

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

por

William Corrêa Radünz

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2015.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

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

por

William Corrêa Radünz

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Adriane Prisco Petry

Prof. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 17 de novembro de 2015.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Alexandre Vagtinski de Paula, por abraçar o tema proposto neste trabalho e ativamente participar do desenvolvimento do mesmo. À professora Adriane Prisco Petry, pelo otimismo, disponibilidade e todo o conhecimento transmitido. Ao LMF e seus integrantes, pelo importante suporte técnico. Aos demais professores da UFRGS, pela excelência na promoção da educação, ciência e tecnologia. Ao amor e dedicação de meus pais e avós na minha educação, sem a qual não seria o cidadão que sou hoje. Ao povo brasileiro, sem o qual esta maravilhosa instituição não existiria.

RADÜNZ, W. C. **Avaliação do potencial eólico de uma região com topografia complexa através de dinâmica dos fluidos computacional**. 2015. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## RESUMO

A alta incerteza na estimativa do potencial eólico em terrenos complexos eleva o risco de investimento neste tipo de empreendimento, dificultando a diversificação da matriz energética do país. Neste trabalho foi avaliado o potencial eólico de uma região topograficamente complexa através de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), contribuindo para estudos de viabilidade mais aprofundados no futuro. A serra na região de Pinheiro Machado, microrregião de interesse, foi selecionada tendo como base uma série de critérios que caracterizariam uma fazenda eólica promissora, como por exemplo, rodovias de acesso, proximidade de subestação interligada ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e intensos ventos anuais, em que foram utilizados mapas do Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014). Os mapas do Atlas e os dados topográficos do terreno foram georreferenciados no *software* de Sistema de Informação Geográfica (GIS) *Global Mapper*, o que facilitou a seleção de dados. 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 seguidas na área. Os estudos de seleção dos aerogeradores, *micrositing* e estimativa da energia anual gerada (EAG) seguiram a análise em CFD. A serra na região de Pinheiro Machado mostrou-se bastante promissora para o aproveitamento do recurso eólico, atingindo a capacidade total instalada de 92 MW com quarenta aerogeradores Enercon E-70 E4, com potência nominal de 2,3 MW. O efeito da velocidade incremental foi identificado nos cumes de elevações, alavancando a potência gerada em até 88%. Estimou-se que Pinheiro Machado I 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. Sob tais condições, investigações futuras neste *site* foram sugeridas.

**PALAVRAS-CHAVE:** CFD, *micrositing*, potencial eólico, terrenos complexos.

RADÜNZ, W. C. **Wind energy assessment in a region with complex topography through computational fluid mechanics**. 2015. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

## **ABSTRACT**

The high levels of uncertainties in wind energy assessment in complex terrain raise the investment risk in this kind of endeavor, halting the diversification of the country energy matrix. This research assessed wind energy in a topographically complex region through Computational Fluid Dynamics (CFD), contributing to deeper-viability studies in the future. 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 (2014)*. The Atlas maps and the terrain topographic data were georeferenced in Geographic Information System (GIS) software *Global Mapper*, easing data selection. Turbulence models recommended in literature, mesh quality and domain sensitivity were evaluated upon light of CFD's best practices followed by the field. Wind-turbine selection, micrositing and annual energy production's (AEP) estimation followed the CFD analysis. Pinheiro Machado's chain of hills appeared to be highly promising for wind energy exploration, reaching a 92 MW installed capacity with forty Enercon E-70 E4 (2.3 MW) wind turbines. Orographic speed-up effect was identified, leveraging power output up to 88%. Pinheiro Machado I was found 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. Upon these conditions, further investigations on the site were suggested.

**KEYWORDS:** CFD, *micrositing*, wind energy assessment, complex terrain.

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	1
2.1 Camada Limite Atmosférica (CLA) .....	1
2.2 Perfil vertical do vento .....	2
2.3 Energia Anual Gerada .....	3
2.4 Modelos de turbulência para CFD .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
4. METODOLOGIA .....	6
4.1 Seleção da região .....	6
4.2 Condições de contorno .....	7
4.3 Malha computacional do terreno .....	9
4.4 Qualidade de malha e dimensões do domínio .....	9
4.5 Homogeneidade do perfil da CLA .....	10
4.6 <i>Micrositing</i> .....	10
4.7 Energia Anual Gerada .....	10
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	10
5.1 Qualidade de malha e dimensões do domínio .....	10
5.2 Homogeneidade do perfil da CLA .....	11
5.3 <i>Micrositing</i> .....	11
5.4 Energia Anual Gerada .....	12
6. CONCLUSÕES .....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
Anexo I – Classes de terreno, aerogerador e curva de potência .....	16
Apêndice I – Modelo $k-\varepsilon$ padrão e com coeficientes modificados .....	17
Apêndice II – Modelo $k-\varepsilon$ RNG .....	17
Apêndice III – Modelo SST ( <i>Shear Stress Transport</i> ) .....	18
Apêndice IV – Informações e detalhes da modelagem .....	19

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo dados da *International Energy Association* (IEA, 2014), o forte crescimento mundial das fontes de energia renováveis alavancaria a contribuição destas na geração global de energia para um terço em 2040. As tecnologias de energia renovável, elemento crítico do fornecimento global de energia de baixo carbono, se expandem rapidamente, suportadas por subsídios globais cumulativos de U\$ 120 bilhões até 2013. Com a crescente redução dos custos e suporte político contínuo, as energias renováveis somariam quase metade do aumento da produção global de eletricidade no ano de 2040.

De acordo com a *International Renewable Energy Agency* (IRENA, 2014), estima-se que em 2030 a geração mundial de energia eólica *onshore* e *offshore* pode chegar a 10% e 2%, respectivamente. O Brasil duplicou sua capacidade instalada com relação ao ano anterior, ocupando a décima posição no ranking mundial com 5,9 GW, segundo fontes do GWEC, 2014. Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2015), a capacidade instalada nacional atinge 7 GW, um aumento de 20% com relação ao ano de 2014.

