



Energia Solar e Eólica

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

 **Atena**
Editora

Ano 2019

Paulo Jayme Pereira Abdala
(Organizador)

Energia Solar e Eólica

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 [recurso eletrônico] / Organizador Paulo Jayme Pereira Abdala. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica; v. 1)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-7247-066-7

DOI 10.22533/at.ed.667192201

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
UMA REVISÃO SOBRE AS TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS ATUAIS	
Alexandre José Bühler Ivan Jorge Gabe Fernando Hoefling dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.6671922011	
CAPÍTULO 2	26
VALIDAÇÃO DE MODELOS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO	
Bruna de Oliveira Busson Pedro Henrique Fonteles Dias Ivonne Montero Dupont Pedro Hassan Martins Campos Paulo Cesar Marques de Carvalho Edylla Andressa Queiroz Barroso	
DOI 10.22533/at.ed.6671922012	
CAPÍTULO 3	41
A GERAÇÃO SOLAR DE CALOR DE PROCESSOS INDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE GESSO BETA DO POLO GESSEIRO DO ARARIPE	
André Vitor de Albuquerque Santos Kenia Carvalho Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.6671922013	
CAPÍTULO 4	58
A UTILIZAÇÃO DO SILÍCIO NACIONAL PARA A FABRICAÇÃO DE PLACAS SOLARES: UMA REFLEXÃO DAS DIFICULDADES TECNOLÓGICA E FINANCEIRA	
Felipe Souza Davies Gustavo Luiz Frisso Matheus Vinícius Brandão	
DOI 10.22533/at.ed.6671922014	
CAPÍTULO 5	72
AEROPORTO DE VITÓRIA/ES: ESTUDO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	
Ana Luiza Guimarães Valory Sidney Schaeffer Warley Teixeira Guimarães	
DOI 10.22533/at.ed.6671922015	
CAPÍTULO 6	87
ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO E POLICRISTALINO	
Suellen Caroline Silva Costa Janaína de Oliveira Castro Silva Cristiana Brasil Maia Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz	
DOI 10.22533/at.ed.6671922016	

CAPÍTULO 7	1043
ANÁLISE HARMÔNICA NOS INVERSORES FOTOVOLTAICOS DE UMA MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Alessandro Bogila Joel Rocha Pinto Thales Prini Franchi Thiago Prini Franchi	
DOI 10.22533/at.ed.6671922017	
CAPÍTULO 8	120
ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO NO MODELO DE UMA ÁRVORE NA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA	
Bárbara de Luca De Franciscis Gouveia	
DOI 10.22533/at.ed.6671922018	
CAPÍTULO 9	139
ANÁLISE FINANCEIRA DE SISTEMAS DE MICROGERAÇÃO FOTOVOLTAICA FINANCIADOS EM PALMAS - TO	
Brunno Henrique Brito Maria Lúcia Feitosa Gomes de Melo	
DOI 10.22533/at.ed.6671922019	
CAPÍTULO 10	152
APLICAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EM ESCOLAS MUNICIPAIS DA CIDADE DE CRUZ ALTA/RS: ANÁLISE DE IMPLANTAÇÃO E POTENCIAL DE ENERGIA GERADA	
Alessandra Haas Franciele Rohr Ísis Portolan dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.66719220110	
CAPÍTULO 11	165
APLICAÇÃO DO ALGORITMO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT) EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Augusto Hafemeister João Batista Dias Leonel Augusto Calliari Poltosi	
DOI 10.22533/at.ed.66719220111	
CAPÍTULO 12	181
AR CONDICIONADO SOLAR – CICLO DE ADSORÇÃO	
Rafael de Oliveira Barreto Pollyanne de Oliveira Carvalho Malaquias Matheus de Mendonça Herzog Luciana Carvalho Penha Lucio Cesar de Souza Mesquita Elizabeth Marques Duarte Pereira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220112	
CAPÍTULO 13	194
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO COLETOR SOLAR PLANO ACOPLADO EM SECADOR HÍBRIDO	
Raphaela Soares da Silva Camelo	

Ícaro da Silva Misquita
Thais Andrade de Paula Lovisi
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira
Juliana Lobo Paes
Camila Lucas Guimarães

DOI 10.22533/at.ed.66719220113

CAPÍTULO 14 212

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE NOVO PROTÓTIPO DE FOTOBIORREATOR NÃO TRANSPARENTE PARA CULTIVO DE MICROALGAS COM ILUMINAÇÃO INTERNA ATRAVÉS DE POFS QUE RECEBEM A LUZ DE LENTES MONTADAS EM SISTEMA DE RASTREAMENTO SOLAR

Gisel Chenard Díaz
Yordanka Reyes Cruz
Rene Gonzalez Carliz
Fabio Toshio Dino
Maurílio Novais da Paixão
Donato A. Gomes Aranda
Marina Galindo Chenard

DOI 10.22533/at.ed.66719220114

CAPÍTULO 15 225

AVALIAÇÃO DE WEBSITES BRASILEIROS PARA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE: PARÂMETROS DE ENTRADA E RESULTADOS

Marina Calcagnotto Mascarello
Letícia Jenisch Rodrigues

DOI 10.22533/at.ed.66719220115

CAPÍTULO 16 241

AVALIAÇÕES DE CUSTO E DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS TIPO SIGFI COM DIFERENTES PERÍODOS DE AUTONOMIA

