

Energia Solar e Eólica 2

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica 2

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Karine de Lima

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E56 Energia solar e eólica 2 [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 2)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-067-4

DOI 10.22533/at.ed.674192201

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia eólica. 3. Energia solar. I. Abdala, Paulo Jayme Pereira.

CDD 621.042

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

As chamadas energias renováveis, também conhecidas como energias alternativas ou ainda energias limpas são três denominações possíveis para qualquer forma de energia obtida por meio de fontes renováveis, e que não produzem grandes impactos ambientais negativos. Atualmente, com a grande preocupação mundial em compensar as emissões de CO₂, o consumo deste tipo de energia tem sido o foco de governos e empresas em todo globo.

Neste sentido, o Brasil possui uma matriz energética bastante limpa, onde predomina o uso de hidrelétricas, apesar do crescimento do uso de termelétricas, as quais são abastecidas por combustível fóssil. No Brasil, o setor energético é responsável por grande parte das emissões de CO₂, ficando atrás somente do setor agrícola que reapresenta a maior contribuição para o efeito estufa brasileiro.

A energia proveniente do sol é a alternativa renovável mais promissora para o futuro e, por este motivo tem recebido maior atenção e também mais investimentos. A radiação solar gratuita fornecida pelo sol pode ser captada por placas fotovoltaicas e ser posteriormente convertida em energia elétrica. Esses painéis usualmente estão localizados em construções, como indústrias e casas, o que proporciona impactos ambientais mínimos. Esse tipo de energia é uma das mais fáceis de ser implantada em larga escala. Além de beneficiar os consumidores com a redução na conta de energia elétrica reduzem as emissões de CO₂.

Com relação à energia eólica, o Brasil faz parte do grupo dos dez países mais importantes do mundo para investimentos no setor. As emissões de CO₂ requeridas para operar esta fonte de energia alternativa são extremamente baixas e é uma opção atrativa para o país não ser dependente apenas das hidrelétricas. Os investimentos em parques eólicos vem se tornando uma ótima opção para neutralização de carbono emitidos por empresas, indústrias e etc.

Neste contexto, este EBOOK apresenta uma importante contribuição no sentido de atualizar os profissionais que trabalham no setor energético com informações extremamente relevantes. Ele está dividido em dois volumes contendo artigos práticos e teóricos importantes para quem deseja informações sobre o estado da arte acerca do assunto.

Paulo Jayme Pereira Abdala

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	10
ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A INSTALAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NOS CAMPI IFG ITUMBIARA E URUAÇU	
Sergio Batista da Silva Olívio Carlos Nascimento Souto Fernando Nunes Belchior Ghunter Paulo Viajante Elias Barbosa Macedo Vera Ferreira Souza	
DOI 10.22533/at.ed.6741922011	
CAPÍTULO 2	24
ESTUDO DE VIABILIDADE PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA FOTOVOLTAICA INTEGRADA EM UM SHOPPING CENTER DE FORTALEZA - CE	
Sofia da Costa Barreto Paulo Cesar Marques de Carvalho	
DOI 10.22533/at.ed.6741922012	
CAPÍTULO 3	41
ESTUDO DO COMPORTAMENTO E QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA DO ABACAXI SECADO EM SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Raphaela Soares da Silva Camelo Juliana Lobo Paes Milena Araujo Silva Madelon Rodrigues Sá Braz Dhiego Santos Cordeiro da Silva Camila Lucas Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.6741922013	
CAPÍTULO 4	54
ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS SOBRE O CUINSE ₂ E SUA APLICAÇÃO EM DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS	
Yuri Hamayano Lopes Ribeiro Denis Gilbert Francis David Marcus Vinícius Santos da Silva Jailton Souza de Almeida	
DOI 10.22533/at.ed.6741922014	
CAPÍTULO 5	66
EXPERIÊNCIA DE CURSO GRATUITO DE INSTALADOR DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE OFERECIDO PELO IFTO CAMPUS PALMAS	
Claudio Silva dos Santos Abimael Ribeiro Martins Adail Pereira Carvalho Brunno Henrique Brito	
DOI 10.22533/at.ed.6741922015	
CAPÍTULO 6	78
IMPACTO DA LEI PALMAS SOLAR NA ANÁLISE FINANCEIRA DA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO	
Isamara Quirino de Castro Carlos Brunno Henrique Brito	

