

INTERCOMPARAÇÃO DE PARAMETRIZAÇÕES DE TURBULÊNCIA EM SIMULAÇÕES DE VENTOS EM ALTA RESOLUÇÃO NO LITORAL CEARENSE

PAULO HENRIQUE SANTIAGO DE MARIA¹, ALEXANDRE ARAÚJO COSTA²

¹Físico, Bolsista, Departamento de Meteorologia, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, FUNCEME, Fortaleza – CE,
Fone: (0xx85) 3101 1126, paulohsm@gmail.com

²Físico, Gerente, Departamento de Meteorologia, Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, FUNCEME, Fortaleza – CE

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju – SE

RESUMO: Para este trabalho é desenvolvida uma metodologia de intercomparação estatística baseada em índices e medidas de erro amplamente utilizados em estudos meteorológicos e avaliações de modelos atmosféricos. Tal metodologia é aplicada para escolha da melhor opção de parametrização de turbulência em simulações de ventos no litoral cearense em alta resolução espacial para fins de previsão de energia eólica.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem atmosférica; intercomparação estatística; previsão de ventos.

TURBULENCE PARAMETERIZATION INTERCOMPARISON IN HIGH RESOLUTION WIND SIMULATIONS OVER THE COAST OF CEARÁ.

ABSTRACT: In this work a statistical intercomparison methodology was developed based on a combination of accuracy indices and error estimates widely used in meteorological studies and in the evaluation of atmospheric models. Such methodology is used to choose the best turbulence parameterization in high resolution wind simulations over the coast of Ceará State, Northeast Brazil, for wind energy forecast purposes.

KEYWORDS: atmosphere modeling; statistical intercomparison; wind prediction.

INTRODUÇÃO: É reconhecido o elevado potencial eólico da região Nordeste do Brasil, em especial das faixas litorâneas dos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará, conforme já exposto por Amarante (2001a). Para utilização otimizada destes recursos, são necessários estudos, como o já referenciado, e desenvolvimento de técnicas adequadas, que estejam ao alcance das instituições que possam empregá-los, culminando em benefícios à sociedade. Um exemplo é o Atlas do Potencial Eólico Cearense (AMARANTE, 2001b). A previsão de ventos é outra prática que coloca a energia eólica numa posição de destaque em relação às demais alternativas pela amenização da principal de suas desvantagens: incapacidade do homem em controlar o vento (GIEBEL et al., 2003; LANGE et al., 2002; SÁNCHEZ et al., 2002; JORGENSEN et al., 2002). Neste contexto, a modelagem atmosférica de mesoescala se insere como uma conveniente solução, por demandar investimento relativamente baixo e ter se revelado nas últimas décadas uma ferramenta confiável. Para que possa ser devidamente empregada, faz-se necessária a execução de testes de sensibilidade às opções oferecidas pelo modelo, que permitem, mesmo de forma empírica, uma escolha criteriosa das opções mais adequadas.

das. Neste ponto a estatística tem um papel fundamental, possibilitando que se determine quantitativamente a melhor dentre as opções testadas. Este trabalho tem como proposta apresentar os resultados da metodologia estatística aplicada, verificando sua funcionalidade, para escolha da melhor dentre as opções de parametrizações de turbulência – fator de grande influência na representação dos campos de ventos – com o intuito de calibração do modelo como ferramenta de previsão para geração de energia eólica sobre o litoral do Ceará.

MATERIAL E MÉTODOS: Neste trabalho é utilizada a versão 6 do modelo CSU RAMS (PIELKE et al., 1992; COTTON et al., 2003), para os 4 primeiros dias do ano de 2005 sobre duas regiões litorâneas cearenses. O período simulado tem início em 01-JAN-2005 0000Z e término em 05-JAN-2005 0600Z, correspondente a uma fração do período de transição do regime local de ventos. O modelo é configurado com 4 grades em 2 níveis de aninhamento sucessivos, cobrindo respectivamente todo o Nordeste brasileiro (exceto a parte mais ao sul do estado da Bahia) e uma porção do oceano Atlântico, a metade Norte do Ceará incluindo toda sua faixa litorânea, o litoral no entorno da capital Fortaleza, com aproximadamente 170km de extensão e, finalmente, uma faixa litorânea na região norte do estado com aproximadamente 150km de extensão. Na Tabela 1 são dados detalhes sobre as grades.

Tabela 1 – Especificações das grades horizontais usadas nas simulações, onde N_x , D_x , C_x e L_x são, respectivamente, o número de pontos, a distância entre os pontos, a coordenada do centro da grade e a extensão do domínio na direção longitudinal, N_y , D_y , C_y e L_y são as mesmas definições para a direção meridional e D_t corresponde ao passo de tempo pra aquela grade.