Marta Maria de Almeida Olivieri
Leonardo dos Santos Reis Vieira
Marco Antonio Galdino
Márcia da Rocha Ramos

DOI 10.22533/at.ed.66719220116

CAPÍTULO 17 257

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO CONSIDERANDO O EFEITO DA ESTEIRA AERODINÂMICA DE TURBINAS ATRAVÉS DO MODELO DO DISCO ATUADOR

Luiz Fernando Pezzi
Adriane Prisco Petry

DOI 10.22533/at.ed.66719220117

CAPÍTULO 18 272

COMPARAÇÃO DE RESULTADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE DIFERENTES BASES DE DADOS DE IRRADIAÇÃO - ESTUDO DE CASO EM CURITIBA

Danilo Carvalho de Gouveia
Jeanne Moro
Muza Iwanow
Rebecca Avença
Jair Urbanetz Junior

DOI 10.22533/at.ed.66719220118

CAPÍTULO 19	284
DESENVOLVIMENTO DE SUPERFÍCIES SUPERHIDROFÓBICAS COM EFEITO AUTOLIMPANTE PARA APLICAÇÕES EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
Lucélio Oliveira Lemos	
Magnum Augusto Moraes Lopes de Jesus	
Aline Geice Vitor Silva	
Angela de Mello Ferreira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220119	
CAPÍTULO 20	297
DESENVOLVIMENTO DE UM APLICATIVO PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA	
Stéphane Rodrigues da Silva	
Érica Tiemi Anabuki	
Luis Cláudio Gambôa Lopes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220120	
CAPÍTULO 21	312
DO PETRÓLEO À ENERGIA FOTOVOLTAICA: A INSERÇÃO DO BRASIL NESTE NOVO MERCADO	
Emilia Ribeiro Gobbo	
Maria Antonia Tavares Fernandes da Silva	
Rosemarie Bröker Bone	
DOI 10.22533/at.ed.66719220121	
CAPÍTULO 22	330
EFEITO DO SOMBREAMENTO EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	
José Rafael Cápua Proveti	
Daniel José Custódio Coura	
Carlos Roberto Coutinho	
Adriano Fazolo Nardoto	
DOI 10.22533/at.ed.66719220122	
CAPÍTULO 23	342
ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA E DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO INTEGRADO AO COMPLEXO AQUÁTICO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA	
Helena Flávia Napolini	
Gustavo Xavier de Andrade Pinto	
Julio Boing Neto	
Ricardo Rütther	
DOI 10.22533/at.ed.66719220123	
CAPÍTULO 24	354
ESTUDO DA SECAGEM INTERMITENTE DA MANGA UTILIZANDO SECADOR HÍBRIDO SOLAR-ELÉTRICO	
Camila Lucas Guimarães	
Juliana Lobo Paes	
Raphaela Soares da Silva Camelo	
Madelon Rodrigues Sá Braz	
Ícaro da Silva Misquita	
Lizandra da Conceição Teixeira Gomes de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220124	

CAPÍTULO 25	367
ANÁLISE PRÉVIA DO VALOR DA DEPENDÊNCIA DO SOLO PARA AS ATIVIDADES AGRÍCOLAS COM A POSSÍVEL IMPLANTAÇÃO DO PARQUE EÓLICO DA SERRA, EM SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS	
Antonio Robson Oliveira da Rosa Leonardo Beroldt Rafael Haag	
DOI 10.22533/at.ed.66719220125	
CAPÍTULO 26	379
APLICAÇÃO DE UM DVR EM AEROGERADORES SCIG E DFIG PARA AUMENTO DE SUORTABILIDADE FRENTE A AFUNDAMENTOS DE TENSÃO	
Edmar Ferreira Cota Renato Amorim Torres Victor Flores Mendes	
DOI 10.22533/at.ed.66719220126	
CAPÍTULO 27	398
AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO COM TOPOGRAFIA COMPLEXA UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	
William Corrêa Radünz Alexandre Vagtinski de Paula Adriane Prisco Petry	
DOI 10.22533/at.ed.66719220127	
CAPÍTULO 28	410
EDIFICAÇÃO DE ENERGIA POSITIVA: ANÁLISE DE GERAÇÃO E CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESCRITÓRIO VERDE DA UTFPR EM CURITIBA	
Larissa Barbosa Krasnhak Elis Almeida Medeiros de Mello Jair Urbanetz Junior Eloy Casagrande Junior	
DOI 10.22533/at.ed.66719220128	
CAPÍTULO 29	422
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA WIFI DE BAIXO CUSTO BASEADO EM THINGSPEAK	
Renan Tavares Figueiredo Odélsia Leonor Sanchez de Alsina Diego Lopes Coriolano Eurípes Lopes de Almeida Neto Ladjane Coelho dos Santos Iraí Tadeu Ferreira de Resende Ana Claudia de Melo Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.66719220129	
SOBRE O ORGANIZADOR	431

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO COM TOPOGRAFIA COMPLEXA UTILIZANDO DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

William Corrêa Radünz

Universidade Federal de Santa Catarina,
POSMEC

Florianópolis – Santa Catarina

Alexandre Vagtinski de Paula

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Departamento de Engenharia Mecânica

Porto Alegre – Rio Grande do Sul

Adriane Prisco Petry

Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Departamento de Engenharia Mecânica