Felipe Tozzi Bittencourt
DOI 10.22533/at.ed.6741922016

CAPÍTULO 7 91

IMPACTOS DOS INCENTIVOS DOS GOVERNOS DO ESTADO E DO MUNICÍPIO NA MICROGERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA EM PALMAS - TO

Allan Carlos do Nascimento Silva
Brunno Henrique Brito

DOI 10.22533/at.ed.6741922017

CAPÍTULO 8 104

IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE DOIS GERADORES FOTOVOLTAICOS CONECTADOS DIRETAMENTE NO BARRAMENTO C.C. DO LABORATÓRIO DE SISTEMAS HÍBRIDOS/MINIRREDES (GEDAE/UFPA)

Jorge Augusto Leal Corrêa
Claudomiro Fábio de Oliveira Barbosa
Marcos André Barros Galhardo
João Paulo Alves Veríssimo
Israel Hidai Lobato Lemos
Edinaldo José da Silva Pereira
João Tavares Pinho

DOI 10.22533/at.ed.6741922018

CAPÍTULO 9 121

INFLUÊNCIA DA SUJEIRA NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Elismar Ramos Barbosa
Merlim dos Santos Ferreira de Faria
Fabio de Brito Gontijo

DOI 10.22533/at.ed.6741922019

CAPÍTULO 10 132

INFLUÊNCIA DO ESPECTRO SOLAR EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SOB CÉU LIMPO, CÉU PARCIALMENTE NUBLADO E CÉU NUBLADO

Guilherme Marques Neves
Waldeir Amaral Vilela
Enio Bueno Pereira
Luiz Angelo Berni

DOI 10.22533/at.ed.67419220110

CAPÍTULO 11 146

INTENSIFICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM COLETOR SOLAR DE PLACA PLANA ATRAVÉS DE GERADOR DE VÓRTICE LONGITUDINAL DO TIPO DELTA

Felipe Augusto Santos da Silva
Leandro Oliveira Salviano

DOI 10.22533/at.ed.67419220111

CAPÍTULO 12 161

METODOLOGIA COMPUTACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

Marcus Vinícius Contes Calça
Matheus Rodrigues Raniero
Alexandre Dal Pai
Carlos Roberto Pereira Padovani
Domingos Mario Zeca Fernando

CAPÍTULO 13 174

PROJETO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA ABRIGOS DE PONTOS DE ÔNIBUS NA AV. ALMIRANTE BARROSO – BELÉM/PA

Ana Laura Pinheiro Ruivo Monteiro
Edinaldo José da Silva Pereira
Everton Leandro Santos Amaral
Ítalo de Sousa
Magda Tayane Abraão de Brito

DOI 10.22533/at.ed.67419220113

CAPÍTULO 14 191

PROJETO PRELIMINAR DE UM RADIÔMETRO ABSOLUTO PARA MEDIR A IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL

Franciele Carlesso
Jenny Marcela Rodriguez Gomez
Luiz Angelo Berni
Graziela da Silva Savonov
Luis Eduardo Antunes Vieira
Waldeir Amaral Vilela
Edson Luiz de Miranda

DOI 10.22533/at.ed.67419220114

CAPÍTULO 15 200

PROJETO, DESENVOLVIMENTO E TESTE DE FOGÕES SOLARES

Diego Lopes Coriolano
Erico Diogo Lima da Silva
Iraí Tadeu Ferreira de Resende
Vanina Cardoso Viana Andrade
Denilson Pereira Gonçalves
Renan Tavares Figueiredo
Odélsia Leonor Sanchez de Alsina

DOI 10.22533/at.ed.67419220115

CAPÍTULO 16 213

PROPOSTA DE RETROFIT NO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO E ESTUDO DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM UM DOS BLOCOS DA UTFPR EM CURITIBA

Larissa Barbosa Krasnhak
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.67419220116

CAPÍTULO 17 229

PROPOSTA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA OTIMIZAÇÃO DO GASTO PÚBLICO COM O CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DE UMA UNIDADE DE ENSINO FEDERAL IMPLANTADA NA REGIÃO DO VALE DO SÃO FRANCISCO

Adriano Moraes da Silva
Rebeca Lorena Santos Maia e Silva
Danielle Bandeira de Mello Delgado

