

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

William Corrêa Radünz – williamradunz@gmail.com

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

Alexandre Vagtinski de Paula – depaula@ufrgs.br

Adriane Prisco Petry – adrianep@mecanica.ufrgs.br

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

Resumo. O presente trabalho propõe uma metodologia para a avaliação do potencial eólico de uma região com topografia complexa através de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) com o objetivo de contribuir para a tomada de decisão por parte de stakeholders em estudos de viabilidade futuros neste tipo de terreno. O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul foi utilizado como ferramenta para a seleção de uma microrregião promissora, caracterizada pela elevada velocidade média anual, direção preferencial do vento, acesso a rodovias e proximidade de subestação conectada ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Os mapas de interesse do atlas foram sobrepostos ao modelo digital de relevo da região selecionada através de georreferenciamento, permitindo uma melhor caracterização espacial da velocidade. No que concerne a modelagem numérica por CFD, foi feita uma breve revisão de literatura no âmbito do emprego dos diferentes modelos de turbulência, eventual modificação de constantes e problemas encontrados na definição de parâmetros das funções de parede para a simulação do escoamento da porção inferior da Camada Limite Atmosférica (CLA). Os mapas de velocidade do vento em microescala foram obtidos após uma extensiva análise da sensibilidade do modelo numérico quando à discretização da malha e dimensões do domínio computacional, assim como a capacidade do modelo de turbulência de representar uma CLA neutra em equilíbrio em um terreno plano idealizado sem obstruções. A serra na região de Pinheiro Machado (RS) mostrou-se bastante promissora para o aproveitamento do recurso eólico, comportando inicialmente uma fazenda eólica com capacidade instalada de 92 MW com quarenta aerogeradores do modelo Enercon E-70 E4. Um dos aspectos que evidenciam o potencial eólico de terrenos complexos, que é a aceleração do escoamento nos cumes de elevações, foi identificado neste estudo, sugerindo uma alavancagem de até 88% na potência gerada com relação ao valor de referência. Estima-se que Pinheiro Machado produza 298 GWh anuais, com um elevado fator de capacidade (FC) – 40% – o que seria suficiente para o abastecimento de uma cidade com mais de cem mil habitantes.

Palavras-chave: CFD, Potencial Eólico, Topografia Complexa.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2014), em 2030, a penetração de fazendas eólicas *onshore* e *offshore* na matrix energética global pode atingir 10% e 2%, respectivamente. Apesar dos intensos e constantes ventos *offshore*, em torno de 90% dos novos empreendimentos em nível global ainda são em terra firme. Estas 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 do posicionamento ótimo dos aerogeradores, procedimento conhecido como *micrositing*. Tendo em vista que até mesmo variações sutis de produção aumentam consideravelmente a receita do parque eólico, há uma forte demanda por metodologias mais acuradas para a estimação da EAG. A reprodução computacional da porção inferior da CLA neutra, em que desconsidera-se 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 aborda 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 nas Médias de Reynolds são menos computacionalmente custosos com relação à LES. Portanto, tais modelos 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- ϵ 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 busca avaliar o potencial para o aproveitamento do recurso eólico de um terreno de topografia complexa fazendo emprego do pacote comercial de CFD, *ANSYS CFX*, com a modelagem da CLA neutra em microescala atmosférica. No capítulo 2, 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 sobrepostas ao modelo digital de relevo através de georreferenciamento, permitindo uma leitura mais acurada dos dados. Os modelos de turbulência k- ϵ padrão, k- ϵ modificado segundo o trabalho de Castro *et al.* (2003), k- ϵ RNG (Renormalization Group) e SST (Shear Stress Transport) são avaliados quanto à homogeneidade da CLA. No capítulo 3, é apresentado o mapa de velocidades em microescala simulado por CFD, do qual segue o estudo de *micrositing* e a determinação da EAG. No capítulo 4, a metodologia proposta no presente trabalho é brevemente recapitulada e as principais conclusões são postas. Ainda, sugere-se algumas melhorias para trabalhos futuros.