Porto Alegre – Rio Grande do Sul

RESUMO: O presente trabalho avalia o potencial eólico de uma região com topografia complexa utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). A serra na região de Pinheiro Machado, microrregião de interesse, foi selecionada tendo-se como base critérios que caracterizam uma fazenda eólica promissora, como o acesso a rodovias, proximidade de subestação do Sistema Interligado Nacional (SIN) e intensos ventos anuais utilizando-se mapas do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul de 2014. Os mapas do Atlas e os dados topográficos do terreno foram georreferenciados no software de Sistema de Informação Geográfica Global Mapper para a definição das condições de contorno da simulação. Modelos de turbulência recomendados na literatura, qualidade de

malha e sensibilidade às dimensões do domínio computacional foram avaliados sob a luz das boas práticas de CFD atualmente sugeridas pela comunidade científica. Os estudos de micrositing e estimação da Energia Anual Gerada foram realizados após a determinação do campo de velocidades em microescala. A serra na região de Pinheiro Machado mostrou-se bastante promissora para o aproveitamento do recurso eólico, atingindo uma capacidade instalada de 92 MW com quarenta aerogeradores Enercon E-70 E4. O efeito da velocidade incremental foi identificado nos cumes de elevações, alavancando a potência gerada em até 88%. Estima-se que Pinheiro Machado produza 298 GWh anuais, com um fator de capacidade de 40%, suficiente para o abastecimento de uma cidade com mais de cem mil habitantes.

PALAVRAS-CHAVE: CFD, Potencial Eólico, Topografia Complexa.

ABSTRACT: This research carries a wind resource assessment in a region with complex topography using Computational Fluid Dynamics (CFD). The micro-region of Pinheiro Machado was chosen based on a number of criteria which characterize a promising Wind farm, as the access to highways, a power substation connected to the Brazilian's National Interconnected System (SIN) and all-year-long strong winds, in which was used the

Wind Resource Atlas of Rio Grande do Sul of 2014. The Atlas maps and the terrain topographic data were georeferenced in Geographic Information System software Global Mapper to define the boundary conditions of the simulation. Turbulence models recommended in literature, mesh quality and domain sensitivity were evaluated upon light of the best CFD practices suggested by the scientific community. Micrositing and the estimation of the Annual Energy Production were carried after the determination of the micro-scale velocity field. The chain of hills appeared to be highly promising for wind energy exploration, reaching a 92 MW installed capacity with forty Enercon E-70 E4 wind turbines. The orographic speed-up effect was identified at the top of the hills, leveraging power output up to 88%. Pinheiro Machado is expected to yield yearly 298 GWh with a 40% capacity factor, which would be enough to supply a city with more than one-hundred-thousand inhabitants.

KEYWORDS: CFD, Wind Resource Assessment, Complex Topography.

1 | INTRODUÇÃO

De acordo com a *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2014), em 2030, fazendas eólicas *onshore* e *offshore* podem chegar a 10% e 2% de toda energia gerada mundialmente, respectivamente. Apesar dos intensos e constantes ventos *offshore*, 91% dos novos empreendimentos em nível global ainda são *onshore*. As fazendas eólicas em terra firme podem tirar proveito da velocidade incremental vento no topo de orografias irregulares como colinas, serras ou montanhas, maximizando a produção de energia. Crasto (2007) aponta que o erro sistemático na estimação da EAG (Energia Anual Gerada) por modelos numéricos lineares em terrenos complexos é elevado, recomendando o uso de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), devido ao comportamento não linear da camada limite atmosférica (CLA).

O objetivo final dos empreendimentos de energia eólica é a maximização da produção através de um posicionamento ótimo dos aerogeradores, procedimento conhecido como *micrositing*. Tendo em vista que até mesmo variações sutis de produção aumentam consideravelmente a receita, há uma forte demanda por metodologias para a estimação da EAG mais confiáveis. A reprodução computacional da CLA neutra, que desconsidera os efeitos de empuxo por efeitos térmicos, é geralmente obtida em CFD utilizando-se uma abordagem RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), que resolve o escoamento médio e modela as tensões de Reynolds através de modelos de turbulência (Masson *et al.*, 2010).

Li *et al.* (2015) apontam que Simulações de Grandes Escalas (LES), que modelam apenas escalas menores da turbulência, têm sido aplicadas neste tópico em função da melhor representação da física da turbulência e do descolamento da camada limite. Apesar da relativa simplicidade, modelos de duas equações baseados em RANS são menos custosos em termos computacionais com relação à LES, portanto ainda são amplamente utilizados na simulação de escoamentos da CLA em terrenos complexos.

No entanto, a simulação da CLA neutra por modelos de turbulência de duas equações consiste em uma tarefa nada trivial, apresentando principalmente duas questões em aberto, amplamente debatidas pela comunidade acadêmica.

Primeiro, o surgimento de gradientes de velocidade artificiais na direção do escoamento da CLA, supostamente homogênea, afeta os resultados de CFD de processos atmosféricos. Blocken *et al.* (2007) recomendam que os modelos de turbulência que estiverem no escopo do estudo sejam avaliados em um domínio plano e bidimensional quanto à condição de homogeneidade. Mostram, também, que a reprodução de uma CLA homogênea depende da discretização da superfície do terreno e da correta parametrização da altura de rugosidade superficial.