DOI 10.22533/at.ed.67419220117

CAPÍTULO 18 246

PLATAFORMA PORTÁTIL E DE BAIXO CUSTO PARA A AQUISIÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

DE CÉLULAS SOLARES FOTOVOLTAICAS

Júlio César Madureira Silva
Augusto César da Silva Bezerra
Claudinei Rezende Calado
Ana Luiza F. Maia
Amanda Ribeiro Amorim

DOI 10.22533/at.ed.67419220118

CAPÍTULO 19 255

SISTEMA DE AQUISIÇÃO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM ARMAZENAMENTO DE DADOS EM SERVIDOR REMOTO UTILIZANDO PLATAFORMAS OPEN SOURCE RASPBERRY PI E ARDUINO

José Ilton de Oliveira Filho
Wilk Coelho Maia

DOI 10.22533/at.ed.67419220119

CAPÍTULO 20 263

SUJIDADE DEPOSITADA SOBRE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS EM GOIÂNIA: MORFOLOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pedro Victor Valadares Romanholo
Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Enes Gonçalves Marra
Sérgio Pires Pimentel

DOI 10.22533/at.ed.67419220120

CAPÍTULO 21 275

TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS SOLARIMÉTRICOS DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DA EMC/UFG

Jéssica Alice Alves da Silva
Bernardo Pinheiro de Alvarenga
Sérgio Pires Pimentel
Enes Gonçalves Marra

DOI 10.22533/at.ed.67419220121

CAPÍTULO 22 290

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

Lucia Iracema Chipponelli Pinto
Francisco Jose Lopes de Lima
Fernando Ramos Martins
Enio Bueno Pereira

DOI 10.22533/at.ed.67419220122

CAPÍTULO 23 303

O ENSINO SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS NOS CURSOS DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA NAS UNIVERSIDADES BRASILEIRAS

André Barra Neto
Ana Paula Pinheiro Zago
Márcia Helena da Silva
Mirian Sousa Moreira
José Eduardo Ferreira Lopes

DOI 10.22533/at.ed.67419220123

CAPÍTULO 24	317
POTENCIALIDADE DO BIOGÁS GERADO PELA CODIGESTÃO ENTRE DEJETO BOVINO E SUÍNO	
Juliana Lobo Paes	
Camila Ferreira Matos	
Gabriel Araújo e Silva Ferraz	
Giancarlo Bruggianesi	
Camila Kelly de Queiroz	
Caroline Stephanie Gomes de Castro Soares	
DOI 10.22533/at.ed.67419220124	
CAPÍTULO 25	333
SIMULAÇÃO DE UMA PLANTA OTEC DE CICLO FECHADO OPERANDO NO BRASIL	
Marcus Godolphim de Castro Neves	
Hélio Henrique Rivabene Ferreira Dias	
Cassio Roberto Macedo Maia	
Ricardo Alan Verdú Ramos	
DOI 10.22533/at.ed.67419220125	
CAPÍTULO 26	344
ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE 24 MESES DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE NO ESTADO DO TOCANTINS	
Brunno Henrique Brito	
Thálisson Câmara Belém	
Márcio Serafim de Almeida	
Felipe Tozzi Bittencourt	
DOI 10.22533/at.ed.67419220126	
CAPÍTULO 27	359
ESTUDO TECNOLÓGICO DE SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS	
Robson de Souza Santiago	
Bruno Lindbergh Sousa	
Yordanka Reyes Cruz	
Estevão Freire	
Suely Pereira Freitas	
Gisel Chenard Díaz	
DOI 10.22533/at.ed.67419220127	
CAPÍTULO 28	376
INFLUÊNCIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM AEROPORTOS SOBRE A SEGURANÇA DAS OPERAÇÕES AERONÁUTICAS	
Francisco Wilson Falcão Júnior	
Paulo Cesar Marques de Carvalho	
Wilson Cabral de Sousa Júnior	
DOI 10.22533/at.ed.67419220128	
SOBRE O ORGANIZADOR	390

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.

