

TESTES DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES PARAMETRIZAÇÕES CUMULUS DO MODELO WRF PARA MELHORAR AS ESTIMATIVAS DE VENTO

Lucia Iracema Chipponelli Pinto

l.chipponelli@inumet.gub.uy

Instituto Uruguayo de Meteorologia, INUMET

Francisco Jose Lopes de Lima

francisco.lopes.lima@gmail.com

Fernando Ramos Martins

fernando.martins@unifesp.br

Universidade Federal de São Paulo, Campus
Baixada Santista, Instituto do Mar

Enio Bueno Pereira

enio.pereira@inpe.br

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

RESUMO: Os modelos de mesoescala são ferramentas que demandam investimentos relativamente baixos e vem apresentando resultados favoráveis. Porém, também possuem limitações, por exemplo, a dificuldade em representar a turbulência, esta dificuldade está intrinsecamente relacionada à impossibilidade em reproduzir os processos físicos de trocas turbulentas de momento, energia e massa, entre superfície e atmosfera. Visto essas limitações este trabalho apresenta uma série de testes de sensibilidade entre o modelo de mesoescala WRF configurado com diferentes parametrizações físicas e a velocidade do vento medida em estações meteorológicas automáticas do INMET situadas no NEB. O

modelo WRF foi configurado com 3 domínio de resolução 5 x 5 km sobre a região em estudo, a localização desta grades se obteve a partir de uma análise de agrupamento realizada previamente com dados de intensidade do vento de 121 EMA do NEB para o período de 2008 a 2013. Os testes de sensibilidade configuraram um total de 12 experimentos, para os 3 primeiros dias do mês de maio de 2009. Ao analisar os resultados observa-se que independente das parametrizações adotadas, há uma forte tendência a superestimação da intensidade dos ventos pelo modelo WRF para as 13 localidades escolhidas para realizar análise estatística do erro quadrático médio e viés. Como era esperado algumas parametrizações são mais adequadas para um domínio do que para outro, em função do NEB ser influenciado por diferentes sistemas meteorológicos, por exemplo, o ciclo anual da precipitação do litoral leste é diferente ao da região central do NEB.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Eólica, Modelo WRF, Previsão de Vento.

ABSTRACT: Mesoscale models are tools that require relatively low investments and has been showing favorable. However, also have limitations, for example, the difficulty in representing the turbulence, this difficulty is intrinsically related to the impossibility to reproduce the physical processes of turbulent

trade at the moment, energy and mass, between surface and atmosphere. It seen these limitations this paper presents a series of sensitivity tests between the Mesoscale Model WRF configured with different physical parameterizations and the wind speed measured in automatic weather stations of the INMET located in the NEB. The WRF model was configured with domain 3 (grid) of 5 x 5 km resolution over the region under study, the location of this grid if obtained from a Cluster Analysis previously performed with wind intensity data of 121 automatic weather stations of the NEB for the period 2008 to 2013. The configured sensitivity tests a total of 12 experiments, for the first 3 days of the month of May 2009. When reviewing the results it is observed that independent of the parameterizations adopted, there is a strong tendency to overestimation of the intensity of the winds by the WRF model for the 13 localities chosen to perform statistical analysis of mean square error and bias. As it was expected some parameterizations are more suitable for that domain to another, depending on the NEB to be influenced by different weather systems, for example, the annual cycle of precipitation on the east coast is different to that of the central region of the NEB.

KEYWORDS: Wind Power, WRF Model, Wind Forecast.

1 | INTRODUÇÃO

Na atualidade, temas relacionados à degradação do meio ambiente e às mudanças climáticas têm feito parte frequente dos noticiários e de discussões entre cientistas, órgãos governamentais e mundo empresarial. A energia é um ingrediente essencial para o crescimento econômico e o consumo per capita pode ser usado como um indicativo de desenvolvimento social e da qualidade de vida de uma população (Goldemberg, 1998). No entanto, a questão energética é preocupação urgente, já que os processos convencionais de geração de energia elétrica estão entre os principais responsáveis pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Pazheri *et al.*, 2014).

Nesse contexto, fontes de energia que reduzem as emissões de GEE tem apresentado um crescimento significativo em todo o mundo. A energia eólica está entre as fontes de energia renováveis mais usados na atualidade. Silva *et al.* (2013) trazem uma discussão sobre o desenvolvimento das chamadas tecnologias alternativas (renováveis) que refletem diretamente nas novas diretrizes institucionais e supera o paradigma tecnológico que se baseia no aumento da capacidade de expansão das usinas geradoras.

O Brasil é um país privilegiado sob o aspecto energético, pois seu relevo, hidrografia e clima tropical permitem o aproveitamento das diversas fontes renováveis de energia, como a hidráulica, biomassa, eólica e solar (Amarante *et al.*, 2001; Martins *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2013; Schmidt *et al.*, 2016). A Figura 1 mostra a participação das diversas fontes de energia na matriz elétrica brasileira, sendo que as usinas hidrelétricas contribuem com mais da metade da geração de eletricidade.