Segundo, não há consenso com relação a seleção de modelos de turbulência e de condições de contorno que de fato representem o problema. Muitos modelos são verificados através da comparação com dados meteorológicos e topográficos em terrenos reais, como é o caso de *Askervein Hill*, Escócia (Masson *et al.*, 2010). Castro *et al.* (2003) propuseram uma modificação nos coeficientes do modelo $k-\varepsilon$ padrão na simulação da CLA neutra em *Askervein Hill* e obtiveram um erro de 10% com relação a dados anemométricos no topo da colina. As simulações foram realizadas com diversas malhas computacionais a fim de avaliar a importância da discretização espacial e as limitações do modelo de turbulência.

Este trabalho avalia o potencial para o aproveitamento do recurso eólico de um terreno de topografia complexa através do pacote comercial de CFD ANSYS CFX, com a modelagem da CLA neutra em microescala atmosférica. A microrregião é selecionada utilizando-se o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul de 2014 segundo o potencial eólico e posicionamento geográfico. As informações de mesoescala do atlas são incorporadas através de georreferenciamento nas condições de contorno do modelo. Os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ padrão e modificado segundo Castro *et al.* (2003), $k-\varepsilon$ RNG (Renormalization Group) e SST (Shear Stress Transport) são avaliados quando à homogeneidade da CLA, enquanto que a influência da discretização do domínio é quantificada. Após o estudo de sensibilidade do modelo, é determinado o mapa de velocidades em microescala através de CFD, do qual segue o estudo de *micrositing*. Este trabalho inicial visa fornecer um melhor entendimento sobre fenômenos de microescala que possam maximizar a produção de energia, como a velocidade incremental em cumes de elevações.

2 | METODOLOGIA

A metodologia para a avaliação do potencial eólico da região de interesse foi dividida em cinco itens que, basicamente, consistem na seleção da microrregião e incorporação de dados meteorológicos, definição das condições de contorno para o modelo, seleção do modelo de turbulência que apresenta o perfil da CLA mais

homogêneo, seleção da malha computacional para a determinação do campo de velocidades em microescala e, por fim, *micrositing* e estimação da EAG e FC.

2.1 Seleção da microrregião

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (Schubert e Eletrosul, 2014) consiste em um valioso recurso para a pré-seleção de regiões de alto potencial eólico, fornecendo mapas de velocidade média anual e frequência de direção dos ventos, proximidade de subestações de energia e zonas onde o aproveitamento do recurso eólico é inviável. A região de interesse foi selecionada tendo-se como base alguns dos critérios que Montezano (2012) utilizou em seu algoritmo de *site selection*, que são:

- I Potencial eólico (ventos anuais médios superiores a 7 m/s);
- II Ventos predominantemente de uma única direção;
- III Proximidade de subestação do SIN;
- IV Acesso a rodovias;
- V Não ser área de exclusão (unidades de conservação, corpos d'água, perímetro urbano);
- VI Área com baixa densidade de fazendas eólicas.

A microrregião a oeste do município de Pinheiro Machado, ainda pouco explorada pelo mercado de energia eólica, atende aos critérios de seleção, apresentando elevado potencial eólico e geográfico. Destaca-se a ocorrência de ventos médios anuais da ordem de 8 m/s a 100 m de altura com direção predominantemente leste. O acesso à região ocorre pela BR-293, que liga o sudoeste Gaúcho a Pelotas, não limitando, a princípio, questões logísticas do projeto. A transmissão da eletricidade para o SIN poderia ser realizada através da subestação Candiota (230 kV), que conta com projetos de ampliação da malha de transmissão para 525 kV. O terreno estudado apresenta inclinações superiores a 17° em alguns pontos, caracterizando o mesmo como complexo, critério apontado por Zhang (2015). O procedimento de sucessivas seleções de região partindo de macroescala (correspondente ao estado do Rio Grande do Sul), passando para mesoescala até a microescala está ilustrado nas Figs. 1 e 2.

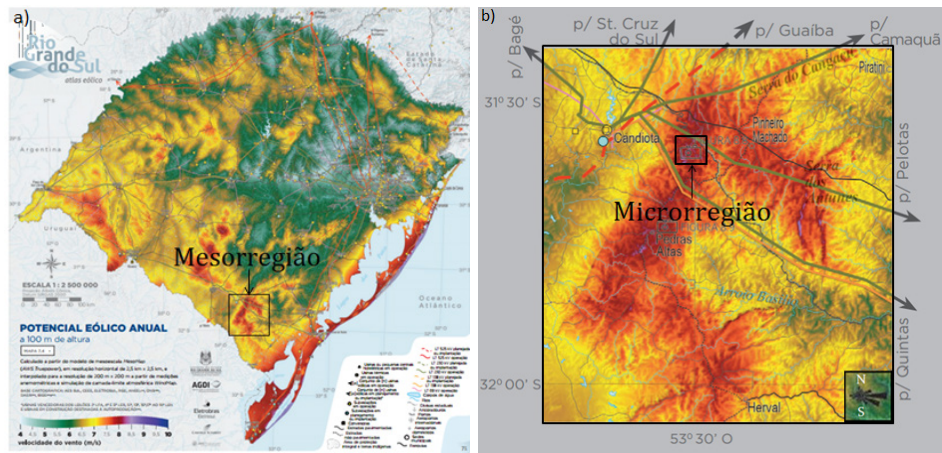


Figura 1 – (a) Seleção da mesorregião de interesse com o mapa do potencial eólico anual do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul de 2014. (b) Seleção da microrregião na ampliação do mesmo mapa. No canto inferior direito desta figura é exibida a distribuição de frequência dos ventos.