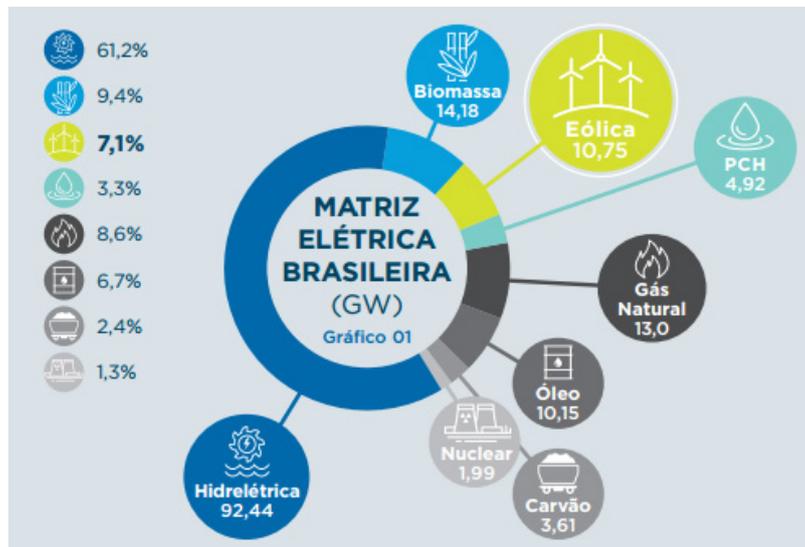


Figura 1 - Matriz elétrica brasileira (em GW) em maio 2016, por fonte de combustível.

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).

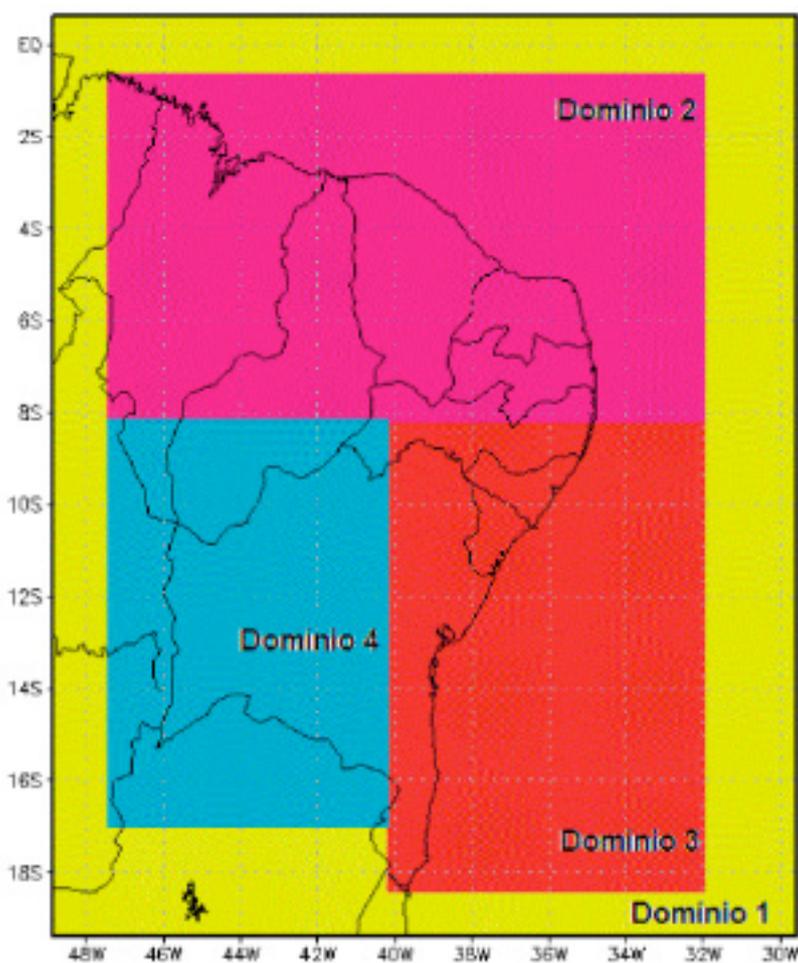


Figura 2 - Grades aninhadas utilizadas nos experimentos com o modelo WRF.