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 associação de dados meteorológicos ao modelo digital de relevo, definição das condições de contorno, 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 benefício associado às elevadas velocidades de vento fica claro tendo em vista que a potência gerada varia ao cubo com esta. Quanto à direção do vento, é desejado que esta seja principalmente caracterizada por uma única direção ou o mais próximo disso em função do *layout* do parque eólico. As fileiras de turbinas eólicas tendem a ser construídas perpendicularmente à direção preferencial do vento com o propósito de mitigar as perdas por esteira turbulenta, que nada mais é do que um déficit de velocidade e aumento da turbulência causada pela interação aerodinâmica das turbinas com o escoamento. 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. Na Fig. 1, o leitor pode ser

induzido à conclusão de que grande parte das áreas escuras encontradas majoritariamente nas regiões central e norte do estado são de elevado potencial eólico. Na verdade, a grande maioria destas regiões apresenta velocidades médias anuais inferiores à 6 m/s, sendo apenas uma questão de escala de cores. Com relação à topografia da região, que pode ser observada na Fig. 2, fica evidente a elevação superior da microrregião (da ordem de 500 m) com relação à porção que fica na parte esquerda da imagem (da ordem de 300 m). Tal diferença de elevação faz com que a última seja inadequada para a instalação de um parque eólico, tanto por uma questão de baixa velocidade do vento como pelo provável aumento da turbulência atmosférica.

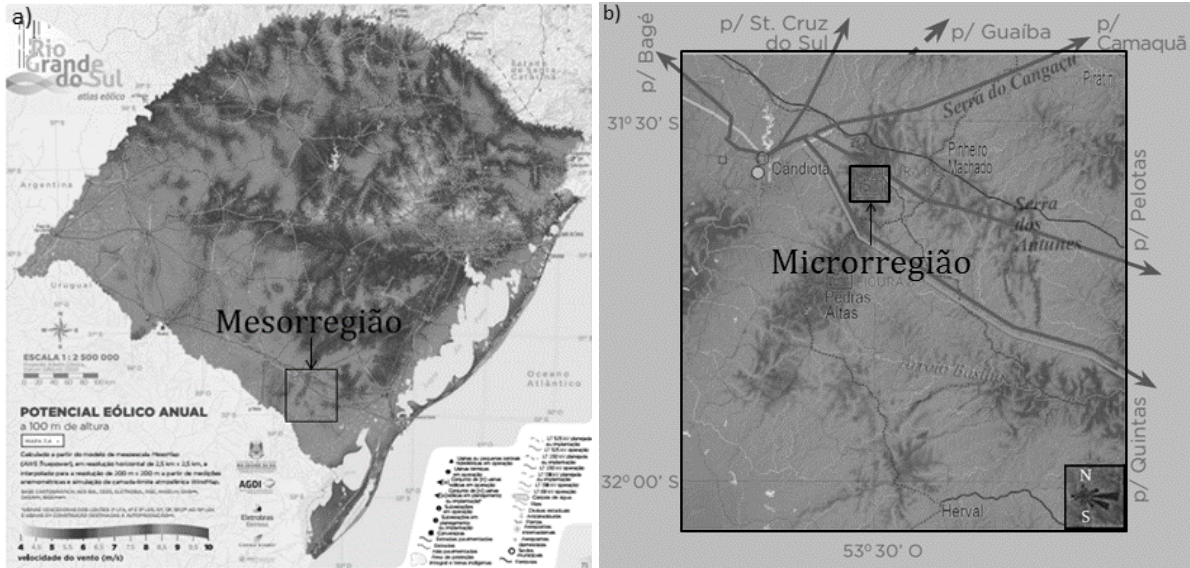


Figura 1 – (a) Seleção da mesorregião de interesse com o mapa do potencial eólico anual do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul de 2014. (b) Seleção da microrregião na ampliação do mesmo mapa. No canto inferior direito desta figura é exibida a distribuição de frequência dos ventos. Imagens adaptadas de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