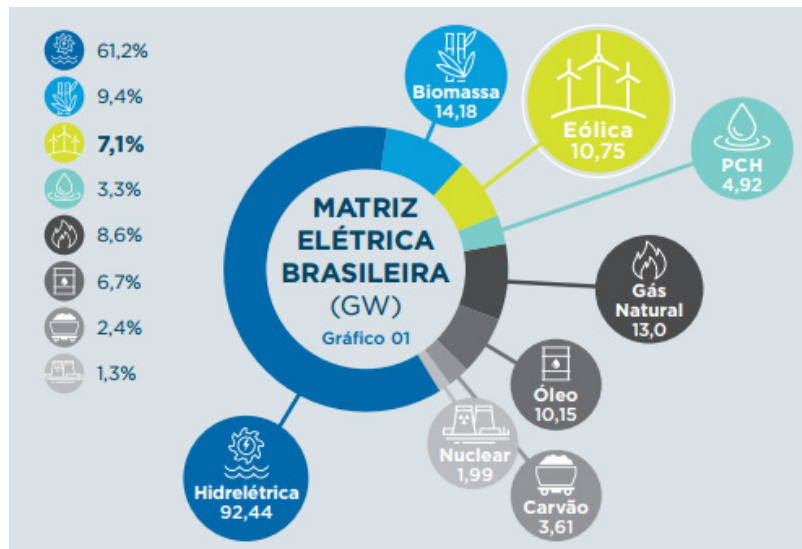


Figura 1 - Matriz elétrica brasileira (em GW) em maio 2016, por fonte de combustível.

Fonte: ABEEOLICA - Boletim de dados (2016).

O ano de 2016 terminou com 10,75 GW de potência eólica instalada, o que representou um crescimento de 23,06% de potência em relação a dezembro de 2015, quando a capacidade instalada era cerca de 9000 MW. Considerando todas as fontes de geração de energia elétrica, em 2016, foram instalados 9,43 GW de potência, cujo crescimento foi liderado principalmente pelas fontes hidrelétrica e eólica, que representaram 60,15% e 21,35%, respectivamente (ABEEOLICA, 2017).

A confiabilidade das previsões do vento num local ou região de interesse é essencial. A aplicação da modelagem atmosférica no prognóstico do tempo é muito importante, e traz uma série de benefícios para as mais diversas atividades econômicas da sociedade: turismo; agricultura; aviação civil; geração de energia, transporte marítimo; planejamento urbano, entre outros (Ramos *et al.*; 2013). Atualmente o mapeamento de áreas com elevado potencial eólico para a exploração comercial é realizada com o uso de modelos atmosféricos que demandam um investimento relativamente baixo (Costa, 2004; Chou *et al.*, 2006; Martins *et al.*, 2008). Os modelos atmosféricos de mesoescala também vêm sendo utilizados para a previsão em curto e médio prazo do vento, imprescindíveis para o planejamento da operação dos parques eólicos e do sistema de distribuição de energia (De Maria *et al.*, 2008; Lyra, 2007; Monteiro *et al.*, 2009; Lima *et al.*, 2012; Siqueira *et al.*, 2012).

O objetivo deste estudo foi verificar se é coerente configurar o modelo meteorológico de mesoescala WRF (*Weather Research and Forecasting*) para o Nordeste do Brasil (NEB). com o mesmo conjunto de parametrizações físicas (camada limite, convecção, microfísica e radiação). Para isso se realizou uma série de testes de sensibilidade entre o modelo WRF configurado com diferentes parametrizações físicas e a velocidade do vento medida em estações meteorológicas automáticas (EMA) do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) situadas no NEB.

2 | METODOLOGIA

Para desenvolver esta pesquisa foi utilizada a versão 3.6 do modelo atmosférico de mesoescala WRF. Trata-se de um modelo não hidrostático de previsão numérica de tempo.

Os testes de sensibilidade permitiram estabelecer a configuração do modelo WRF para de cada uma das regiões homogêneas definidas na análise de agrupamento. Tanto nas simulações dos testes de sensibilidade como nas rodadas de previsão de velocidade do vento foram usados os dados do modelo global GFS (*Global Forecast System*) como condições iniciais. As saídas do modelo atmosférico global GFS do NCEP foram utilizadas como condições iniciais e contorno no período compreendido nos anos de 2009 e 2012. Os dados apresentam resolução espacial de 1° e resolução temporal de 6 horas, e 64 níveis na vertical. O conjunto de dados de tipo de solo e uso do terreno utilizado é disponibilizado pela USGS, dividido em 24 categorias (USGS 24 - *category data*).

Todas as previsões com o WRF foram inicializadas as 18:00 UTC com horizonte de simulação de 72 horas utilizando as primeiras 6 horas como o tempo de ajuste do modelo (*spin up*).