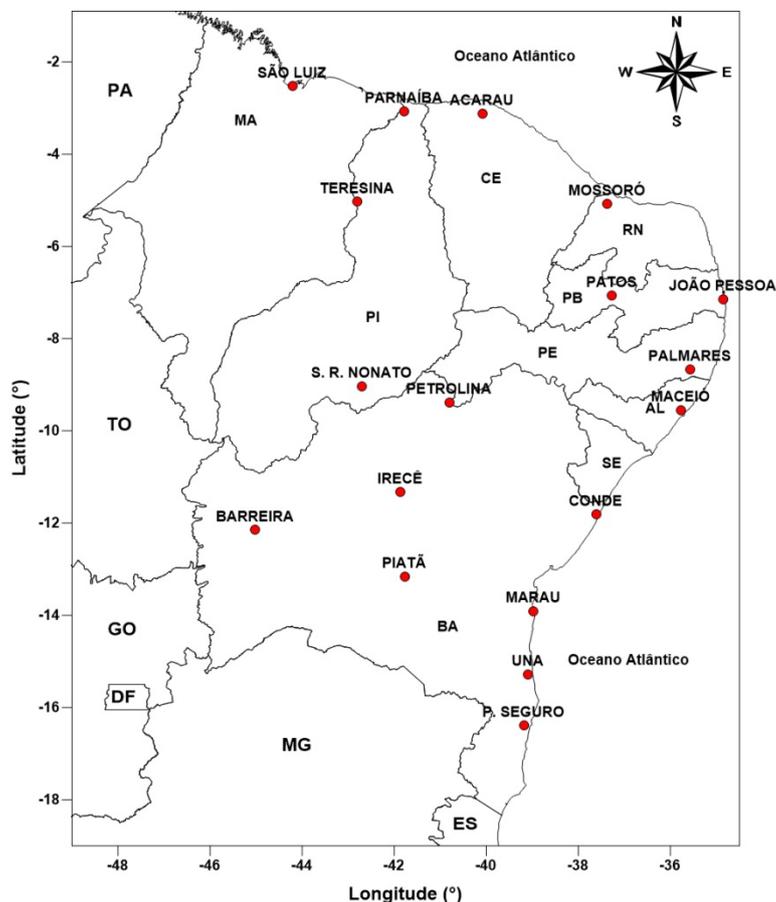


Figura 3 - Localização das EMAs do INMET utilizadas para os testes de sensibilidade.

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.

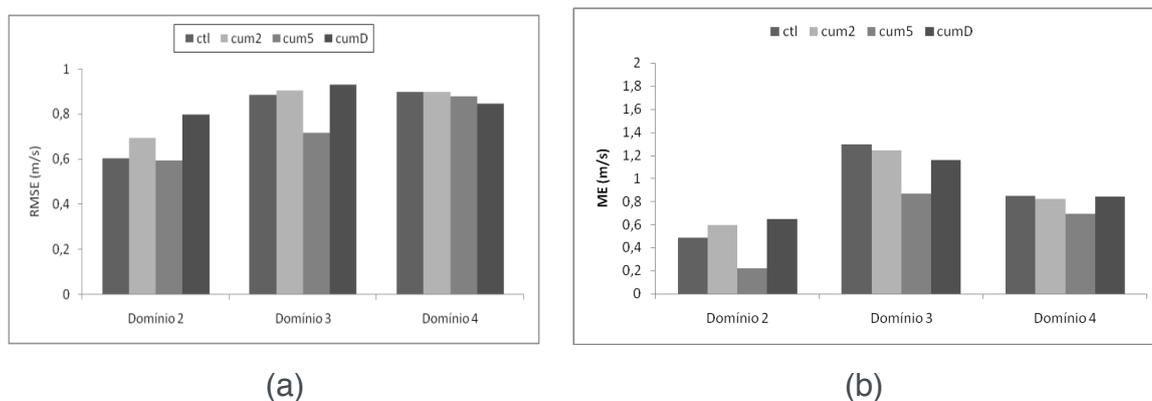
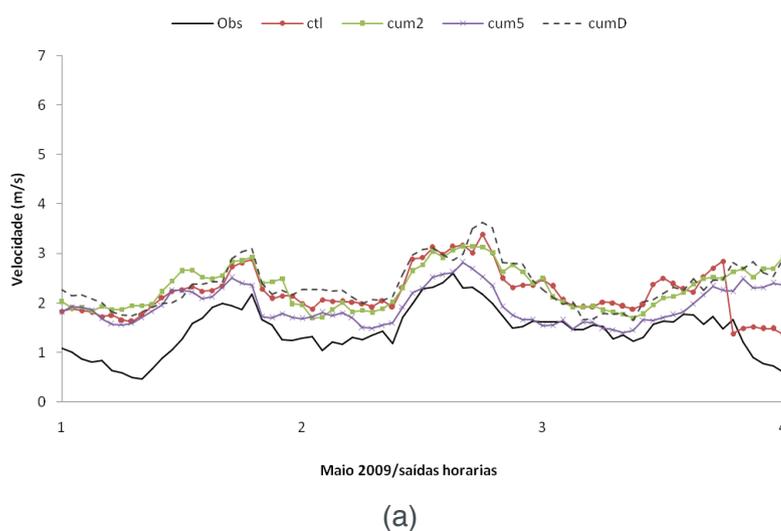


Figura 4 – Índices estatísticos velocidade do vento para os domínios das diferentes parametrizações de convecção (*cumulus*): (a) RMSE e (b) ME.