Grade	N_x	N_y	D_t	D_x	D_y	C_x	C_y	L_x	L_y
1	100	100	30s	20km	20km	-5,67	-40,33	2000km	2000km
2	114	82	10s	5km	5km	-3,55	-39,64	570km	410km
3	122	122	2s	1km	1km	-3,87	-38,59	122km	122km
4	152	67	2s	1km	1km	-2,98	-40,56	152km	67km

Para todas as simulações é usada uma grade vertical telescópica de 32 pontos, espaçamento inicial de 60m, espaçamento máximo de 1km e razão de expansão valendo 1,2893, de modo que o topo da atmosfera modelada encontra-se em aproximadamente 22668m. Dados de reanálise do modelo global mantido pelo CPTEC (www.cptec.inpe.br) para determinação das condições de fronteira espaço-temporal com escala de tempo de relaxamento newtoniano em 12h no centro e, para caracterização do solo e superfície, são usados dados de NDVI, topografia, TSM e tipo de superfície, fornecidos pelo site de apoio ao modelo (atmet.com). Radiação resolvida com o esquema de Harrington (1997) a cada 20min simulados, para ondas curtas e longas e com variação longitudinal ativada. A microfísica de nuvens é parametrizada com 5 categorias de gelo – opção fornecida no modelo como 3º. nível de complexidade, enquanto a convecção é resolvida com o esquema de Kuo chamado a cada 20min simulados. Para interação com solo é usado o sub-modelo LEAF2 (Walko et al., 2000) com 11 camadas.

Para intercomparação das parametrizações de turbulência, são testadas 4 das 6 opções fornecidas pelo modelo, correspondentes aos esquemas propostos por Mellor & Yamada (1974), Smagorinsky (1963) na versão anisotrópica, Deardorff (1980) e Castelli (2001) *E-I*.

Cada parâmetro tem suas opções intercomparadas através de um método que envolve uma série de índices estatísticos aos quais são atribuídos escores que, por sua vez, têm pesos diferentes de acordo com sua relevância. Os índices usados na avaliação são o Viés estatístico, o Erro Absoluto Médio, o Erro Quadrático Médio, a Razão entre os Desvios padrão modelado e observado, o Erro Absoluto Médio dos desvios, o Erro Quadrático Médio dos desvios, o Índice de Concordância e o Índice de Correlação, assim como explicados por Weber et al. (1982), Buckley et al. (2004), Pielke (2001), Keyser e Anthes (1977), Jolliffe e Stephenson (2003), Steyn e Mckendry (1988), Willmott (1982). Para cada índice em que uma opção se sai me-

Ihor são atribuídos os escores referentes à este índice, de forme acumulativa, obedecendo aos valores da Tabela 2.

Tabela 2 – Escores atribuídos a cada grandeza estatística.

Índice	Símbolo	Escores
Viés	b	1
Erro Absoluto Médio	A	1
Erro Quadrático Médio	E	1
Razão entre Desvios Padrão	R_σ	1
Erro Absoluto Médio dos Desvios	A_d	2
Erro Quadrático Médio dos desvios	E_d	2
Índice de Concordância	I_c	3
Correlação	r	4

O emprego deste método de avaliação estatística demanda a coleta prévia de dados observacionais. Este trabalho se utiliza dos resultados produzidos por uma campanha coletas de séries temporais de vento promovida pelo Governo do Estado do Ceará em duas localidades litorâneas para aferição de seus potenciais eólicos: Torres Anemométricas (TAs) de Paracuru e Camocim. Nesta campanha as componentes do vento foram medidas a cada 2s com registros de médias e desvios padrão a cada 10min, em 3 níveis verticais – 60m, 40m e 20m acima do nível do solo – para a velocidade e 2 níveis – 60m e 40m – para a direção (CONSÓRCIO BMC, 2004a,b).

RESULTADOS: Os resultados são apresentados na forma de séries temporais de velocidade e direção do vento para as duas localidades e os resultados do, e tabelas com resultados da avaliação estatística do modelo em relação às observações. São omitidos os resultados obtidos com as parametrizações de Deardorff (1980) e Castelli (2001) por apresentarem elevado ruído padrões espaciais e temporais de 2Δ , o que caracteriza instabilidade numérica, muito provavelmente pela má utilização destas opções.