Imagens adaptadas de Schubert e Eletrosul, 2014.

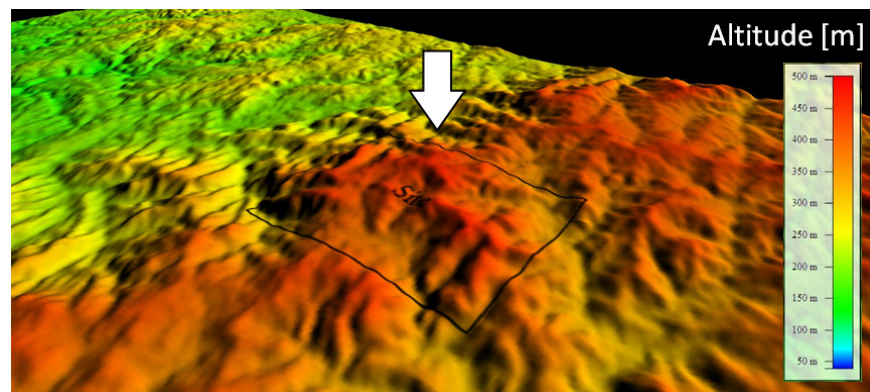


Figura 2 – Elevação em relação ao nível do mar do relevo da microrregião selecionada para o estudo de potencial eólico e *micrositing*, georreferenciados em Global Mapper.

Dados disponibilizados por Jarvis (2008).

2.2 Condições de contorno

O objetivo desta simulação é a modelagem da camada superficial da CLA, que possui algumas centenas de metros. Portanto, em teoria, esta seria a altura do domínio computacional. No entanto, partiu-se de 1 km de altura para que o efeito de bloqueio no escoamento fosse minimizado. Segundo Stangroom (2004), a hipótese de parede deslizante para o topo do domínio é satisfatória, pois permite a aceleração do escoamento caso a altura da CLA não seja, de fato, 1 km. Utilizou-se a mesma condição para os lados do domínio, partindo-se do pressuposto de que o escoamento real é paralelo às mesmas. Esta condição artificial gera um elevado erro. Assim, a região de interesse deve possuir um afastamento mínimo das fronteiras do domínio. Definiu-se uma única altura de rugosidade aerodinâmica z_0 [m] de 0,153 m para a superfície do terreno, cuja equivalência em termos de *sand-grain roughness* h_s [m] (parâmetro utilizado pelo ANSYS CFX) é dada, segundo Stangroom (2004), por

$$l_z = \sqrt{z_0} \quad (1)$$

As condições de entrada foram baseadas no trabalho de Castro *et al.* (2003), em que a CLA neutra apresenta perfil logarítmico, a energia cinética turbulenta k em $[m^2/s^2]$ é considerada constante e a taxa de dissipação ε em $[m^2/s^3]$ decai inversamente com a altura. O vento na região da entrada apresenta uma velocidade de aproximadamente 8 m/s a 100m com velocidade de fricção u_* [m/s] de 0,493 m/s. Na saída do domínio optou-se pela condição de contorno de pressão atmosférica constante. As condições de contorno são mostradas em detalhe na Fig. 3.

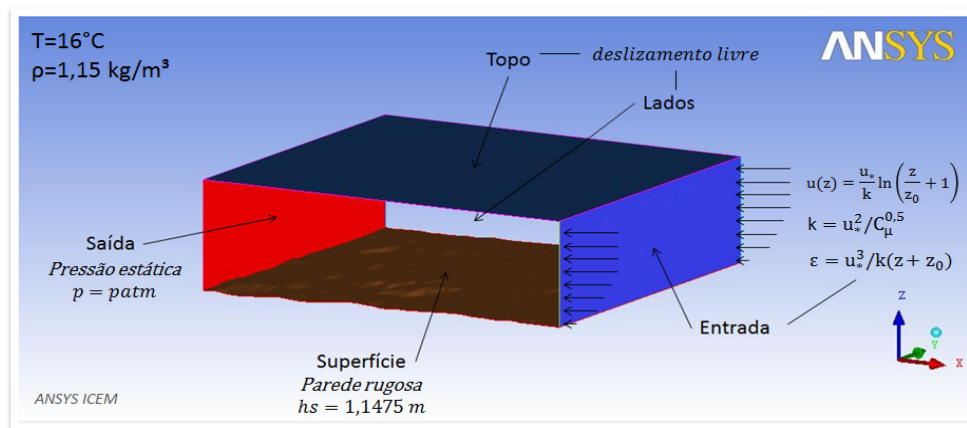


Figura 3 – Domínio computacional e condições de contorno utilizadas na modelagem.

2.3 Seleção do modelo de turbulência

A homogeneidade dos perfis da CLA dos modelos de turbulência k - ε padrão e com coeficientes modificados segundo Castro *et al.* (2003), RNG k - ε e SST foi avaliada em um domínio bidimensional de malha hexaédrica de 29.141 elementos, conforme orientam Blocken *et al.* (2007). Os modelos k - ε padrão, RNG k - ε e SST apresentaram um elevado ganho de *momentum* próximo ao nível do solo, conforme pode ser visualizado na Fig. 4. Devido a maior homogeneidade do modelo k - ε modificado, este foi utilizado no estudo de *micrositing*.