2.1 Parametrizações físicas do WRF

O modelo WRF foi configurado para os testes de sensibilidade de alguns esquemas de parametrizações físicas e aplicadas a cada domínio, domínios estes obtidos através da concordância da AA (Pinto, 2017). No WRF é permitida a escolha de diferentes esquemas parametrizações numéricas para os diferentes processos físicos na atmosfera que ocorrem numa escala espacial menor que a resolução horizontal estabelecida para a execução do modelo. O modelo WRF possui uma configuração padrão (configuração *default*), descrita na Tabela 1, que é utilizada para qualquer execução após sua instalação se o usuário não indicar alterações desejadas, na Tabela 2 estão descritas outras características importantes do modelo WRF.

| Parâmetro ou processo físico | Valor ou parametrização |
|-----------------------------------|---|
| Microfísica (convecção explícita) | WSM3 (Hong <i>et al.</i> , 2004) |
| Radiação onda longa | RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997) |
| Radiação onda curta | Dudhia (Dudhia, 1989) |
| Camada superficial | MM5 similaridade (Paulson, 1970) |
| Processos de superfície | Noah-LSM (Chen; Dudhia, 2001) |
| Camada limite planetária | Yonsei University (Hong <i>et al.</i> , 2006) |
| Convecção rasa e profunda | Kain-Fritsch (Kain; Fritsch, 1990; 1993) |

Tabela 1 - Parametrizações *default* adotada pelo modelo WRF.

| | |
|-------------------------------|--|
| Equações básicas | Totalmente compressíveis |
| Coordenadas verticais | Terrain following para altura de pressão |
| Estrutura horizontal da grade | Arakawa-C |
| Método de integração | 3ª ordem Runge-Kutta |
| Equações | Conservação da massa, momento e escalares usando equação prognostica na forma de fluxo |
| Advecção | Diferenças centradas de 6ª ordem ou 5ª ordem “up wind” |

Tabela 2 - Característica do modelo WRF.

Fonte: Adaptado Carvalho *et al.*, 2013.

Os testes avaliaram a confiabilidade da previsão da velocidade do vento em função de parametrizações para quatro processos físicos: Radiação, Microfísica, Convecção Profunda (*cumulus*) e Camada Limite Planetária (CLP), mantendo a parametrização de camada superficial e esquema de superfície na configuração *default* do WRF. Os esquemas de parametrização da camada superficial e processos de superfície não foram testados, pois, como mencionado anteriormente, influenciam mais os fluxos de calor, umidade da atmosfera e solo.

Na Tabela 3 estão especificadas as diferentes parametrizações utilizadas neste estudo para cada processo físico. Tais esquemas de parametrizações físicas foram escolhidos levando-se em conta a revisão de literatura, onde se verificou quais parametrizações foram adotadas para o WRF, principalmente em estudos para o NEB, por exemplo: Oliveira (2013), Ramos *et al.*, (2013), Lima (2015) e Mattar e Borvaran (2016).

| Parametrizações Físicas | Tipos de Parametrizações | | | |
|------------------------------|--------------------------|----------|--------------|-----------|
| Microfísica | WSM3 | WSM6 | Lin | Thompson |
| Radiação Onda Longa | RRTM | RRTMG | New Goddard | |
| Radiação Onda Curta | Dudhia | RRTMG | New Goddard | |
| Convecção (<i>cumulus</i>) | Kain-Fritsch | Grell-3D | Betts-Miller | Desligada |
| Camada Limite Planetária | YSU | MYJ | MYNN 2,5 | ACM2 |

Tabela 3 - Parametrizações físicas utilizadas para realizar os testes de sensibilidade.

A parametrização de convecção ou parametrização de *cumulus* tem por objetivo representar os fluxos verticais resultantes de correntes ascendentes e descendentes não resolvidas pelo modelo por ocorrerem em escalas menores do espaçamento de grade aplicado a simulação. Esta parametrização corresponde ao conjunto de equações responsáveis pela formação da componente convectiva da precipitação. Nesta pesquisa foram usadas três parametrizações de *cumulus* disponíveis no

WRF - Kain-Fritsch (*default*), Betts-Miller e Grell-3D e ainda a opção com nenhuma parametrização executada. A parametrização de Kain; Fritsch, (1990; 1993) utiliza um modelo de nuvem simples, com correntes de umidade ascendentes e descendentes, incluindo efeitos de interação com a atmosfera e uma microfísica relativamente simples. Grell 3D é um aprimoramento da parametrização de Grell e Devenyi (2002) indicado para uso em simulações com alta resolução espacial. Os autores introduziram uma parametrização de cúmulos por conjunto em que múltiplos esquemas de convecção e variações são rodados simultaneamente para todos os elementos de malha, produzindo uma média dos resultados. A princípio, a média pode ser ponderada a fim de aperfeiçoar a parametrização, mas geralmente pesos iguais são atribuídos. Os esquemas são todos do tipo fluxo de massa, mas com diferentes parâmetros para correntes ascendentes e descendentes de entranhamento e desentranhamento e eficiência de precipitação. O esquema de parametrização convectiva desenvolvido por Betts-Miller é um esquema estático, do tipo ajuste convectivo, no qual a convecção profunda é vista como um processo termodinâmico consistindo em transporte de calor e umidade aos níveis superiores a fim de reduzir ou remover a instabilidade condicional. Neste tipo de esquema, existe um perfil crítico de umidade e temperatura para que o processo convectivo se inicie (Oliveira, 2014).