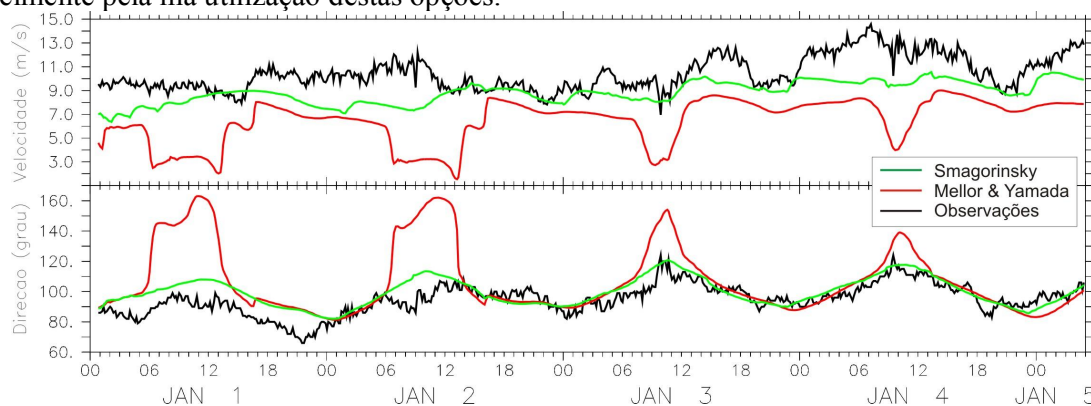


Figura 1 – Intercomparação das opções de parametrização de turbulência para velocidade (Painel superior) e direção (painel inferior) do vento na localidade de Paracuru. Para a velocidade do vento na localidade de Paracuru (Figura 1), o modelo parametrizado com esquema de Mellor & Yamada resulta em ciclos diários bem pronunciados, em contraposição aos resultados obtidos com parametrização de Smagorinsky e com as observações. A direção é representada com picos mais agudos pela primeira parametrização sempre entre 0600Z e 1200Z de cada dia do período simulado, enquanto nos demais intervalos de tempo há muita semelhança entre as opções testadas.

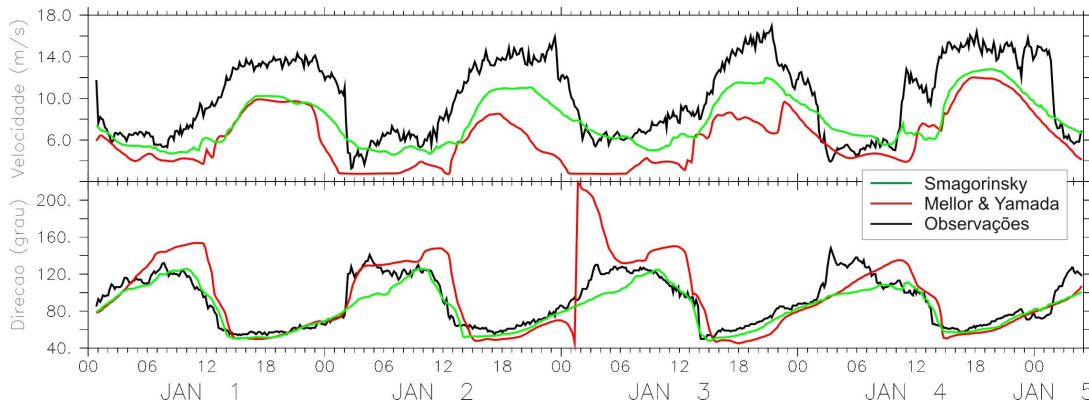


Figura 2 – Intercomparação das opções de parametrização de turbulência para velocidade (painel superior) e direção (painel inferior) do vento na localidade de Camocim.

Na localidade de Camocim (Figura 2), ambas as parametrizações permitiram que o modelo detectasse os ciclos diários de velocidade, mesmo que sem muita precisão. De maneira geral, com o esquema de Mellor & Yamada o modelo estima valores mais baixos que com Smagorinsky, permitindo notar uma maior semelhança desta opção com as observações. Para a direção, em certos momentos, vê-se bastante semelhança nos resultados produzidos pelo modelo. Nos demais momentos, percebe-se que a segunda opção apresenta resultados mais próximos do observado.

Tabela 3 - Intercomparação de parametrizações de turbulência. Velocidade e direção do vento observado e modelado nas localidades de Paracuru e Camocim, com três opções diferentes de resolução horizontal. Estimativas estatísticas de Viés (b), Erro Absoluto Médio (A), Erro Quadrático Médio (E), Desvio Padrão modelado (σ_m), Razão entre desvios padrão modelado e observado (R_σ), Erro Absoluto Médio dos desvios (A_d), Erro Quadrático Médio dos desvios (E_d), Índice de Concordância (I_c), Correlação (r), e escores acumulados por opção avaliada.