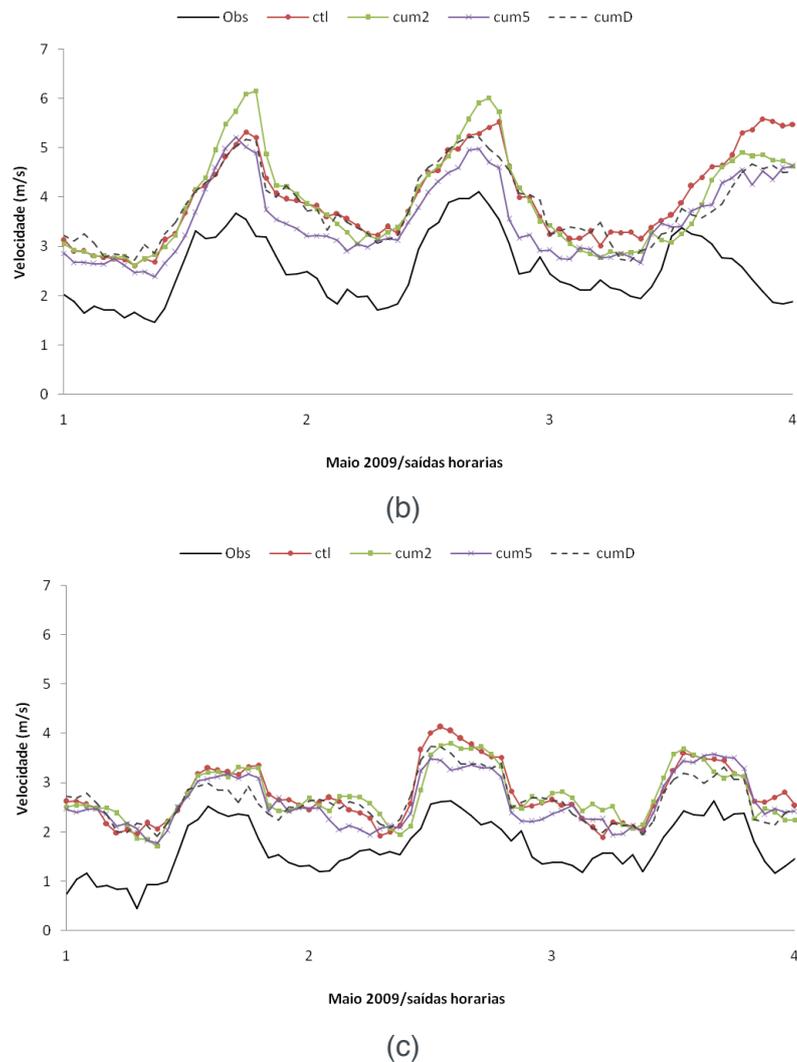


Figura 5 - Evolução temporal da velocidade do vento para o modelo WRF para as diferentes configurações de convecção (cumulus): (a) Domínio 2; (b) Domínio 3 e (c) Domínio 4.

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.

SOBRE O ORGANIZADOR:

Paulo Jayme Pereira Abdala possui graduação em Engenharia Eletrônica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - RJ (1988), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005) e pós-graduação em Gestão de Aviação Civil pela Universidade de Brasília (2003). Entre 1989 e 2008 foi Chefe do Laboratório de Ruído Aeronáutico e Emissões de Motores do DAC/ANAC, tendo desenvolvido centenas de estudos sobre poluição sonora e atmosférica oriundas da atividade aeronáutica. Foi representante oficial do Brasil em diversos Fóruns Internacionais sobre meio ambiente promovidos pela Organização de Aviação Civil Internacional OACI - Agência da ONU. Foi Coordenador dos Cursos de Engenharia de Produção, Elétrica, Civil e Mecânica na UNOPAR/PG entre 2013 e 2018. Atualmente é Consultor Independente para a AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, OACI e INFRAERO. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: acústica, meio ambiente e pedagogia (metodologia TRAINAIR/OACI).

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-067-4