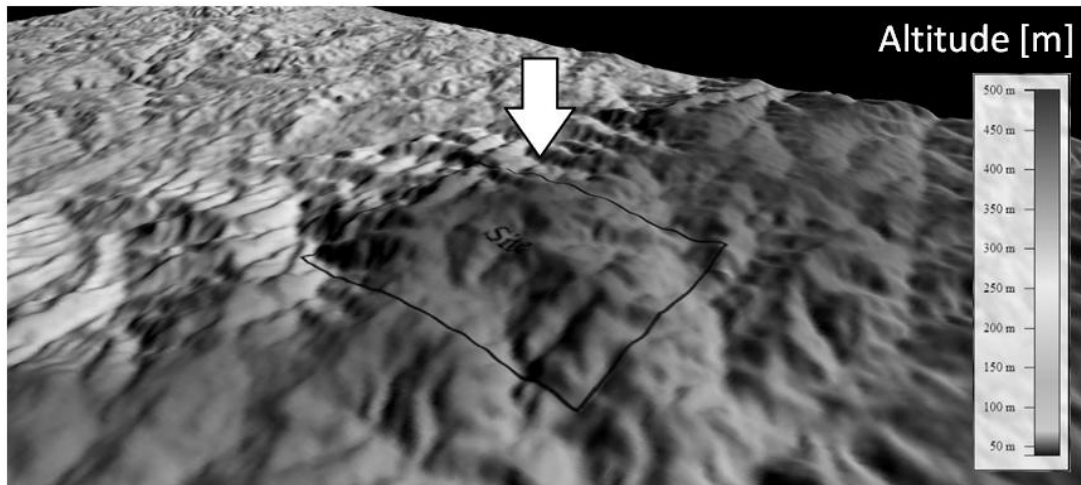


Figura 2 – Altitude em relação ao nível do mar do relevo da microrregião selecionada para o estudo de potencial eólico e *micrositing*, georreferenciados em Global Mapper. Dados disponibilizados por Jarvis (2008).

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

$$h_s = 7,5z_0 \quad (1)$$

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.

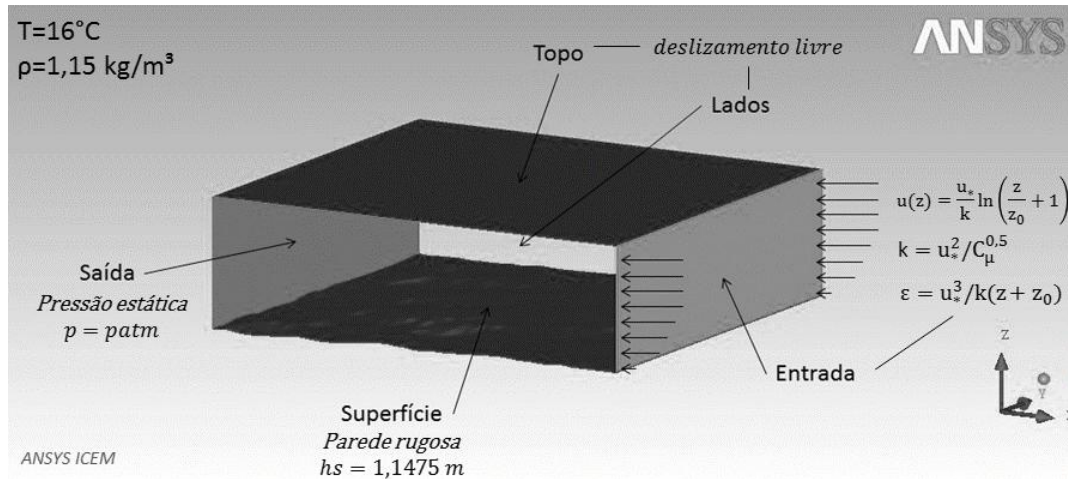


Figura 3 – Condições de contorno utilizadas na modelagem mostradas no software ANSYS ICEM-CFD.