		Modelo	b	A	E	σ_m	R_σ	A_d	E_d	I_c	r	Esc.
Paracuru	Vel	M&Y	-3,97	3,97	4,41	1,87	0,77	1,49	1,87	0,18	0,38	1
		SMA	-1,62	1,71	2,03	0,93	1,52	0,99	1,20	0,42	0,54	14
	Dir	M&Y	12,15	14,72	23,40	22,26	0,44	14,92	19,99	0,10	0,44	0
		SMA	4,70	6,64	8,39	9,13	1,08	5,61	6,93	0,59	0,74	15
Camocim	Vel	M&Y	-4,08	4,10	4,69	2,60	1,41	1,81	2,31	0,57	0,78	1
		SMA	-2,20	2,55	2,98	2,38	1,54	1,64	2,01	0,73	0,86	14
	Dir	M&Y	4,98	17,33	24,93	39,30	0,68	18,00	24,43	0,68	0,79	1
		SMA	-6,87	9,50	13,40	22,75	1,17	8,14	11,50	0,88	0,90	14

A intercomparação estatística das opções de parametrizações de turbulência para as localidades de Paracuru e Camocim é mostrada na Tabela 3. O modelo equipado com parametrização de Smagorinsky mostra-se quantitativamente mais parecido com as observações ao obter melhores índices e, conseqüentemente, mais escores. Isso confirma o que já se esperava por meio da análise dos gráficos das Figuras 1 e 2.

CONCLUSÕES: Os testes de sensibilidade mostraram bons resultados com qualquer das opções e, como se pode ver pelas séries temporais, especialmente com o esquema proposto por Smagorinsky (1963). Além dos gráficos se mostrarem suficientes nesta decisão, pode-se verificar a consistência da metodologia estatística ao atribuir mais escores à opção que se apresenta como melhor. Ao mesmo tempo, a metodologia estatística mostrou-se consistente ao atribuir mais escores à opção que se mostrava melhor já no gráfico da série temporal. A ex-

pectativa é que este procedimento se mostre particularmente útil em casos onde não é possível, por meios apenas visuais, a determinação dos melhores resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- AMARANTE, O. et al. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, Brasília, 2001.
- AMARANTE, O. A. C. Estado do Ceará: Atlas do Potencial Eólico. Ceará, Brasil, 2001.
- BUCKLEY, R., WEBER, A., WEBER, J. Statistical comparison of Regional Atmospheric Modeling System forecasts with observations. *Meteorological Applications*, Cambridge Univ. Press 11:67-82, 2004.
- CASTELLI, S. T., FERRERO, E., ANFOSSI, D. Turbulence closure in neutral boundary layers over complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 100, n. 3, 2001.
- CONSÓRCIO BMC. Relatório Técnico: Projeto Paracuru - Instalação e comissionamento de Torre Anemométrica No. 8550. [S.l.], 2004
- CONSÓRCIO BMC. Relatório Técnico: Projeto Camocim - Instalação e comissionamento de Torre Anemométrica No. 8551. [S.l.], 2004.
- COTTON, W.R., PIELKE, R.A., WALKO, R.L., LISTON, G.E., TREMBACK, C.J., JIANG, H., MCCANNELLY, R.L., HARRINGTON, J.Y., NICHOLLS, M.E., CARRIO, G.G., MCFADDEN, J.P. RAMS 2001: current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82: 5–29, 2003.
- GIEBEL, G., LANDBERG, L., KARINIOTAKIS, G., BROWNSWORD, R. State-of-the-Art on methods and software tools for short-term prediction of Wind Energy production. *European Wind Energy Conference & Exhibition – EWEC 2003*, Madrid, Spain, 2003.
- HARRINGTON, J. Y. The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season Arctic stratus. 1997. 289 f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Department of Atmospheric Sciences, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, 1997.
- JORGENSEN, J. U., MOEHRLIN, C., MCKEOGH, E. A new generation operational On- and Offshore numerical prediction system. *The World Wind Energy Conference and Exhibition 2002*, Berlin, Germany, 2002.
- LANGE, M., FOCKEN, U., HEINEMANN, D. PREVIENTO - Regional wind power prediction with risk control. *The World Wind Energy Conference and Exhibition 2002*, Berlin, Germany, 2002.
- MELLOR, G. L., YAMADA, T. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of Atmospheric Science*, 31: 1791–1806, 1974.
- PIELKE, R.A., COTTON, W.R., WALKO, R.L., TREMBACK, C.J., LYONS, W.A., GRASSO, L.D., NICHOLLS, M.E., MORAN, M.D., WESLEY, D.A., LEE, T.J., COPELAND, J.H. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 49: 69–91, 1992.
- SÁNCHEZ, I., USAOLA, J., RAVELO, O., VELASCO, C., DOMÍNGUEZ, J., LOBO, M. G. SI-PREÓLICO - A Wind Power prediction system based on flexible combination of dynamic models. application to the spanish system. *The World Wind Energy Conference and Exhibition 2002*, Berlin, Germany, 2002.
- WALKO, R. L., BAND, L. E., BARON, J., KITTEL, T. G. F., LAMMERS, R., LEE, T. J., OJIMA, D., PIELKE, R. A. Sr, TAYLOR, C., TAGUE, C., TREMBACK, C. J., VIDALE, P. J. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 39: 931–944, 2000.