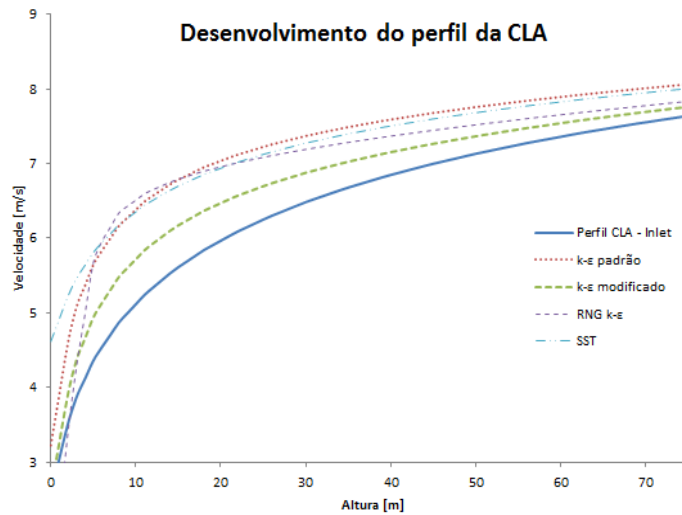


Figura 4 – Comparação entre perfis da CLA na entrada e no meio do domínio de diferentes modelos de turbulência em terreno plano 2D.

2.4 Qualidade de malha

A independência de malha é raramente obtida em simulações da CLA. Porém, é importante que se compreenda a sensibilidade da modelagem com relação à discretização e dimensões do domínio computacional. A sensibilidade do modelo foi avaliada através da variação de refino de malha e dimensões do domínio, monitorando-se a velocidade no centro do domínio a uma altura de 80 m, conforme pode ser visto na Tab. 1. Verificou-se que os parâmetros mais impactantes na variação de $u(80)$ foram o refino horizontal no Caso 4 e as dimensões do domínio nos Casos 6, 8 e 9. Optou-se pela malha do Caso 9 para o estudo de *micrositing*, pois tornou-se inviável, em função da capacidade de processamento disponível, a geração de um domínio com mais de dois milhões de elementos hexaédricos.

	L_x [m]	L_y [m]	L_z [m]	nn_x	nn_y	nn_z	hz_1 [m]	$u(80)$ [m/s]	Dif. Rel. [%]
Caso 1	8000	6000	1000	81	61	33	10	8,520	0,243
Caso 2	8000	6000	1000	81	61	42	5	8,540	0,134
Caso 3	8000	6000	1000	81	61	50	2,5	8,552	0,645
Caso 4	8000	6000	1000	161	121	50	2,5	8,607	0,139
Caso 5	8000	6000	1000	241	181	50	2,5	8,619	-0,555
Caso 6	8000	6000	1500	161	121	67	2,5	8,572	-0,067
Caso 7	8000	6000	2000	161	121	72	2,5	8,566	0,863
Caso 8	8500	7000	2500	171	141	72	2,5	8,640	0,823
Caso 9	9000	8000	2500	181	161	72	2,5	8,712	-

Tabela 1 – Dimensões do domínio (L), número de nós (nn), altura do primeiro volume de controle da superfície (hz_1), velocidade do centro do domínio a 80 m de altura e diferença relativa de $u(80)$ com relação ao caso posterior.

2.5 *Micrositing*, EAG e FC

O posicionamento de aerogeradores visando à maximização da energia produzida em uma dada fazenda eólica denomina-se *micrositing*. No presente trabalho, as turbinas eólicas foram posicionadas seguindo os seguintes critérios:

- I Velocidade máxima do vento;
- II Regiões sem possíveis descolamentos da CLA;
- III Distância mínima das fronteiras do domínio de 2 km;
- IV Espaçamento mínimo entre aerogeradores, explicado a seguir.

Segundo Zhang (2015), recomenda-se uma distância mínima entre aerogeradores de cinco diâmetros na direção predominante do vento e de três diâmetros na direção perpendicular à direção preferencial do vento. Tal prática visa reduzir a perda de energia cinética e aumento da turbulência em função da esteira turbulenta gerada pelas turbinas, que não foram avaliadas neste trabalho.

Ainda segundo Zhang, a fortíssima dependência temporal de u_r torna necessária a introdução da distribuição de Weibull na avaliação da EAG. Esta distribuição traz uma representação da frequência com que uma dada velocidade u_r ocorre, dada pela função densidade de probabilidade (PDF)

$$f(u) = \frac{k}{C} \left(\frac{u}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{C}\right)^k\right] \quad (2)$$

$$C = \frac{u}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3)$$

em que k ($= 2,5$ de acordo com o Atlas) é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull. C é o parâmetro de escala em [m/s], que é determinado pela equação (3), onde o denominador é uma função Gama. Tendo-se, então, uma formulação que leva em consideração a característica fortemente temporal do vento, podem-se estimar a EAG e o FC (que é uma razão entre a EAG efetiva e nominal) pelas seguintes expressões

$$EG_j = 8760 \sum_i^{N_U} f_{ij} P_{ij} \quad EG_j = 8760 \sum_i^{N_U} f_{ij} P_{ij} \quad (4)$$

$$FC = \frac{EG_{\text{total}}}{EG_{\text{total}}} = \frac{\sum_j^{N_T} EG_j}{8760 N_T} \quad FC = \frac{EG_{\text{total}}}{EG_{\text{total}}} = \frac{\sum_j^{N_T} EG_j}{8760 N_T} \quad (5)$$

Os índices i e j representam a classe de velocidade utilizada no cálculo e a contagem de aerogeradores, respectivamente e, N_U , o número total de classes de velocidade. A PDF e a potência para uma dada classe de velocidade i para uma dada turbina j são dadas por f_{ij} e P_{ij} [W], respectivamente. A constante de 8760 representa o número total de horas em um ano típico. N_T e P_N representam o número de aerogeradores e a potência nominal dos mesmos em [MW], respectivamente.