Apesar do rápido crescimento do setor, Conan, 2012, explica que o custo da eletricidade gerada ainda é elevado se comparado a fontes de energia bem estabelecidas internacionalmente, como carvão e gás natural. A redução destes custos de produção requer que mais fazendas eólicas sejam implantadas e, também, que a produção seja otimizada. A avaliação precisa do recurso eólico é fator essencial neste contexto, pois determina diretamente a energia anual gerada (EAG). Apesar dos intensos e constantes ventos *offshore*, a grande maioria dos novos empreendimentos ainda são *onshore* (91%). Tais fazendas eólicas podem tirar proveito da aceleração do vento em topografias irregulares como colinas, serras ou montanhas, maximizando a produção. A previsão da EAG por modelos numéricos lineares apresenta bons resultados na modelagem de terrenos com inclinações suaves, porém, em terrenos complexos, recomenda-se a análise por Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), devido à complexidade do problema. Embora não haja uma definição unânime para “terreno complexo”, Zhang, 2015, mostra que a inclinação de 17° é geralmente aceita como o limiar entre terreno simples e complexo.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial para aproveitamento do recurso eólico de um terreno de topografia complexa através do pacote comercial de CFD ANSYS CFX, em microescala atmosférica, caracterizando a aptidão deste para um estudo de viabilidade mais aprofundado. Selecionar a região de interesse com base em critérios como proximidade de subestação conectada ao SIN (Sistema Interligado Nacional), rodovias de acesso e intensidade anual dos ventos, tendo como base o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (2014) integram os objetivos específicos. Este estudo inicial visa fornecer um melhor entendimento sobre fenômenos de microescala, como a velocidade incremental em cumes de elevações, na região que poderá vir a ser uma fazenda eólica. O estudo busca estimar a EAG e o fator de capacidade do parque após a pré-seleção do modelo do aerogerador e *micrositing*.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Camada Limite Atmosférica (CLA)

Segundo Zhang, 2015, a estrutura vertical da CLA, mostrada simplificada na Figura 2.1.1, depende da troca de calor e *momentum* entre a superfície terrestre e a atmosfera acima dela, tendo característica extremamente complexa e dependente das variações temporais e espaciais da forma, tipo de cobertura, umidade e temperatura do terreno. O comprimento da CLA pode variar de 300 a 3000 metros, onde então faz fronteira com a troposfera livre – região onde os ventos geostróficos predominam. A subcamada viscosa fica imediatamente acima da superfície e, como tem em média apenas alguns milímetros de

profundidade, é geralmente desprezada nos estudos de potencial eólico. A camada superficial corresponde, em média, a 10% da totalidade da CLA, equivalente a algumas centenas de metros. O balanço de forças ocorre somente entre os efeitos de fricção com a superfície e gradientes de pressão. A influência da força de Coriolis (efeito inercial nas massas de ar devido à rotação da Terra) é desprezível e os fluxos turbulentos verticais de *momentum* e calor podem ser considerados constantes, de modo que a modelagem do vento como sendo um perfil logarítmico é válida. Modelos numéricos para aplicações na avaliação do potencial eólico são amplamente baseados na física da camada superficial. Acima desta, a camada de Ekman representa em torno de 90% de toda a CLA. A influência dos efeitos superficiais decresce em detrimento da força de Coriolis, até atingir o topo da camada, região predominada pelos ventos geostróficos.

Um fenômeno extremamente importante na dinâmica da CLA é a instabilidade atmosférica, que pode ser definida como a tendência ao movimento de ar em função dos gradientes de temperatura na mesma. A modelagem da CLA como sendo neutramente estratificada, ou seja, quando as forças de empuxo se tornam menos significantes, se faz justificável em dias de ventos intensos (que geralmente é o caso em fazendas eólicas) ou nublados (mitiga a taxa de aquecimento ou resfriamento da superfície).

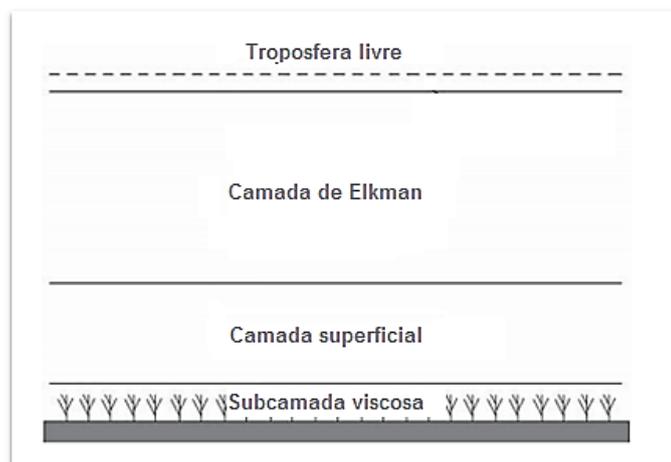


Figura 2.1.1 – Estrutura da CLA em terreno plano. Adaptado de Zhang, 2015.

## 2.2 Perfil vertical do vento

Conforme descrito por Zhang, 2015, o perfil vertical da camada superficial neutramente estratificada, é dado por

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.2.1)$$

em que  $u(z)$  é a velocidade do vento em [m/s],  $u_*$  é a velocidade de fricção em [m/s],  $\kappa$  a constante de Von Karman ( $\approx 0,4$ ),  $z$  a altura com relação ao nível do solo em [m] e  $z_0$  a altura de rugosidade aerodinâmica também em [m].

A rugosidade aerodinâmica advém da parametrização do tamanho e distribuição dos elementos de rugosidade superficiais, como por exemplo, vegetação, construções e superfície do solo. Valores típicos para diferentes tipos de utilização do solo podem ser vistos na Tabela A.1 do Anexo I.

Determinar a rugosidade aerodinâmica de um terreno realisticamente é uma tarefa extremamente difícil e raramente viável, tendo em vista que as características superficiais variam sazonalmente e espacialmente. A estimação do perfil de velocidades vertical do vento em terrenos complexos é ainda mais desafiadora do que a determinação do campo de rugosidades do terreno, pois além de depender desta, está sujeito às acelerações orográficas (oriundas da forma do terreno).