2.3 Seleção do modelo de turbulência

A homogeneidade dos perfis da CLA dos modelos de turbulência $k-\varepsilon$ padrão e com coeficientes modificados segundo Castro *et al.* (2003), RNG $k-\varepsilon$ e SST foi avaliada em um domínio bidimensional de malha hexaédrica de 29.141 elementos, conforme orientam Blocken *et al.* (2007). Os modelos $k-\varepsilon$ padrão, RNG $k-\varepsilon$ 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 $k-\varepsilon$ modificado, este foi utilizado no estudo de *micrositing*.

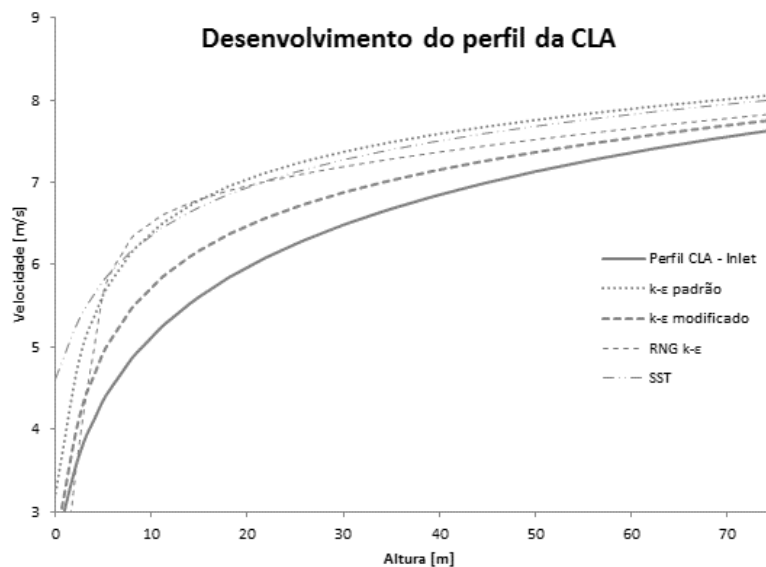


Figura 4 – Comparação entre perfis da CLA na entrada e no meio do domínio de diferentes modelos de turbulência em terreno plano 2D.

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.

Tabela 1 – Dimensões do domínio (L_i), número de nós (nn_i), 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.

	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	-

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.

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)

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

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

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

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

$$FC = \frac{EAG_{efetiva}}{EAG_{nominal}} = \frac{\sum_j^{N_T} EAG_j}{8760 N_T P_N} \quad (5)$$

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 foi seguida 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 80 m da região, conforme pode ser visto na Fig. 5.

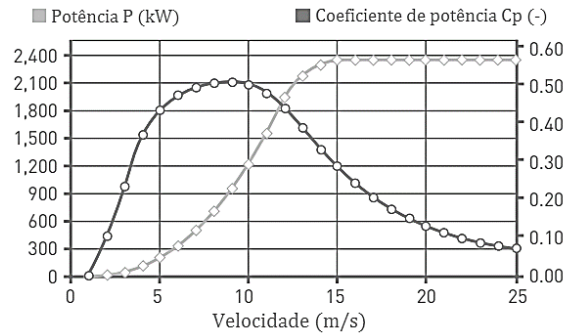


Figura 5 – Curva de potência [kW] por velocidade do vento [m/s] do aerogerador E-70 E4 de potência nominal 2,3 MW. Adaptado de Enercon (2015).

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 (conforme discutido no capítulo 2.1).