O aerogerador E-70 E4 com potência nominal de 2,3 MW foi escolhido com base no catálogo da fabricante Enercon (2015), em que seguiu-se a norma para requisitos de projeto para turbinas eólicas, IEC 61400-1 (2005). O equipamento de classe IEC Ia apresenta, além de elevada robustez às rajadas de vento superiores a 50 m/s e níveis de turbulência superiores a 18%, C_p máximo na faixa de velocidades esperadas para a altura de 75 m da região, conforme pode ser visto na Fig. 5.

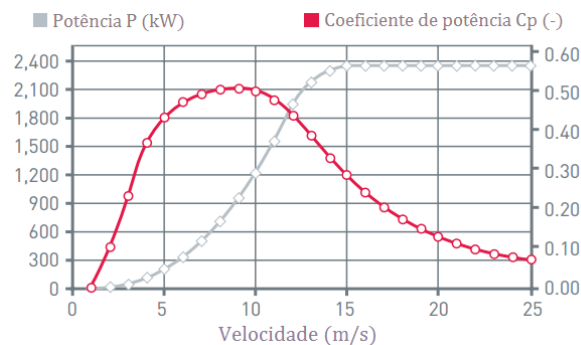


Figura 5 – Curva de potência [kW] por velocidade do vento [m/s] do aerogerador E-70 E4 de potência nominal 2,3 MW. Adaptado de Enercon (2015).

3 | RESULTADOS

Como esperado, a aceleração do escoamento próximo ao topo das elevações aumentou consideravelmente o potencial eólico do local. As velocidades na altura da *nacelle* dos aerogeradores E-70 E4 mostraram-se superiores em até 23% com relação à condição de entrada. Dado que a energia gerada aumenta ao cubo com a velocidade, esta velocidade incremental pode representar um aumento de até 88% na produção de energia. Ao total, foram instalados quarenta aerogeradores atendendo aos critérios descritos no item 2.5, representando uma capacidade instalada de 92 MW. A distância mínima entre as turbinas na direção do escoamento foi da ordem de nove diâmetros

de rotor, e não cinco conforme sugere o critério IV. Na Fig. 6, podem ser observadas quatro colunas de aerogeradores que, não coincidentemente, seguem a topografia característica do local. Os cumes, ao contrário dos vales, consistem em regiões de alta velocidade e menor probabilidade de instabilidade no escoamento. Portanto, *layouts* com mais de quatro colunas exporiam os aerogeradores a condições de operação inconvenientes, podendo inclusive apresentar descolamento de camada limite.

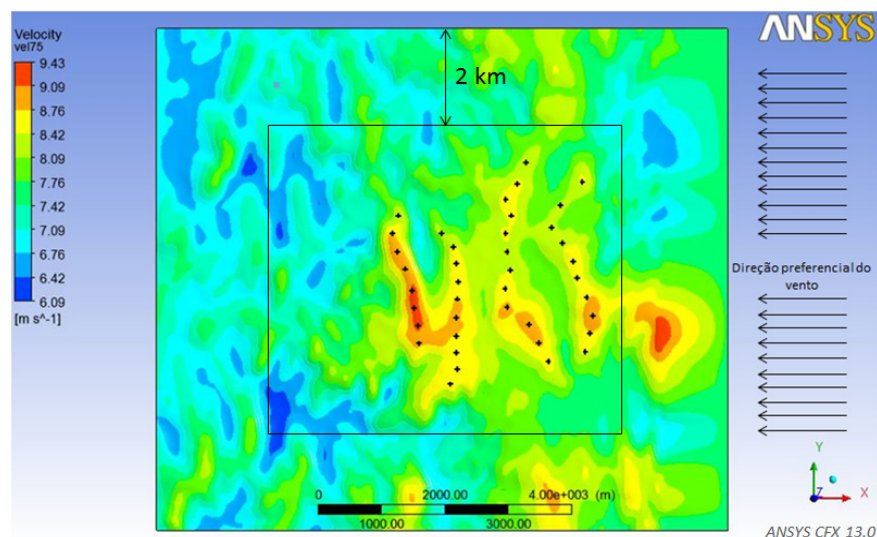


Figura 6 – *Micrositing* dos aerogeradores Enercon E-70 (em preto) sob os contornos de velocidade à altura relativa de 75 m.

Baseado em dados de consumo da região sul do Brasil no ano de 2012, o *site* teria capacidade para abastecer uma população superior a cem mil habitantes (Tab. 2). De acordo com Zhang (2015), o fator de capacidade de parques eólicos fica na faixa de 20% a 40%, sendo a média mundial em torno de 30%. O fato do FC estimado do *site* ser da ordem de 40%, com os aerogeradores do modelo Enercon E-70 E4, é bastante satisfatório, tendo em vista que a velocidade nominal destes fica em torno de 15 m/s, enquanto que a velocidade média anual nos aerogeradores é ligeiramente inferior a 9 m/s.