### 2.3 Energia Anual Gerada

A maximização da potência elétrica produzida por um aerogerador é o principal objetivo dos estudos de aproveitamento da energia eólica, sendo representada por

$$P(u_r) = \frac{1}{2} C_p \eta_m \eta_e \rho A u_r^3 \quad (2.3.1)$$

em que  $u_r$  é a velocidade normal na altura do rotor em [m/s],  $C_p$  é o coeficiente de potência do aerogerador e possui um valor máximo teórico de 0,593 (Limite de Betz),  $\eta_m$  e  $\eta_e$  os rendimentos mecânico e elétrico, respectivamente,  $\rho$  a massa específica do ar em [ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ] e  $A$  a área varrida pelo rotor em [ $\text{m}^2$ ], conforme apresentado por Zhang, 2015.

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

$$f(u_r) = \frac{k}{C} \left(\frac{u_r}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u_r}{C}\right)^k\right] \quad (2.3.2)$$

$$C = \frac{u_r}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2.3.3)$$

em que  $k$  é o parâmetro de forma da distribuição de Weibull e, conforme aumenta, a curva se estreita horizontalmente, ou seja, a dispersão das velocidades em torno da média é menor, o que é altamente desejado.  $C$  é o parâmetro de escala em [m/s], que é determinado pela equação (2.3.3), 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 efetivamente e nominalmente) pelas seguintes expressões

$$EAG_j = 8760 \sum_i^{N_U} f_{ij} P_{ij} \quad (2.3.4)$$

$$FC = \frac{EAG_{efetiva}}{EAG_{nominal}} = \frac{\sum_j^{N_T} EAG_j}{8760 N_T P_N} \quad (2.3.5)$$

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 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.

De acordo com Zhang, 2015, FCs de fazendas eólicas encontram-se na faixa de 20% - 40%, e não representam a eficiência do *site* em si, mas sim um indicador econômico. A taxa

interna de retorno para um período de vinte anos é proporcional ao FC, sendo fator crucial nas tomadas de decisão por parte dos investidores.

A dependência cúbica da equação (2.3.1) com relação à velocidade faz com que terrenos complexos sejam naturalmente interessantes para aproveitamento do potencial eólico, devido a um efeito conhecido como velocidade incremental. Simplesmente posto, o efeito de bloqueio causado por uma elevação orográfica faz com que o escoamento se acelere, o que pode ser visto na Figura 2.3.1. Assim, topos de elevações são regiões muito visadas para o posicionamento dos aerogeradores.

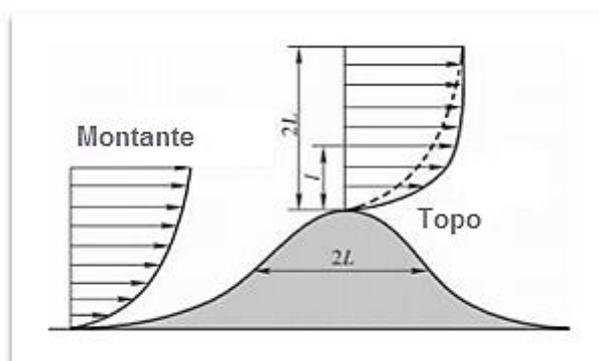


Figura 2.3.1 – Efeito da velocidade incremental em um perfil bidimensional de elevação. Adaptado de Zhang, 2015.

## 2.4 Modelos de turbulência para CFD

O software ANSYS CFX 13.0, disponibilizado pelo Laboratório de Mecânica dos Fluidos (LMF) do Departamento de Engenharia Mecânica, UFRGS, é um código CFD de volumes finitos baseado em elementos finitos para discretizar equações lineares através de uma abordagem de segunda-ordem do acoplamento entre campos de velocidade e pressão, resolvidos numericamente em uma malha não-estruturada. No presente estudo, são resolvidas as equações da continuidade e conservação do *momentum* (Navier-Stokes). A equação da energia não é resolvida devido à hipótese “estratificação neutra”, só restando, então, a mecânica dos fluidos incompressível do problema.

Segundo o ANSYS *Theory Guide*, 2013, as equações de Navier-Stokes podem ser simplificadas através da decomposição da velocidade em uma componente média e outra flutuante ( $u=U+u'$ ). Tal processo dá origem à formulação RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Desta modificação, surgem as conhecidas tensões de Reynolds, cuja modelagem e solução são realizadas através de modelos de turbulência.

Uma das classes de modelos de turbulência mais conhecidas e aplicadas parte da seguinte hipótese: a turbulência pode ser entendida como pequenos turbilhões que se formam e dissipam, onde as tensões de Reynolds são proporcionais ao gradiente de velocidades médias. Estes são conhecidos como modelos de viscosidade turbulenta (*Turbulent Eddy Viscosity models*). A expressão para as tensões de Reynolds é dada por

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u'_j u'_i} = \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.4.1)$$

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (2.4.2)$$

Na equações (2.4.1) e (2.4.2),  $\tau$  são as tensões de Reynolds em [Pa],  $u'$  é a componente flutuante da velocidade em [m/s],  $\mu_{eff}$  a viscosidade dinâmica efetiva em [Pa s],  $\mu$  a viscosidade dinâmica real em [Pa s],  $\mu_t$  a viscosidade dinâmica turbulenta em [Pa s] e  $U$  a velocidade média

do fluido. As equações da continuidade e *momentum* na formulação RANS para esta classe são

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (2.4.3)$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (2.4.4)$$

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k \quad (2.4.5)$$

O termo  $p'$  representa uma pressão modificada [Pa], que assume a forma simplificada (2.4.5) devido a hipótese de escoamento incompressível.  $S_M$  é a soma das forças de corpo que podem vir a surgir no fluido em [N/m<sup>3</sup>]. Dentre os modelos de viscosidade turbulenta, os mais conhecidos são os chamados modelos de duas equações, cujo propósito é a modelagem das tensões de Reynolds (equação 2.4.1) e a solução de uma modificação na equação 2.4.4.

A apresentação e discussão dos modelos de turbulência  $k-\epsilon$  padrão e com coeficientes modificados,  $k-\epsilon$  RNG (*Renormalization Group*) e SST (*Shear Stress Transport*), utilizados no presente trabalho, são encontradas nos Apêndices I, II e III.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Ayotte, 2008, a análise de *micrositing* através de modelos lineares, como o WAsP, sempre foi a mais utilizada. Tais modelos advêm de uma época em que se tinha uma clara limitação de recursos computacionais, e quando a grande maioria dos estudos de potencial eólico foi em terrenos planos ou levemente ondulados. Conforme o terreno se torna progressivamente complexo, tais modelos superestimam as velocidades em topos de elevações.

Li, 2015, aponta que recentemente Simulações de Grandes Escalas (LES) têm sido aplicadas neste tópico, o que traria informações mais específicas do comportamento turbulento do escoamento. Como os modelos em RANS são menos custosos em termos computacionais em relação aos modelos LES, estes ainda são amplamente utilizados na simulação de escoamentos da CLA em terrenos complexos. Porém, duas questões precisam ser devidamente tratadas.

Primeiro, a simulação de uma CLA horizontalmente homogênea (sem gradientes de velocidade no sentido do escoamento, plenamente desenvolvido, em terreno plano) tem sido buscada por diversos pesquisadores, onde técnicas como a mudança das constantes dos modelos de turbulência, das condições de contorno e adição de termos fonte. Li, 2015, mostrou que embora alguns autores aleguem resultados similares a simulações em túnel de vento e terrenos complexos reais (utilizados pela comunidade acadêmica como *benchmark*), não há uma metodologia clara e que seja válida para uma ampla gama de casos. Blocken *et al.*, 2007, apontou que obtenção de um perfil homogêneo também depende do grau de refino da malha computacional sobre a superfície do terreno e da correta parametrização da rugosidade superficial.

Outro problema é a seleção do modelo de turbulência baseado em RANS. Segundo Masson, 2010, diversos grupos de pesquisa utilizam-se de terrenos complexos reais que possuem uma sólida base de dados de vento e topográficos para validarem modificações em modelos de turbulência e condições de contorno, como é o caso de Askervein hill, Escócia. O escoamento neutramente estratificado sobre Askervein foi simulado utilizando-se o modelo  $k-\epsilon$  padrão com a modificação de algumas constantes. Resultados indicam que uma malha relativamente grosseira foi suficiente para resolver o escoamento a montante da colina, com um erro de 10% da sobreaceleração no cume com relação a dados experimentais.

Castro *et al.*, 2003 e 2008, mostraram que o modelo k- $\epsilon$  modificado apresenta bons resultados no estudo de *micrositing* de uma região costeira, prevendo padrões no escoamento que não seriam captados por modelos lineares. Concluíram o estudo enfatizando que o CFD é uma ferramenta que, apesar de não ter auxiliado na seleção do sítio em estudo, captou padrões no escoamento que passariam despercebidos pelos métodos utilizados na seleção da região. Kim e Patel, 2000, investigaram o desempenho do modelo RNG k- $\epsilon$  na simulação de escoamentos em terrenos reais, como por exemplo, o Askervein *hill*, e obtiveram resultados satisfatórios se comparado a outros modelos. Li *et al.*, 2015, propuseram modificações nos modelos k- $\epsilon$  padrão e RNG buscando a obtenção de um perfil de camada limite homogêneo. A comparação destes com dados de túnel de vento mostra que o modelo k- $\epsilon$  RNG apresenta melhor concordância com dados medidos.

## 4. METODOLOGIA

A metodologia de avaliação do potencial eólico em microescala e *micrositing* preliminar segue uma ordem muito clara, desde a seleção da região de interesse, da obtenção dos dados topográficos e de vento disponíveis, até a construção da malha computacional e da modelagem física do problema através de CFD. Tais procedimentos serão detalhados nas seções que seguem.

### 4.1 Seleção da região

O Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (AERS), 2014, consiste em uma boa fonte de dados inicial para a pré-seleção de possíveis sítios. Este traz campos de velocidade a 100 m e 150 m de altura para todo o território do estado, baseado em simulações de mesoescala calibradas com dados de torres anemométricas. Maiores detalhes com relação à metodologia e aos mapas gerados podem ser encontradas em Schubert e Eletrosul, 2014.

A região de interesse foi selecionada tendo como base critérios que Montezano, 2012, utilizou em seu algoritmo de *site selection*, e também os mapas de potencial eólico, frequência e direção dos ventos, subestações e zonas de exclusão do AERS (2014). Tais critérios são:

- 1) Potencial eólico (ventos anuais médios superiores a 7 m/s);
- 2) Rosa dos ventos (ventos predominantemente de uma única direção);
- 3) Proximidade de subestação interligada ao SIN;
- 4) Proximidade de rodovias;
- 5) Não ser área de exclusão (segundo Montezano, 2012, consideram-se zona de exclusão regiões próximas a aeroportos, corpos d'água, costa litorânea, unidades de conservação e áreas urbanas);
- 6) Área com baixa densidade de fazendas eólicas (diversificação da matriz energética).

Uma das regiões de interesse que atendeu a tais critérios está localizada na região da Serra do Sudeste, entre os municípios de Candiota e Pinheiro Machado. Na região, alternam-se coberturas vegetais naturais típicas do pampa (gramíneo-lenhosa e campos) com áreas agrícolas, reflorestamentos e pastos. Nos lugares mais promissores, os ventos médios anuais podem chegar a 8,0 m/s a 100 m de altura, portanto, é uma região de alto potencial eólico. No sistema elétrico, destaca-se a proximidade da subestação Candiota, que está conectada ao SIN por linhas de transmissão de 230 kV. Está em fase de outorga uma nova linha de transmissão entre Guaíba e Candiota, em 525 kV e circuito duplo. O acesso à região ocorre pela BR-293, que liga o sudoeste Gaúcho a Pelotas. Está em processo de pavimentação a rodovia RS 608, que liga Pinheiro Machado a Pedras Altas, região também de alto interesse para aproveitamento do potencial eólico.

O procedimento de sucessivas seleções de regiões partindo de macroescala (correspondente ao estado do Rio Grande do Sul), passando para mesoescala (Serra do

Sudeste) até a microescala (região cujo potencial eólico está sendo avaliado) pode ser visto nas figuras 4.1.1 e 4.1.2.