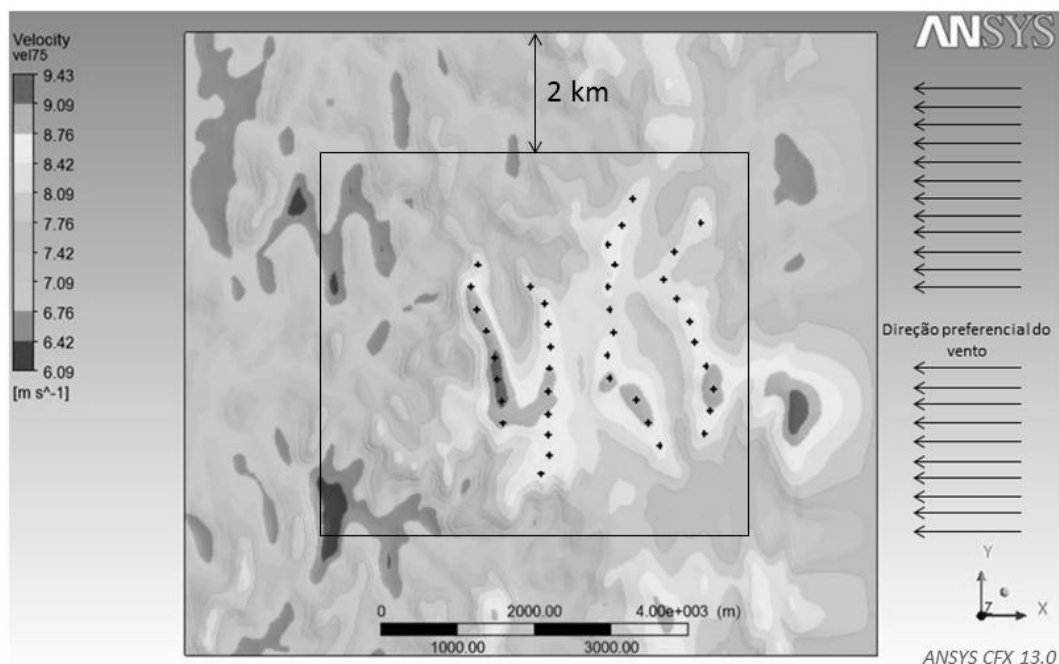


Figura 6 – *Micrositing* dos aerogeradores Enercon E-70 (pontos em preto) sob os contornos de velocidade à altura relativa de 80 m.

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.

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

Consumo [MWh/habitante]	EAG [MWh]	População abastecida [habitantes]
2,599	298.330	114.786

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 estimativa 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.

Agradecimentos

À Alexandre Vagtinski de Paula, pela contribuição na concepção do escopo e execução do trabalho. À Adriane Prisco Petry, pelo suporte na modelagem numérica do escoamento da CLA através de CFD e pelo profundo conhecimento no campo de energia eólica.

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 ($k-\epsilon$ 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, 3^a 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, 1^a ed., Singapura.

WIND ENERGY ASSESSMENT IN A REGION WITH COMPLEX TOPOGRAPHY THROUGH COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Abstract. *This paper proposes a wind energy assessment methodology to study a region with complex topography through Computational Fluid Mechanics (CFD), aiming to contribute to stakeholder decision-making in future assessments in this kind of terrain. The Wind Resource Atlas of Rio Grande do Sul was used as a tool to select a promising microregion, which is characterized by high annual mean wind speeds, main wind-direction, access to highways and a power substation connected to the National Interconnected System (SIN). The pertinent maps from the atlas were overlapped to the digital elevation model of the chosen region by georeferencing, leading to a better spatial characterization of the wind speeds. As to what concerns the CFD numerical modelling, a brief literature review was carried on the employment of different turbulence models, eventual modification of the model constants and issues with the definition of wall-function parameters for the flow simulation of the lower portion of the Atmospheric Boundary Layer (ABL). The microscale wind maps were obtained after an extensive numerical model sensitivity analysis regarding mesh discretization and computational domain dimensions, as well as the turbulence model capability of representing a neutral ABL in equilibrium in an empty fetch. The chain of hills appeared to be highly promising for wind energy exploration, initially admitting a 92-MW installed-capacity wind farm with forty Enercon E-70 E4 wind turbines. One of the aspects which point the wind energy potential of complex terrain, namely the speed-up effect, was identified in this work, suggesting a power-generation leverage of up until 88% if compared to the reference value. Pinheiro Machado is expected to yield yearly 298 GWh with a high capacity factor (CF) – 40% – which would be enough to supply a city with more than one-hundred-thousand habitants.*

Key words: CFD, Wind Energy Assessment, Complex Topography.