Consumo [MWh/hab.]	EAG [MWh]	População abastecida [hab.]
2,599	298.330	114.786

Tabela 2 – Estimativa da capacidade de fornecimento de energia para o parque eólico de Pinheiro Machado (baseado em dados de EPE, 2013).

4 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de avaliação do potencial eólico em uma região de terreno complexo utilizando CFD.

A região de Pinheiro Machado conta com rodovias, subestação interligada ao SIN

e ventos anuais intensos predominantemente na direção leste. O modelo numérico em CFD foi elaborado a partir de dados retirados de mapas climáticos do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul de 2014, georreferenciados no software de GIS Global Mapper, cujo papel também foi de trabalhar os dados topográficos *open access* da região, reconstruindo, assim, a superfície tridimensional do terreno. Simulou-se a interação da CLA com o terreno em microescala meteorológica seguindo-se as boas práticas em CFD na área das Ciências Atmosféricas, utilizando-se dos resultados para a pré-seleção dos aerogeradores Enercon E-70 E4, *micrositing* e estimação da EAG.

Mostrou-se que os efeitos da velocidade incremental podem alavancar a potência extraída do vento em até 88%. O formato da cadeia de colinas (perpendicular à direção preferencial do vento) torna intuitivo o arranjo de *micrositing*, projetando a EAG para 298 GWh com quarenta aerogeradores, suficiente para abastecer uma cidade de mais de cem mil habitantes. O FC de 40% superou a média global (30%, de acordo com Zhang, 2015) apesar da velocidade nominal do modelo de aerogerador especificado ser superior à velocidade média anual do *site*.

Como proposta para trabalhos futuros, o *layout* em quatro colunas proposto deve ser avaliado quanto às esteiras turbulentas, não consideradas neste trabalho, que afetam o rendimento dos aerogeradores. Isto pode ser feito utilizando-se códigos que modelam as turbinas como sumidouros de *momentum* e fontes de energia cinética turbulenta. O tratamento isotrópico da turbulência pelos modelos utilizados simplifica em muito a real complexidade de fenômenos como o descolamento da CLA e a recirculação. Por isso, apesar da modelagem por LES ser menos difundida e mais custosa em termos computacionais que os modelos de duas equações nas análises de CFD em terrenos complexos, o emprego da modelagem de largas escalas representaria melhor a física do problema. Sugere-se, ainda, a instalação de torres anemométricas para a verificação da incerteza na modelagem computacional e para a tomada de decisão em nível de projeto.

5 | REFERÊNCIAS

Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. **CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems**, Atmospheric Environment, vol. 41, n. 2, pp. 238-252.

Castro, F. A., Palma, J. M. L. M., Silva Lopes, A., 2003. **Simulation of the Askervein flow. Part 1: Reynolds Averaged Navier–Stokes equations (k–ε turbulence model)**, Boundary-Layer Meteorology, vol. 107, pp. 501-530.

Conan, B., 2012. **Wind resource assessment in complex terrain by wind tunnel modeling**, Tese de Doutorado, Intitut von Karman, Universite d’Orleans, Bruxelas, Bélgica.

Crasto, G., 2007. **Numerical Simulations of the Atmospheric Boundary Layer**. Tese de Doutorado, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Cagliari, Cagliari, Italia.

Enercon, 2015. **Product overview**. Disponível em <http://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien->

Portal/broschueren/pdf/en/ENERCON_Produkt_en_06_2015.pdf. Acesso em 11/12/2015.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética, 2013. **Anuário estatístico de energia elétrica 2012**. Disponível em http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20120914_1.pdf. Acesso em 15/09/2015.

IEC – International Electrotechnical Commission, 2005. **IEC 61400-1, Wind Turbine – Part 1: Design Requirements**, 3ª ed., IEC, Geneva, Suíça.

IRENA – International Renewable Energy Agency, 2014. **REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap**, IRENA, Abu Dhabi.

Jarvis, A., 2008. **Hole-filled SRTM for the globe Version 4**. Disponível em www.cgiar-csi.org/data/srtm-90mdigital-elevation-database-v4-1. Acesso em 10/06/2015.

Li, Q. S., Yan, B. W., He, Y. C., Chan, P. W., 2015. **RANS Simulation of Neutral Atmospheric Boundary Layer Flows over Complex Terrain by proper imposition of boundary conditions and modification on the k- ϵ model**, Environmental Fluid Mechanics, vol. 1, pp. 1-23.

Masson, C., Sumner, J., Watters, C.S., 2010. **CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel**, Energies, vol. 3, pp. 989-1013.

Montezano, B. E. M., 2012. **Estratégias para identificação de Sítios Eólicos promissores usando Sistema de Informação Geográfica e Algoritmos Evolutivos**, Dissertação de Mestrado, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro.

Schubert, C., Eletrosul, 2014. **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul 2014**, AGDI, Porto Alegre.

Stangroom, P., 2004. **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain**, Tese de Doutorado, The University of Nottingham, Nottingham, Reino Unido.

Zhang, M. H., 2015. **Wind Resource Assessment and Micro-Siting: Science and Engineering**, Wiley, 1ª ed., Singapura.

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 978-85-7247-066-7



9 788572 470667