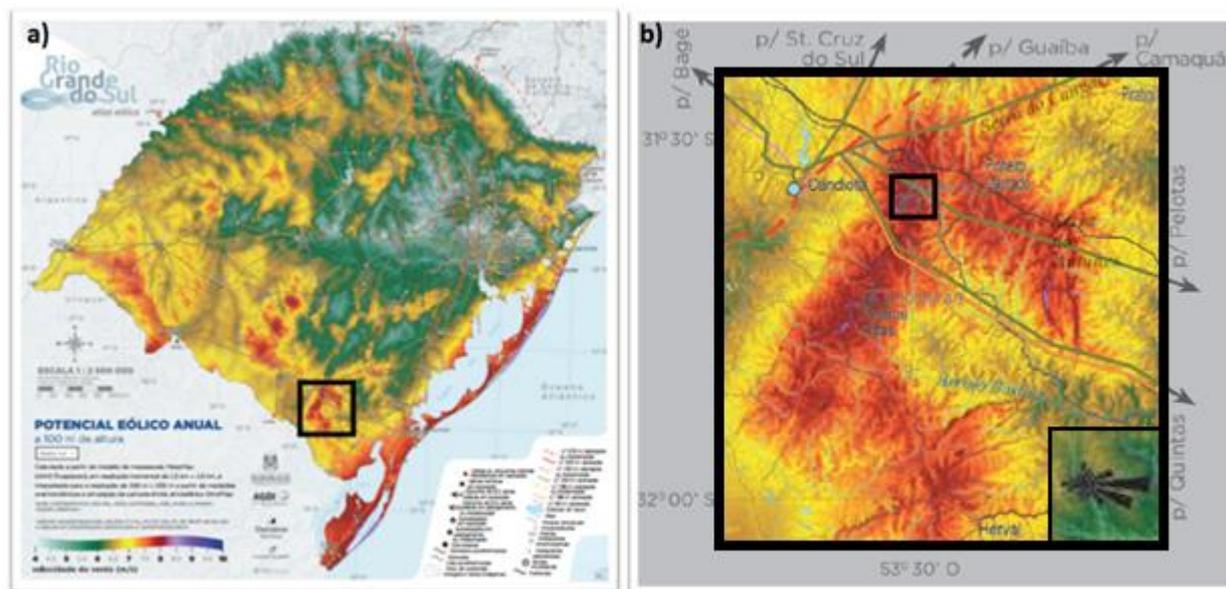


Figura 4.1.1 – (a) Seleção da mesorregião de interesse com o mapa do potencial eólico anual do AERS (2014). (b) Seleção da microrregião na ampliação do mesmo mapa. No canto inferior da figura, distribuição de frequência dos ventos com predominância leste.

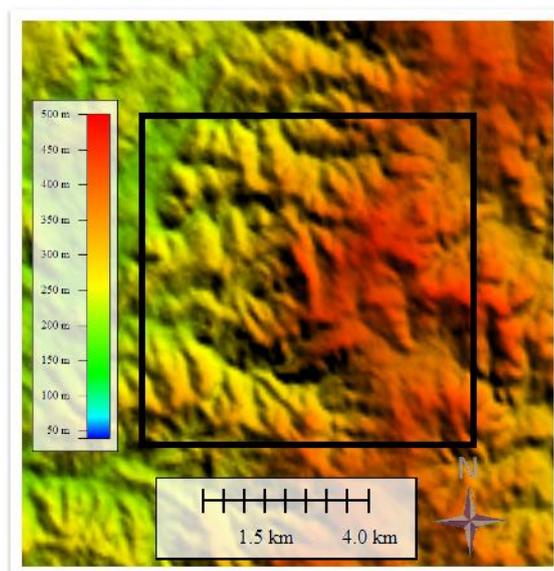


Figura 4.1.2 – Relevo em escala de cores do domínio final escolhido para o estudo de potencial eólico e *micrositing* no *software* Global Mapper.

#### 4.2 Condições de contorno

A metodologia de avaliação do potencial eólico em microescala atmosférica foi essencialmente numérica devido ao fato de não estarem disponibilizados, inicialmente, acesso aos dados de torres anemométricas ou de simulação em túnel de vento. A atmosfera foi considerada neutramente estratificada, conforme descrito em 2.1., de modo que efeitos de empuxo por diferença de temperatura foram desprezados.

O terreno estudado apresenta inclinações superiores a  $17^\circ$  em alguns pontos, caracterizando o mesmo como complexo, critério apontado por Zhang, 2015. Sob tais condições, e considerando que os obstáculos do terreno (árvores e colinas) são da ordem de 10 m de comprimento, a velocidade do vento da ordem de 10 m/s e a viscosidade do ar  $1,51 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , o número de Reynolds ( $Re$ ) facilmente ultrapassa um milhão. De acordo com Zhang, 2013, para um  $Re$  desta ordem de grandeza, indicam-se condições de contorno para um escoamento completamente turbulento.

O objetivo desta simulação é a modelagem da camada superficial da CLA, que só 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 fosse minimizado, e não porque houve interesse na avaliação do escoamento nestas alturas. Segundo Stangroom, 2004, a hipótese de parede deslizante para o topo do domínio é satisfatória, de modo que seja permitida a aceleração do escoamento caso a altura da CLA não seja, de fato, 1 km, o que seria inviável se utilizada a condição de simetria.

Utilizou-se a mesma condição para os lados do domínio partindo da hipótese de que o escoamento real, próximo às laterais, é paralelo às mesmas. Esta condição artificial geralmente introduz erros elevados nas proximidades, mas conforme se afasta da parede, o erro é reduzido.

Foi definida uma única rugosidade média para a superfície do terreno, de acordo com Stangroom, 2004. A introdução de um campo heterogêneo de rugosidades faria necessária a construção de uma malha computacional cujas primeiras células tivessem alturas diferentes, o que violaria alguns dos princípios de boas práticas em CFD apresentados por Blocken, 2007.

Conforme sugerido por Prospathopoulos e Voutsinas, 2006, a extensão da superfície do terreno na entrada do domínio em 1 km é necessária para obterem-se resultados razoáveis. A forma retangular da entrada, de altura constante, permite que o perfil logarítmico seja aplicado e que a velocidade no topo do domínio não varie espacialmente. A condição de entrada da velocidade corresponde ao perfil logarítmico da equação 2.2.1, enquanto que os parâmetros  $k$  e  $\epsilon$  foram baseados no trabalho de Castro *et al.*, 2003. Na saída do domínio, optou-se por pressão atmosférica constante. As condições de contorno são mostradas em detalha na Figura 4.2.1 e Tabela 4.2.1.

Os dados utilizados na definição das condições de contorno do modelo retirados do AERS, elaborado por Schubert e Eletrosul, 2014, estão listados na Tabela AII do apêndice com os respectivos mapas utilizados e as coordenadas. A rugosidade  $z_0$  e a velocidade de fricção  $u^*$  (0,493 m/s) foram calculadas através da equação 2.2.1, tendo-se os valores de velocidade para as alturas de 100 e 150 metros, conforme a Tabela AIV.1 do apêndice. A avaliação da sensibilidade do modelo às condições de contorno torna-se imprescindível se resultados consistentes são visados. Portanto, na seção 4.4, tal questão é abordada em maior detalhe.

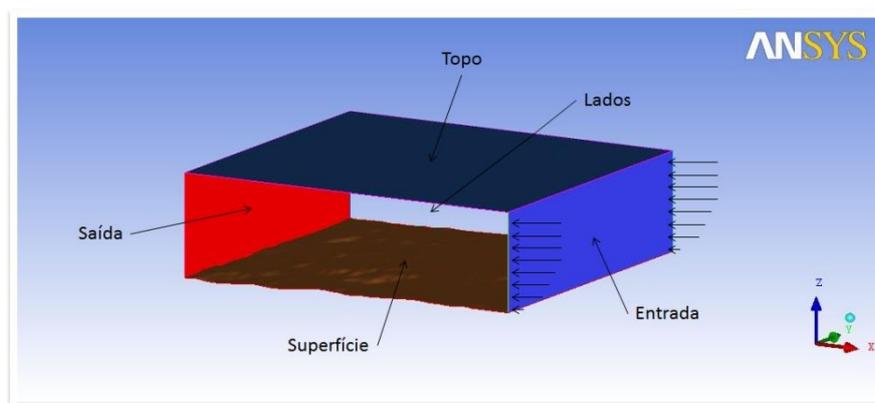


Figura 4.2.1 – Condições de contorno utilizadas na modelagem em ANSYS ICFD.

Tabela 4.2.1 – Condições de contorno aplicadas na modelagem. Condição de entrada baseada no trabalho de Castro et. al, 2003. Condição de superfície baseada no trabalho de Stangroom, 2004.

Entrada		Lados	Saída		Superfície		Topo
<i>Velocity Inlet</i>		<i>Free-slip wall</i>	<i>Pressure Outlet</i>		<i>Rough wall</i>		<i>Free-slip wall</i>
$u(z)$ [m/s]	$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} + 1 \right)$		Pressão estática manométrica [Pa]	0	$hs$ [m]	$7,5^*z_0$	
$k$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	$u_*^2 / C_\mu^{0,5}$						
$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]	$u_*^3 / k(z + z_0)$						

### 4.3 Discretização do terreno

A modelagem digital do terreno foi empregada utilizando-se de dados da SRTM 90 (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA/NIMA (*National Aeronautics and Space Administration and National Imagery and Mapping Agency*), 1999, e distribuída pela USGS (*United States Geological Survey*). Os dados retirados de Jarvis, 2008, consistem em um conjunto de pontos de elevação em 3D, apresentam uma resolução horizontal e vertical de, aproximadamente, noventa metros e trinta centímetros, respectivamente. O tratamento e exportação dos dados (matriz de pontos) foram feitos através do *software Global Mapper* e pode ser visto na Figura 4.1.2. A transformação destes dados em uma malha computacional 3D hexaédrica foi realizada no *software ANSYS ICEM*. Este tipo de malha foi escolhido devido a maior facilidade de manipulação do refino de malha nas análises de sensibilidade que foram realizadas. Trabalhos conceituados internacionalmente na área de *wind energy and engineering*, como Castro *et al.*, 2003 e 2008, utilizaram alturas do primeiro volume de controle na faixa de 0,6 à 3 m, para terrenos complexos cujas dimensões são da mesma ordem de grandeza da região aqui estudada. Um dos maiores problemas encontrados na modelagem por CFD nesta área, enfaticamente discutido por Blocken *et al.*, 2007, refere-se ao fato de que conforme a rugosidade do terreno modelado aumenta, é impossível que obtenha-se uma malha altamente refinada próxima ao solo. Conforme debatido pelo mesmo, existem algumas metodologias que podem contornar este problema, mas não há consenso com relação à eficácia destas.

### 4.4 Qualidade de malha e dimensões do domínio

Para Stangroom, 2004, qualidade de malha significa que os erros de discretização da modelagem são desprezíveis. É extremamente difícil obter independência de malha em simulações da CLA em terrenos reais. Portanto, é importante que se compreenda a sensibilidade da modelagem numérica com relação à concentração e ao grau de refino da malha computacional. Na base do domínio computacional existem elevados gradientes de velocidade e turbulência, assim, é essencial que uma malha de alto refino, que cresce suavemente com a altura, seja configurada.

A sensibilidade dos campos de velocidade ao refino de malha foi realizada nos casos 1 a 5, apresentados na Tabela 5.1.1. Depois de selecionada a resolução de malha adequada, foi realizado um estudo da sensibilidade do mesmo campo de velocidades com relação a três alturas do domínio. Finalmente, simularam-se dois domínios computacionais estendidos nas fronteiras. A malha utilizada no estudo de *micrositing* é apresentada na Figura AIV.1 do apêndice IV.

#### 4.5 Homogeneidade do perfil da CLA

O surgimento de gradientes de velocidade na direção do escoamento em perfis da CLA supostamente “desenvolvidos” pode afetar a precisão dos resultados de CFD de processos atmosféricos. Blocken *et al.*, 2007, recomendam que os modelos de turbulência que estiverem no escopo do estudo sejam testados em um domínio plano e bidimensional.

Partindo-se disto, os modelos de turbulência apresentados na seção 2.4 foram avaliados em um domínio bidimensional de malha hexaédrica de 29.141 elementos, com configuração similar à malha do caso 9 (Tabela 5.1.1).

#### 4.6 *Micrositing*

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) Inclinação do escoamento menor que 5° (com relação à direção do eixo da turbina);
- IV) Distância mínima das fronteiras do domínio de 2 km;
- V) Minimizar a área da fazenda respeitando o critério de Zhang, 2015.

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. Buscou-se instalar os aerogeradores, também, em regiões onde a inclinação do escoamento é mínima, limitando a carga sobre os componentes mecânicos e os custos de manutenção.

O aerogerador foi escolhido com base no catálogo da fabricante Enercon, 2015, seguindo a norma IEC 61400-1, 2005, que pode ser vista na Tabela A.2 do Anexo I.

#### 4.7 Energia Anual Gerada

A EAG e fatores de capacidade do parque são estimados pelas equações 2.3.2 à 2.3.5. Com as velocidades na altura do rotor (Tabela AIV.1, do apêndice IV), e os dados de vento do atlas (Tabela AIV.2, do apêndice IV), calcula-se a frequência relativa  $f(u_r)$ . Tendo-se a curva de potência do aerogerador (Figura A.1, do anexo I), calcula-se a EAG e o FC pelas equações 2.3.4 e 2.3.5, respectivamente. É importante salientar que as perdas de energia por transmissão e outros fatores são desconsideradas.

### 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se que as simulações em CFD convergiram, dado que as velocidades monitoradas ao longo do domínio não variaram mais ao aproximar-se do critério de convergência. Utilizou-se como critério de convergência o resíduo RMS (*Root Mean Square*) de  $1 \times 10^{-6}$  para todas equações resolvidas. Os tratamentos numéricos da turbulência e advecção foram realizados em alta resolução.

#### 5.1 Qualidade de malha e dimensões do domínio

Nos três primeiros casos, comparou-se a variação da velocidade no ponto avaliado mantendo-se todas as dimensões e parâmetros fixados, exceto a altura do primeiro volume de

controle (VC) próximo ao solo, bem como o taxa de crescimento do mesmo. Para o prosseguimento do estudo, optou-se pela malha do caso 3, que apresenta uma variação na velocidade de 0,13% em relação ao caso 2. O refino da malha próxima ao solo, como descrito anteriormente por Blocken *et al.*, 2007, fica limitado pela rugosidade do terreno.

Nos casos 3, 4 e 5, investigou-se a sensibilidade com relação ao refino horizontal da malha. A diferença relativa entre os casos diminuiu consideravelmente de 0,64% para 0,14%, optando-se pela malha do caso 4 devido à boa relação custo computacional-benefício.

Comparando-se os casos 4, 6 e 7, observou-se que a velocidade no ponto avaliado diminuiu, o que provavelmente está associado à demasiada aceleração do escoamento devido ao efeito de bloqueio para a altura de domínio de 1000 m. A redução significativa da diferença relativa entre os casos 6 e 7 mostrou que a influência da altura do domínio é menor.

Optou-se pela altura de 2500 m para os casos 8 e 9, onde se avaliou a sensibilidade do modelo a aumentos de 500 e 1000 m nas dimensões  $x$  e  $y$  do domínio. A velocidade aumentou consideravelmente para os dois casos, indicando que as dimensões iniciais do domínio tendenciavam negativamente os resultados. Limitações na capacidade de processamento dificultaram o prosseguimento da análise de sensibilidade, assim, utilizou-se a malha do caso 9 para o estudo de *micrositing*.

Tabela 5.1.1 – Dimensões do domínio ( $L_i$ ), número de nós ( $nn_i$ ), altura do primeiro volume de controle da superfície ( $hz1$ ), velocidade do centro do domínio a 80 metros de altura e diferença relativa de  $u(80)$  com relação ao próximo caso.

	$L_x$ [m]	$L_y$ [m]	$L_z$ [m]	$nn_x$	$nn_y$	$nn_z$	$hz1$ [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	-

## 5.2 Homogeneidade do perfil da CLA

Observou-se que a maior homogeneidade da camada limite atmosférica, em terreno plano bidimensional, foi obtida com o modelo  $k-\epsilon$  com coeficientes modificados, conforme Castro *et al.*, 2003. Os modelos  $k-\epsilon$  padrão, RNG  $k-\epsilon$  e SST apresentaram um elevado ganho de *momentum* próximo ao nível do solo, conforme pode ser visualizado na Figura AIV.2 do apêndice IV. Devido ao desempenho superior do modelo  $k-\epsilon$  modificado neste quesito, este foi utilizado no estudo de *micrositing* que segue.

## 5.3 *Micrositing*

O campo de velocidades para a altura de 75 m, relativo ao nível do solo, indicou que a microrregião ultrapassa a velocidade equivalente à classe II (IEC) de 8,5 m/s, o que pode ser visto na Figura 5.3.1. Ainda, devido à falta de informação com relação aos níveis de turbulência do regime dos ventos (de escala temporal muito superior à turbulência induzida pelo terreno), o que só pode ser obtido com a devida instalação de uma torre anemométrica, optou-se pela classe de aerogeradores Ia, que apresenta elevada robustez a regimes severos de vento. Optou-se pelo modelo E-70 E4 (Enercon, 2015) de classe Ia e potência nominal 2,3 MW, cujo coeficiente de potência  $C_p$  é máximo na faixa de 8 a 10 m/s.

Como já esperado, a aceleração do escoamento próximo ao topo das elevações, devido ao efeito de bloqueio, aumentou consideravelmente o potencial eólico do local, apresentando velocidades (a 75 m de altura) superiores em até 23% com relação à condição de entrada. Como a energia gerada aumenta ao cubo com a velocidade, esta aceleração pode representar um aumento de até 88% em termos de produção de energia elétrica. Ao total, foram instalados quarenta aerogeradores atendendo aos critérios descritos em 4.3. A instalação de mais aerogeradores violaria alguns dos critérios, expondo os mesmos a regiões com possível descolamento da CLA e esteira. O layout de *micrositing* pode ser visto na Figura 5.3.1.

Os topos de morro apresentaram outra peculiaridade descrita por Zhang, 2015, que é a redução da inclinação do escoamento. Assim, os aerogeradores foram todos posicionados em pontos onde a inclinação do regime de ventos fica na faixa de  $\pm 3^\circ$  (Figura AIV.3 do apêndice IV), reduzindo a carga sobre os componentes mecânicos do equipamento.

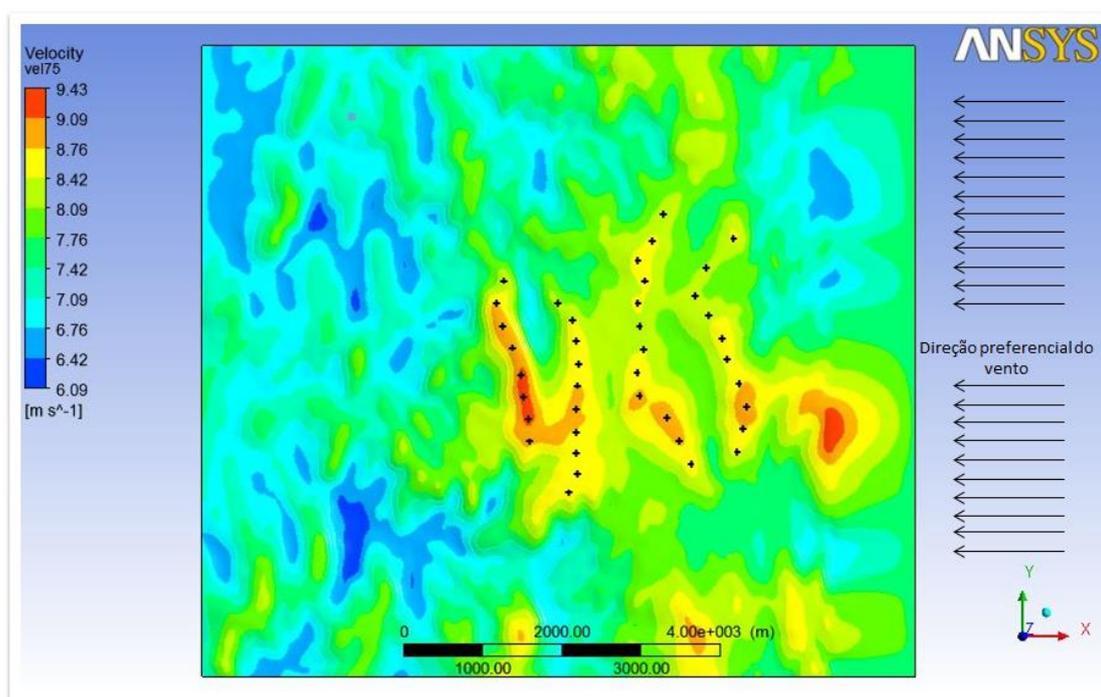


Figura 5.3.1 – *Micrositing* dos aerogeradores Enercon E-70 (em preto) sob os contornos de velocidade à altura relativa de 75 metros.

#### 5.4 Energia Anual Gerada

A estimativa da EAG para o parque eólico Pinheiro Machado I (nome fictício) foi bastante satisfatória se comparada com outros parques eólicos. Os resultados deste capítulo foram apresentados, em detalhe, na Tabela AI do apêndice. Baseado em dados de consumo da região sul do Brasil no ano de 2012, de EPE, 2013, o *site* teria capacidade para abastecer uma população superior a cem mil habitantes (Tabela 5.4.1).

Segundo 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 Enercon E-70 E4, é muito positivo, tendo em vista que a velocidade nominal dos mesmos fica em torno de 15 m/s, enquanto que a velocidade anual média nos aerogeradores é levemente inferior a 9 m/s.

Tabela 5.4.1 – Estimativa da capacidade de fornecimento de energia para o parque Pinheiro Machado I (baseado em EPE, 2013).

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

## 6. CONCLUSÕES

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

A região de Pinheiro Machado é bem provida 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, 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, apesar da falta de dados e recursos financeiros nesta etapa inicial de projeto, foi possível avaliar o potencial eólico do *site* através da identificação e quantificação dos efeitos da velocidade incremental, que pode 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 de Pinheiro Machado I para 298 GWh com quarenta aerogeradores, suficiente para abastecer uma cidade de mais de cem mil habitantes. O elevado FC de 40% superou consideravelmente a média global (30%, de acordo com Zhang, 2015) apesar da velocidade nominal do modelo de aerogerador especificado ser muito superior à velocidade média anual do *site*.

Tendo em vista que a região apresenta ventos com excelentes características para o aproveitamento do recurso eólico, e que os resultados aqui apresentados indicam um *site* bastante promissor, classificou-se a região a oeste de Pinheiro Machado como apta para estudos de viabilidade mais aprofundados.

No que concerne o escopo de futuros trabalhos, existem diversas questões a serem abordadas, tanto no âmbito da modelagem em CFD como do projeto de viabilidade de obra. Do ponto de vista legal, as etapas de EIA (Estudo de Impacto Ambiental) e diálogo com *stakeholders* devem ser executadas em paralelo, respeitando-se a legislação, normas e boas práticas vigentes no Brasil. No âmbito técnico, é fundamental que torres anemométricas sejam instaladas no local. O posicionamento das mesmas deve ser preferencialmente baseado nos resultados apresentados neste trabalho, respeitando as demandas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Diversos aspectos podem ser melhorados na análise em CFD, o que não representa, necessariamente, uma falha técnica deste trabalho. As questões a seguir são complexas e presentemente discutidas por grupos de pesquisa que trabalham no estado-da-arte deste campo.

O tratamento homogêneo da rugosidade superficial precisa ser revisto, e, caso identificada a necessidade de um tratamento heterogêneo, a malha computacional gerada deve seguir as recomendações de Blocken et. al., 2007.

No estudo de *micrositing*, a influência dos aerogeradores no campo de velocidades e a modelagem das esteiras altamente turbulentas podem ser implementadas, a fim de quantificar tais perdas e reposicionar as turbinas, maximizando a produção.

O tratamento isotrópico da turbulência pelos modelos utilizados simplifica em muito a real complexidade de fenômenos como descolamento da CLA e recirculação. Por isso, apesar da modelagem em 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 do mesmo poderia trazer respostas que a formulação RANS não pode.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica: **“Nosso Setor”**, <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>. