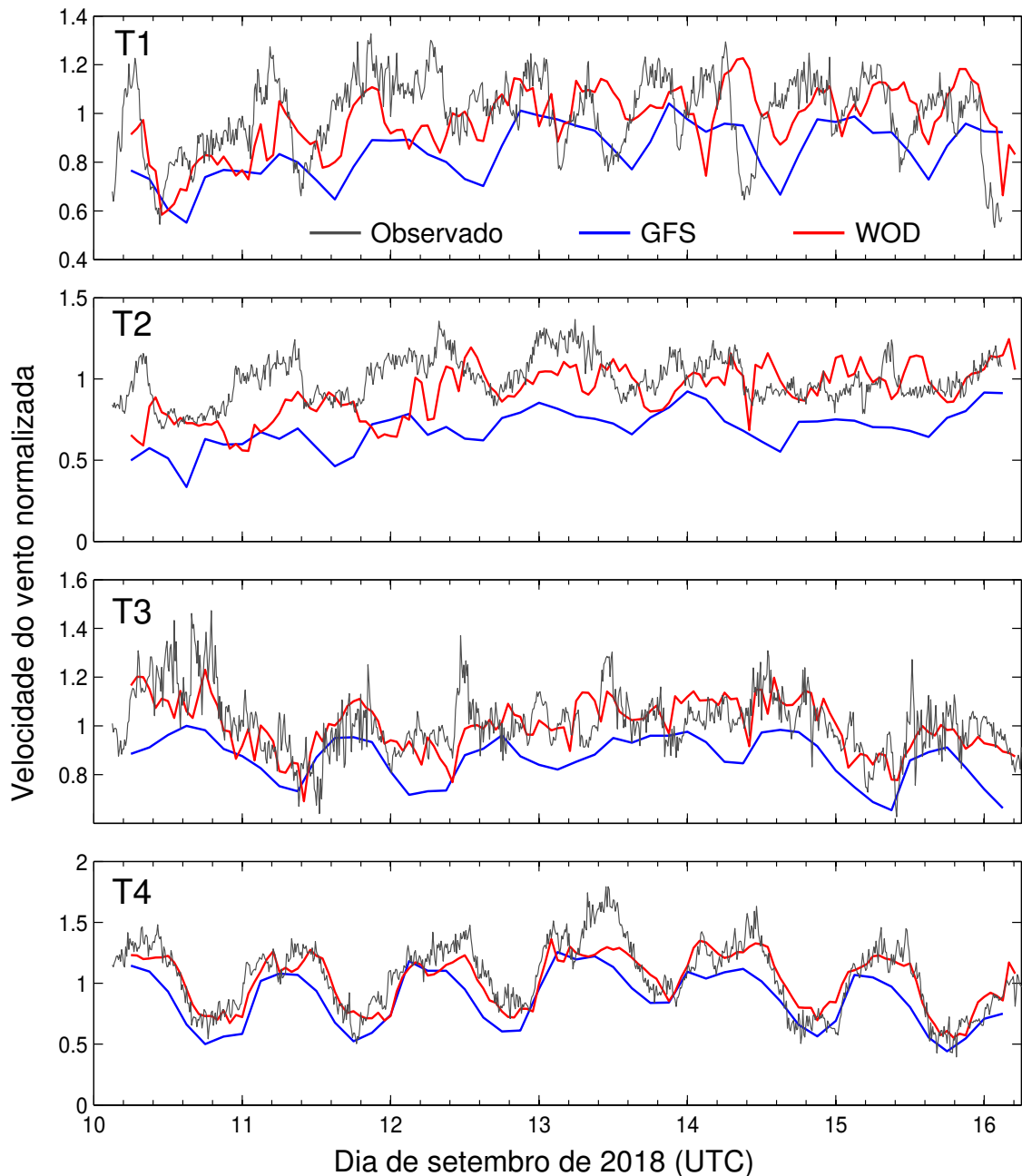


Figura 6 – Séries temporais para o período entre os dias 10 e 16 de setembro de 2018 (horário UTC) de velocidade do vento normalizada pela média das observações [adimensional] nas quatro estações analisadas neste trabalho. Os dados observados nas torres estão representados pelas linhas pretas. As linhas vermelhas e azuis representam as previsões para o período entre as horas 6 e 30 a partir das análises feitas às 00Z de cada dia feitas pelo sistema WOD e pelo modelo GFS, respectivamente.

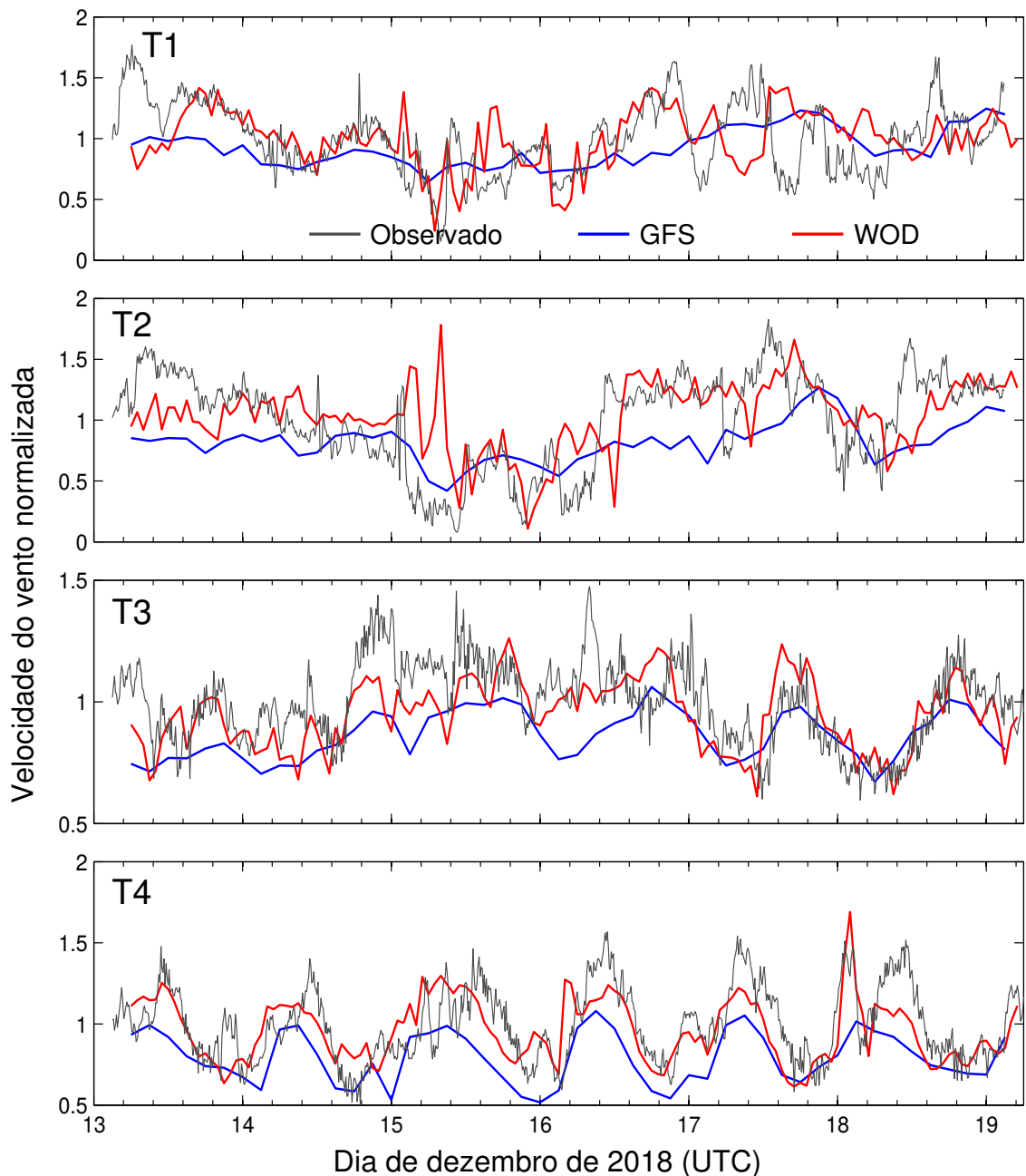


Figura 7 – Séries temporais para o período entre os dias 13 e 19 de dezembro de 2018 (horário UTC) de velocidade do vento normalizada pela média das observações [adimensional] nas quatro torres anemométricas. Os dados observados nas torres estão representados pelas linhas pretas. As linhas vermelhas e azuis representam as previsões para o período entre as horas 6 e 30 a partir das análises feitas às 00Z de cada dia feitas pelo sistema WOD e pelo modelo GFS, respectivamente.

De forma objetiva, considerando-se todas as previsões para todas as torres nos dois períodos analisados, as previsões do sistema WOD apresentam superioridade frente às previsões do modelo GFS, com MAE 40% inferior e RMSE 30% inferior (Figura 8). Enquanto o modelo GFS apresenta um ciclo diurno no viés (BIAS) do vento variando de -1 m s^{-1} a $-2,5 \text{ m s}^{-1}$

(subestima a magnitude do vento), o sistema WOD possui viés próximo de zero, sem configuração de ciclo diurno, indicando boa correlação entre as previsões e observações.

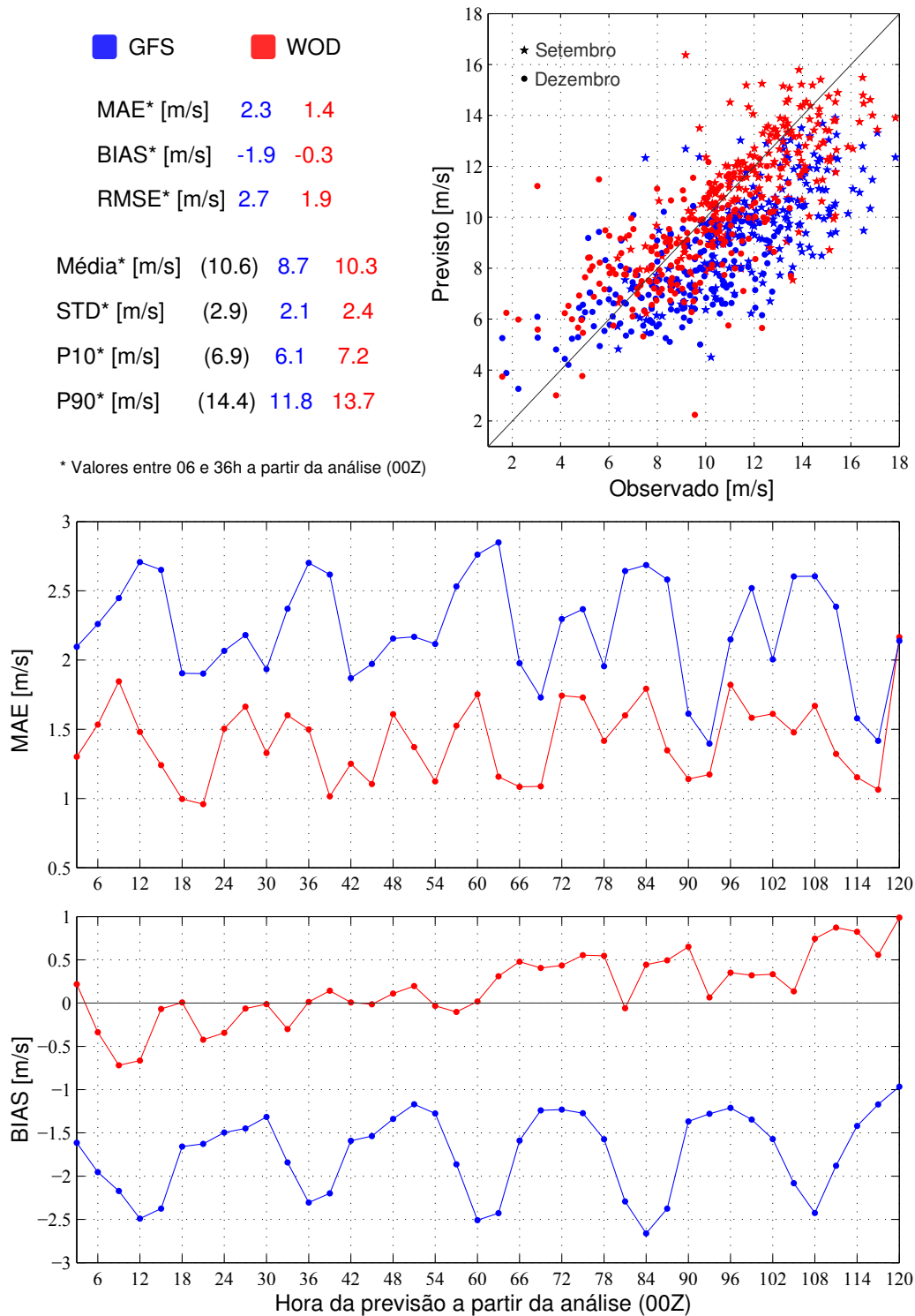


Figura 8 – Resultados estatísticos obtidos da comparação entre os dados de velocidade do vento observados a 90 m acima da superfície pelas quatro torres anemométricas e previstos pelo sistema WOD (vermelho) e pelo modelo GFS (azul). Os dados observados pelas torres e os dados previstos pelo sistema WOD são médias de 3 horas centradas, permitindo comparação com o modelo GFS.

Observa-se, ainda na Figura 8, que ambas as previsões do modelo GFS e do sistema WOD não apresentam tendência de aumento do erro médio absoluto à medida em que as previsões ficam mais antigas. A ligeira elevação do viés, passando de negativo para positivo nas previsões do sistema WOD se deve a pequenas diferenças de fase nas previsões dos ciclos diurno do vento, feitas em dias distintos. Este efeito é certamente reduzido quando um período maior é analisado.

As métricas objetivas de média, desvio padrão (STD) e percentil de 10% (P10) e de 90% (P90) também foram consideravelmente mais bem previstas pelo sistema WOD do que pelo modelo GFS (Figura 8). A média do vento observado nas quatro torres anemométricas ao longo dos dois períodos foi 18% superior à média prevista pelo modelo GFS, e apenas 3% superior ao sistema WOD, quando consideradas as previsões entre as hora 06 e 36 a partir das análises (00Z). Outra diferença considerável está no P90, onde o sistema WOD subestimou em apenas 5% a magnitude dos ventos mais intensos, enquanto que o modelo GFS subestimou estes em 18%. Quanto aos ventos mais fracos (P10), o sistema WOD os superestimaram em 4%, enquanto que o modelo GFS os subestimaram em 11%. A variância dos dados, analisada através do desvio padrão (STD), também teve um resultado melhor para o sistema WOD, diferença de 17% contra 28% do modelo GFS na comparação com o STD dos dados de vento observados.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho descreveu como o sistema WOD foi configurado para a previsão operacional meteorológica feita para os parques eólicos do Nordeste brasileiro. Esta configuração foi implementada em agosto de 2018 e desde então vem gerando diariamente previsões para 5 dias com 2,5 km de espaçamento de grade e 12,5 km para até 10 dias. Em mais de seis meses, não houve nenhum dia em que o sistema operacional WOD não tenha gerado previsões com sucesso. Originalmente com uma resolução temporal de 1 hora, passou para 30 minutos em dezembro de 2018, devida a exigências do mercado brasileiro para estimativa de geração eólica.

A análise objetiva dos resultados das previsões do sistema WOD comparadas com os dados de vento registrados nas 4 torres anemométricas ao longo de dois períodos de 6 dias cada, mostrou larga superioridade do sistema WOD com relação ao modelo global GFS. Índices estatísticos como MAE e RMSE mostraram superioridade de 40% e 30%, respectivamente, das previsões feitas pelo sistema WOD em comparação com àquelas feitas pelo modelo GFS. Enquanto que o modelo GFS tende a subestimar o vento entre 1 m s^{-1} e $2,5 \text{ m s}^{-1}$, o sistema WOD proporciona resultados com viés praticamente nulo.

Além disso, fenômenos meteorológicos de meso-escala como o evento de linha de instabilidade que ocorreu no interior do Nordeste brasileiro entre os dias 17 e 18 de dezembro de 2018, foram precisamente resolvidos pelo sistema WOD com 2,5 km de espaçamento de grade. Na madrugada do dia 18 de dezembro, a torre anemométrica **T4**, no interior do Piauí, registrou elevação abrupta da velocidade do vento para valores superiores a 10 m s^{-1} , sendo o sistema WOD o único capaz de representá-la com 5 dias de antecedência.

É importante enfatizar que nenhuma correção de pós-processamento foi aplicada aos

resultados das previsões feitas pelo sistema WOD ou pelo modelo GFS analisadas neste trabalho. Métodos de correção estatística de pós-processamento (CUI et al., 2012; ROBERTSON; SHRESTHA; WANG, 2013) são comumente utilizadas para melhoria dos resultados de previsões. Porém, dado o objetivo deste trabalho de avaliar os resultados brutos do sistema meteorológico para previsão de vento, as opções de correção de pós-processamento do sistema WOD não foram ativadas.

Diversas melhorias seguem em desenvolvimento pela Tempo OK para o sistema WOD processado para o Nordeste brasileiro. Ainda no ano de 2019 pretende-se atualizar a versão do modelo WRF para 4.1, além implementar um método próprio de assimilação de dados observados e aumento da capacidade computacional para reduzir o tempo de processamento das previsões.

Por último, é importante ressaltar que há diversas aplicações do sistema WOD para o setor de energias renováveis além das mencionadas neste trabalho como a energia eólica. Atualmente o sistema WOD vem sendo usado por empresas do setor fotovoltaico para estimar previsão de geração em parques solares de grande porte. Com as previsões de irradiância solar em plano inclinado, com ou sem sistema de *tracking*, e previsões de temperatura e velocidade do vento, por exemplo, é possível estimar a previsão de geração fotovoltaica. Neste mercado de energia solar, as previsões do sistema WOD se estendem até 30 dias, com espaçamento de grade de 20 km a partir do décimo dia de previsão. Outro setor que vem utilizando com frequência as previsões do sistema WOD no Brasil é o setor de comercialização. Um domínio configurado com alta resolução para o Sudeste brasileiro vem sendo processado desde novembro de 2017 para gerar dados para modelos chuva-vazão e cálculo de ENA (Energia Natural Afluente) nas principais bacias hidrográficas da região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCHER, C. L. et al. The challenge of integrating offshore wind power in the US electric grid. Part I: Wind forecast error. **Renewable energy**, v. 103, p. 346–360, 2017.
- CHOU, S.-H. An example of vertical resolution impact on WRF-Var analysis. **Electron. J. Oper. Meteorol**, v. 12, p. 1–20, 2011.
- CUI, B. et al. Bias correction for global ensemble forecast. **Weather and Forecasting**, v. 27, n. 2, p. 396–410, 2012.
- DUDHIA, J. A history of mesoscale model development. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 50, n. 1, p. 121–131, 2014.
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.
- HACKEROTT, J. A. **Simulação numérica a partir do modelo WRF e análise de ventos em superfície na região da Baía de Guanabara (RJ)**. 130 p. Dissertação (Mestrado em ciências atmosféricas) — Universidade de São Paulo / Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas / Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2013.

HACKEROTT, J. A. **Momentum fluxes in the Marine Atmospheric Surface Layer: a study on the Southwestern Atlantic Ocean**. 103 p. Tese (Doutorado em ciências atmosféricas) — Universidade de São Paulo / Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas / Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, 2018.

KIMBALL, S. K.; DOUGHERTY, F. C. The Sensitivity of Idealized Hurricane Structure and Development to the Distribution of Vertical Levels in MM5. **Monthly Weather Review**, v. 134, n. 7, p. 1987–2008, 2006.

MA, Z. et al. Sensitivity of tropical cyclone intensity and structure to vertical resolution in wrf. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 1, p. 67–81, Feb 2012.

MA, Z. et al. Impacts of the lowest model level height on tropical cyclone intensity and structure. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 31, n. 2, p. 421–434, 2014.

MARIA, P. H. S. d.; COSTA, A. A.; SOMBRA, S. S. Modelagem numérica em alta resolução para previsão de geração de energia eólica no Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, p. 477–489, 2008.

NORD POOL. **Intraday market - Nord Pool offers an intraday market covering the Nordic, Baltic, UK and German markets**. 2019. Disponível em: <<https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Intraday-market/>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

ONS. **Boletim Mensal de Geração Eólica Setembro/2018**. [S.l.], 2018. 75 p.

ORDOÑEZ, R. **Geração de energia solar e dos ventos bate recorde no Nordeste - Energia eólica atingiu 8.665 MW no pico de geração no último dia 13**. 2018. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/geracao-de-energia-solar-dos-ventos-bate-recorde-no-nordeste-23069974>>. Acesso em: 14 de setembro de 2018.

POWERS et al. The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 98, p. 1717–1737, 2017.

ROBERTSON, D.; SHRESTHA, D.; WANG, Q. Post-processing rainfall forecasts from numerical weather prediction models for short-term streamflow forecasting. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 9, p. 3587–3603, 2013.

ROGNVALDSSON, O.; RAGNARSSON, L.; STANISLAWSKA, K. WOD-Weather On Demand forecasting system. **EGU General Assembly Conference Abstracts**, v. 19, p. 17891, 2017.

SANTOS dos et al. Avaliação do potencial eólico da região do Vale do Jaguaribe no semiárido cearense utilizando modelagem numérica regional. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3, n. 1, p. 69–74, 2018.

SHIN, H. H.; HONG, S.-Y.; DUDHIA, J. Impacts of the lowest model level height on the performance of planetary boundary layer parameterizations. **Monthly Weather Review**, v. 140, n. 2, p. 664–682, 2012.

SKAMAROCK, W. C. et al. **A Description of the Advanced Research WRF Version 3**. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR. [S.l.: s.n.], 2008. 113 pp.

SMITH, E. N. et al. Wrf model study of the great plains low-level jet: Effects of grid spacing and boundary layer parameterization. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 10, p. 2375–2397, 2018.

STARN, J. **Climate Changed: This Viking City is Reshaping European Electricity Markets - Traders in Aarhus are making millions trading power driven by solar and wind**. 2018. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-11-23/solar-wind-power-trading-energy-denmark-viking-city>>. Acesso em: 23 de novembro de 2018.

WARNER, T. T. **Numerical Weather and Climate Prediction**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 526 p.

WYNGAARD, J. C. Toward numerical modelling in the “Terra Incognita”. **J. Atmos. Sci.**, v. 61, p. 1816–1826, 2004.

ZÄNGL et al. The impact of the PBL scheme and the vertical distribution of model layers on simulations of Alpine Foehn. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 99, n. 1–2, p. 105–128, 2008.

ZHANG, C.; WANG, Y.; HAMILTON, K. Improved representation of boundary layer clouds over the southeast Pacific in ARW-WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme. **Monthly Weather Review**, v. 139, n. 11, p. 3489–3513, 2011.