2.2 Configuração do modelo para previsão da velocidade do vento

Para realizar os testes foram escolhidos apenas os três primeiros dias do mês de maio de 2009. O mês de maio foi escolhido por pertence à estação chuvosa em praticamente todo o NEB (Costa, 2006; Moura *et al.*, 2009). A estação chuvosa foi escolhida devido ao aumento da complexidade dos processos físicos na atmosfera e, dessa forma, torna-se possível conhecer o desempenho do modelo WRF na condição em que tipicamente apresenta menor destreza para a simulação do vento (Ramos *et al.*, 2013).

O domínio mais externo; domínio 1 possui resolução horizontal de 15 km e cobre toda a região NEB. Os domínios de maior resolução (5 km) estão aninhados à grade de menor resolução (15 km). Somente os parâmetros meteorológicos obtidos dos domínios de alta resolução foram de fato utilizados neste estudo (domínios 2, 3 e 4). Na Tabela 4 e Figura 2 WRF.

| | Domínio 1 | Domínio 2 | Domínio 3 | Domínio 4 |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Resolução | 15 km | 5 km | 5 km | 5 km |
| Nº pontos em x | 143 | 340 | 181 | 160 |
| Nº pontos em y | 151 | 166 | 316 | 199 |

Tabela 4 - Especificações dos domínios horizontais usadas nas simulações com o modelo WRF.

É importante mencionar que os resultados dos experimentos numéricos realizados nesta estudo foram validados por meio de comparação com os valores observados em 18 estações meteorológicas automáticas (EMAs) do INMET já validadas e qualificadas conforme procedimento descrito anteriormente. Tais estações foram escolhidas levando-se em conta municípios do NEB que possuem parques de geração eólica ou que pertencem a uma região de potencial eólico elevado. Vale ressaltar que foram utilizadas pelo menos cinco EMAs para validação das estimativas em cada um dos três domínios estabelecidos.

Um ponto importante a ser esclarecido é que ao realizar o cálculo dos desvios (RMSE e ME) com as estações selecionadas ou como todas as estações de cada região homogênea levavam para as mesmas conclusões. E assim, optou-se por realizar os cálculos do ME para todas as estações de cada domínio e para os cálculos do RMSE apenas para os conjuntos selecionados previamente na Tabela 4. No caso do RMSE optou-se por apresentar os cálculos desta medida de erro para o conjunto de 18 estações para o NEB como um todo, já para os cálculos da medida do erro ME verificamos que quando aumentávamos o número de estações meteorológicas na análise dos resultados os ganhos nas previsões aumentava significativamente em todos os experimentos, uma melhor descrição pode ser encontrada em Pinto (2017).

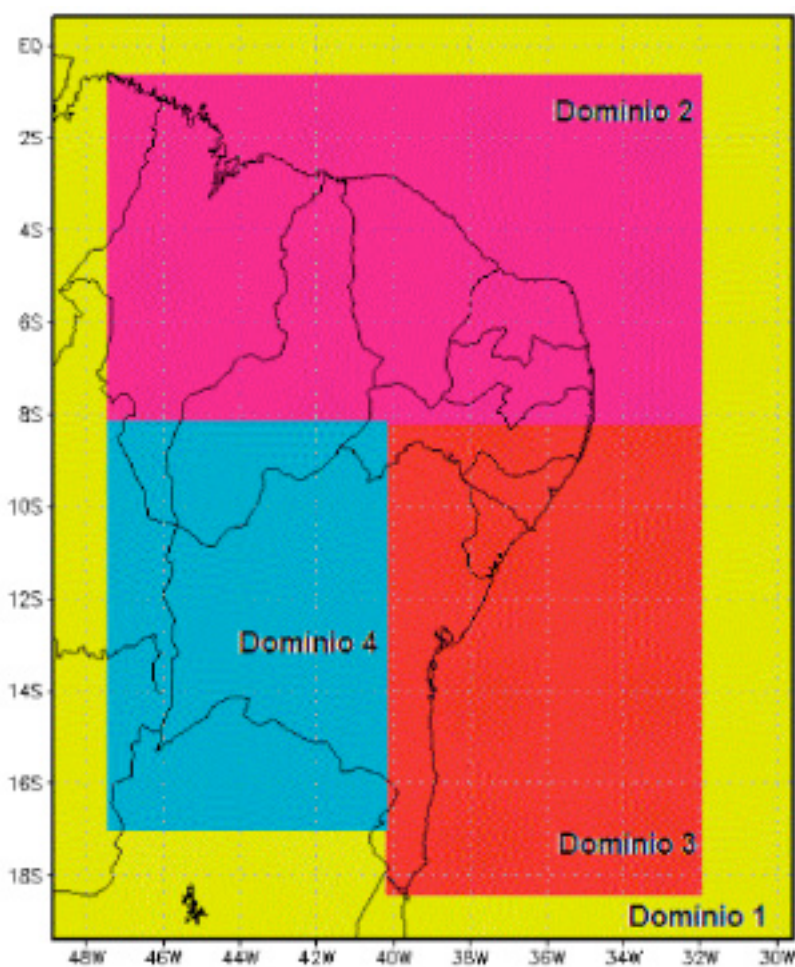


Figura 2 - Grades aninhadas utilizadas nos experimentos com o modelo WRF.

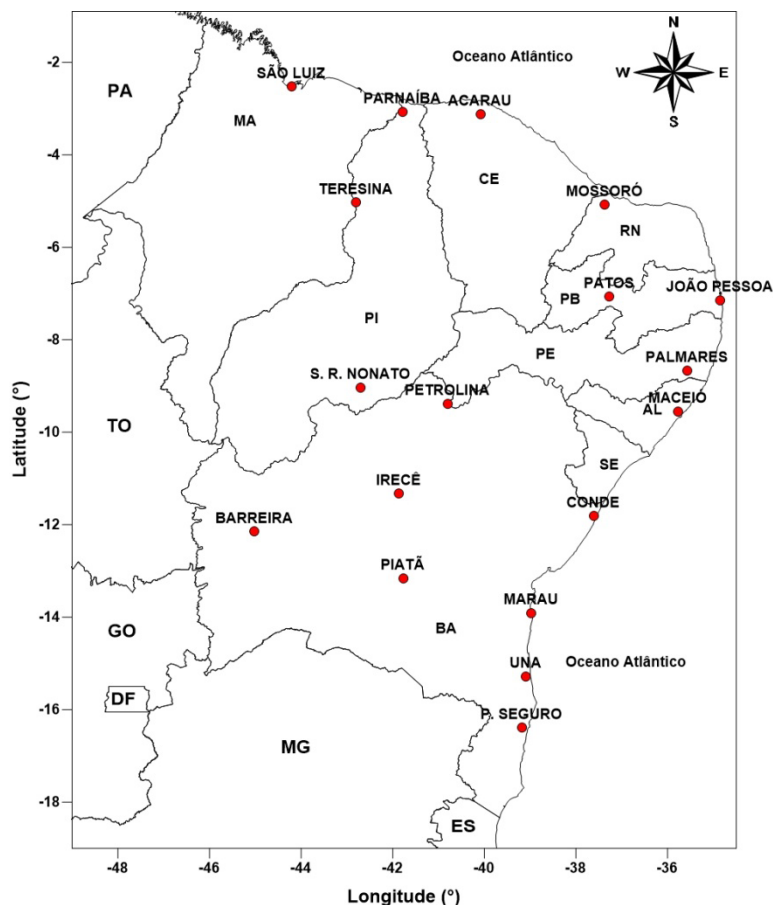


Figura 3 - Localização das EMAs do INMET utilizadas para os testes de sensibilidade.

3 | RESULTADOS

Os testes de sensibilidade utilizaram os índices estatísticos (RMSE e ME) para cada um dos experimentos onde foram testadas as diferentes parametrizações de convecção (cumulus) em cada domínio, Figuras 4a e 4b.

Analisando as Figuras 4a e 4b encontram-se os resultados dos quatro experimentos distintos para convecção, descritas na Tabela 4.2 (ctl, cum2, cum5 e cumD). Pode-se verificar que as estimativas de vento obtidas no experimento cum5, que utiliza o esquema de parametrização Grell 3D, apresentou os menores desvios ME e RMSE em praticamente todos os domínios, sendo apenas no domínio 4 o valor de RMSE mais baixo para o experimento cumD. Porém vale ressaltar que para o índice ME no domínio 4 o melhor resultado também foi do experimento cum5 (Grell 3D), mas para este domínio 4 tantos os valores de RMSE e ME dos experimentos os valores dos índices apresentam diferenças bem pequenas. Desta forma, a parametrização Grell 3D será adotada para os domínios 2 e 3. Em geral, o experimento cum5 forneceu dados com uma superestimação da velocidade do vento (valores positivos de ME) em todas as regiões homogêneas (domínios).

Para finalizar a escolha de qual parametrização de convecção que foi mais apropriada para cada um dos domínios, levou-se em conta as características espaciais (relevo) e do clima e sua sazonalidade nos domínios estabelecidos e tomou-se com base

em outros estudos que utilizaram o modelo WRF para a região NEB. A parametrização Grell 3D é frequentemente adotada (Oliveira, 2013; Ramos *et al.*, 2013; Lima, 2015). Exceção feita ao domínio 4 onde optou-se por não utilizar a parametrização de convecção (cumD) já que este domínio cobre a região mais continental e árida do NEB, onde temos longos períodos de estiagem e conseqüentemente menor formação de nuvens, principalmente convectivas.

Em outra análise, foi avaliada a evolução temporal para cada um dos experimentos nos diferentes domínios (Figura 5). Verificou-se que os valores estimados da velocidade do vento são maiores que os valores médios de cada domínio para todos os experimentos. As simulações de forma geral conseguem acompanhar a variabilidade temporal do vento para estes três dias, as diferenças entre os experimentos são pequenas, porém nos três gráficos (Figura 5a, 5b e 5c) uma pequena melhoria nas simulações do experimento cum5 (Grell 3D) como ressaltado na análise estatística.

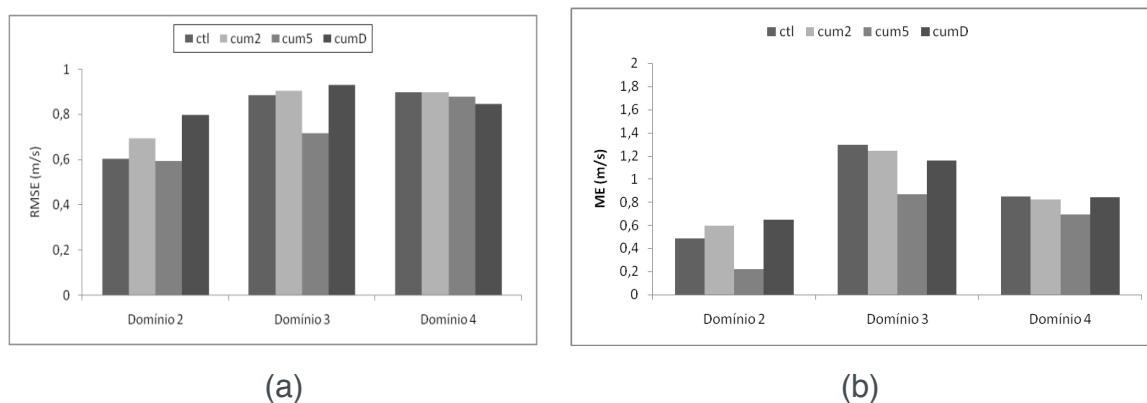
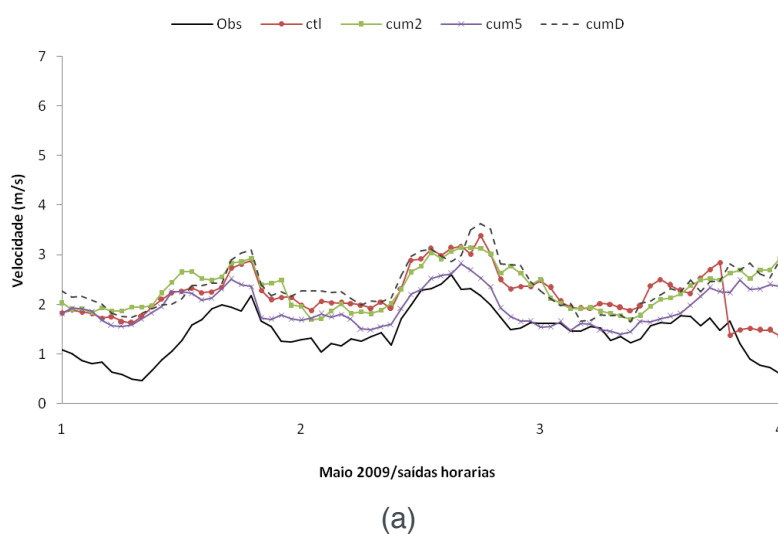


Figura 4 – Índices estatísticos velocidade do vento para os domínios das diferentes parametrizações de convecção (*cumulus*): (a) RMSE e (b) ME.



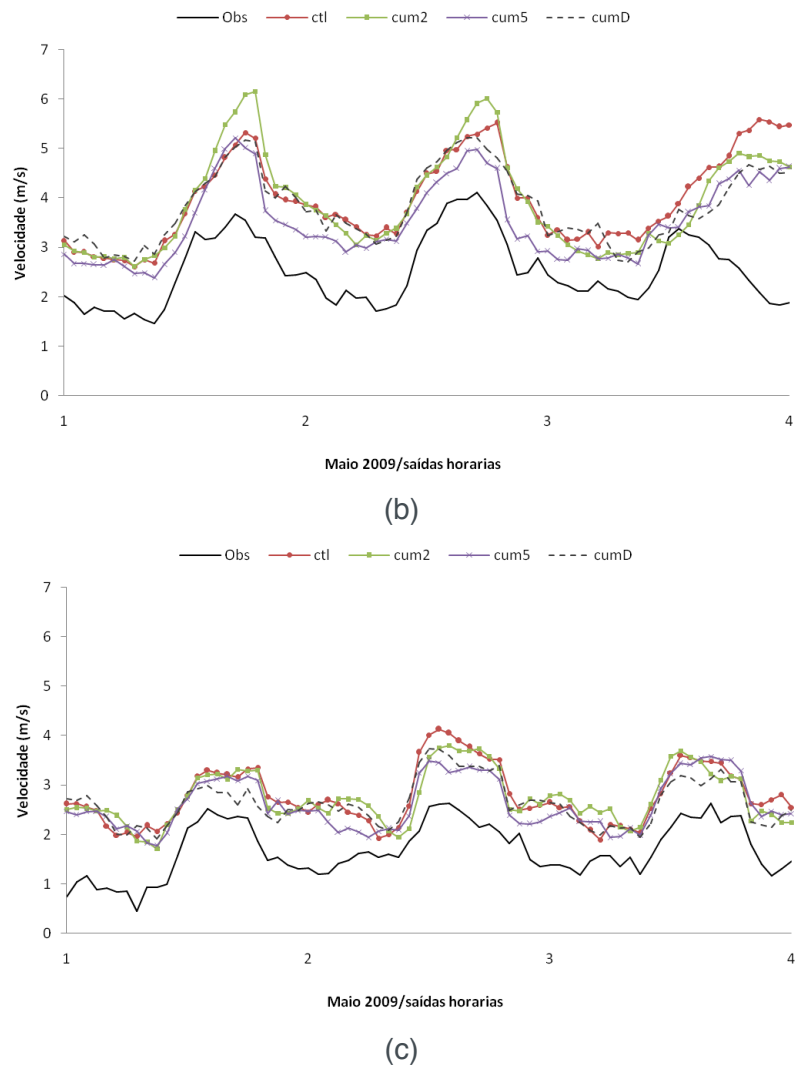


Figura 5 - Evolução temporal da velocidade do vento para o modelo WRF para as diferentes configurações de convecção (cumulus): (a) Domínio 2; (b) Domínio 3 e (c) Domínio 4.

4 | CONCLUSÕES

Por motivos de espaço mostramos apenas os resultados dos testes de sensibilidade realizados para as diferentes configurações de parametrizações de convecção (*cumulus*), porem estes mesmo testes foram realizados para outros esquemas de parametrizações físicas e colocamos os resultados na Tabela 5, porem só iremos ressaltar os resultados encontrados para os esquemas de parametrização de convecção.

Como era esperado, há diferenças entre as parametrizações mais adequadas para cada domínio em razão do NEB ser influenciado por diferentes sistemas meteorológicos e, conseqüentemente, se obtém ciclo anual da precipitação do litoral leste diferente ao da região central do NEB.

| | Convecção | Microfísica | CLP | Radiação |
|-----------|-----------------|-------------|-----------|-------------------|
| Domínio 2 | Grell 3D (cum5) | WSM3 (ctl) | YSU (ctl) | RRTM/Dudhia (ctl) |

| | | | | |
|-----------|------------------|------------|-----------------|-------------------|
| Domínio 3 | Grell 3D (cum5) | WSM3 (ctl) | MYNN 2,5 (pbl5) | RRTM/Dudhia (ctl) |
| Domínio 4 | Desligado (cumD) | WSM3(ctl) | MYNN 2,5 (pbl5) | RRTM/Dudhia (ctl) |

Tabela 5 - Esquemas das principais parametrizações físicas para cada região (domínio) do NEB a ser utilizado no WRF.

Verifica-se que, após os testes de sensibilidade para os diferentes esquemas de parametrização disponíveis no WRF, cada domínio da região NEB ficou com uma configuração diferente, sendo a velocidade do vento em superfície mais sensível aos esquemas de convecção e CLP, para o período analisado. Porém estes resultados podem ser considerados parciais, pois os experimentos configurados alteravam apenas a parametrização em análise e as demais permaneciam fixas com a configuração default de quando se faz a instalação do WRF, o que faz com que os resultados encontrados (configuração) para cada domínio ainda não tenham sido testados. Por exemplo, o domínio 3 não foi realizado o experimento com parametrização de convecção (Grell 3D) e CLP (MYNN2,5).

REFERÊNCIAS

Amarante, O. A. C.; Brower, M.; Zack, J.; de Sá, A. L. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: MME, 2001. 45p.

Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA). **Boletim anual de geração eólica 2016**. 2017.

Carvalho, M. A. V.; Abrunhosa, M. L.; Lopes, J. R. O. **Manual de instalação, compilação e execução do modelo de mesoescala WRF no ICEA (Versão 3.4.1)**. São José dos Campos, 2013. Nota Técnica, 52 p.

Chen, F.; Dudhia, J. **Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity**. Monthly Weather Review, v. 129, p. 569 - 585, 2001.

Chou, C. S.; Paiva Neto, A. C.; Chagas, D. J.; Lyra, A. A.; Pereira, E. B. **Mapeamento eólico para o nordeste**. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 14. (CBMET), Florianópolis, SC. Proceedings... Rio de Janeiro: SBMet, 2006. CD-ROM; Papel. (INPE-14550-PRE/9580).

Costa, A. O.; Oliveira, L. B.; Lins, M. P. E.; Silva, A. C. M.; Araújo, M. S. M.; Pereira Jr., A. O.; Rosa, L. P. **Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.27, p. 407 - 412, 2013.

Costa, P. A. Da S. **Atlas do potencial eólico para Portugal continental**. 2004. 144 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) - Universidade de Lisboa, Lisboa, 2004.

Costa, R. S. **Avaliação do desempenho do modelo de mesoescala MM5 na simulação de eventos de precipitação extrema no estado de Alagoas**. 2006. 184 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.

De Maria, P. H. S.; 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, n.4, p. 477 - 489, 2008.

Dudhia, J. **Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model.** Journal of the Atmospheric Sciences, v. 46, n. 20, p. 3077 - 3107, 1989.

Goldemberg, J. J. Energia e desenvolvimento. Estudos Avançados, v. 12, n. 33, p. 7–15, 1998.

Grell, G. A., Devenyi, D. **A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques.** Geophysical Research Letters, v. 29, n. 14, 1693, 2002.

Hong, S.Y.; Dudhia, J.; Chen, S. H. **A revised approach to ice-microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation.** Monthly Weather Review, v. 132, n. 1, p. 103 - 120, 2004.

Hong, S.Y.; Noh, Y.; Dudhia, J. **A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes.** Monthly Weather Review, v.134, p. 218 - 234, 2006.

Kain, J. S.; Fritsch, J. M. **A one-dimensional entraining detraining plume model and its application in convective parameterization.** Journal of the Atmospheric Science, v. 47, n. 23, p. 2784 - 2802, 1990.

Kain, J. S.; Fritsch, J. M. **Chapter 16 - Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus in numerical models.** Boston: American Meteorological Society, Meteorological Monographs, v. 44, n. 46, p. 165 - 177; 1993.

Lima, F. J. L.; Cavalcanti, E. P.; Souza, E. P.; Silva, E. M. **Evaluation of the wind power in the state of Paraíba using the mesoscale atmospheric model brazilian developments on the regional atmospheric modelling system.** Renewable Energy, v. 2012, p. 16, 2012.

Lyra, A. A. **Testes de sensibilidade e avaliação das previsões de vento do modelo ETA para região nordeste. 2007.** 106 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Cachoeira Paulista, 2007.

Martins, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 1, p. 1 - 13, 2008.

Mattar, C.; Borvarán, D. **Offshore wind power simulation by using WRF in the central coast of Chile.** Renewable Energy, v. 94, p. 22 - 31, 2016.

Mlawer, E. J.; Taubman, S. J.; Brown, P. D.; Iacono, M. J.; Clough, S. A. **Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave.** Journal of Geophysical Research, v.102, n. D14, p. 16663 - 16682, 1997.

Monteiro, C.; Bessa, R.; Miranda, V.; Botterud, A.; Wang, J.; Conzelmann, G. **Wind Power forecasting: State-of-the-art 2009.** Argonne: Argonne National Laboratory, 216 p., 2009.

Moura, G. B. De A.; Aragão, J. O. R. De; Melo, J. S. P. De; Silva, A. P. N. Da; Giongo, P. R.; Lacerda, F. F. **Relação entre a precipitação do leste do nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 4, p. 462 - 469, 2009.

Oliveira, E. M. G. **Parametrizações convectivas no modelo WRF e sua relação com a precipitação durante ciclogêneses no sudeste da América do Sul.** 2014. 95 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

Oliveira, S. S. De. **Análise do potencial eólico do estado da Paraíba utilizando modelos de mesoescala.** 2013, 129 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

Oliveira, S. S.; SOUZA, E. P. **Análise de modelos de mesoescala para caracterização do potencial eólico do estado da Paraíba.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, n.2, p. 277 - 291, 2017.

Paulson, C. A. **The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer.** Journal of Applied Meteorology, v. 9, p. 857 - 861, 1970.

Pazheri, F. R.; Othman, M. F.; Malik, N. H. **A review on global renewable electricity scenario.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 31, p. 835-845, 2014.

Pinto, L. I. C. **Avaliação do modelo WRF para aplicação em previsão de recurso eólico no nordeste brasileiro.** 2017, 231 p. Tese (Doutorado em Ciências do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos, 2017.

Ramos, D. N. S.; Lyra, R. F. DA F.; Silva Jr., R. S. **Previsão do vento utilizando o modelo atmosférico WRF para o estado de Alagoas.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 2, p. 163 - 172, 2013.

Schmidt, J., Cancelli, R., Pereira Jr., A. O. **An optimal mix of Schmidt PV, wind and hydro power for a low-carbon electricity supply in Brazil.** Renewable Energy, v. 85, p. 137 - 147, 2016.

Silva, N. F.; Rosa, L. P.; Freitas, M. A. V.; Pereira, M. G. **Wind energy in Brazil: From the power sector's expansion crisis model to the favorable environment.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 22, p. 686 - 697, 2013.

Siqueira, J. M. S.; Cerqueira, S. A. A. G.; Leal Jr, J. B. V.; Pellegrini, C. C. **O uso de alta resolução numérica horizontal e vertical na avaliação do potencial eólico do norte de Minas Gerais.** In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 17., 2012, Gramado. Anais... Rio de Janeiro: SBMet, 2012.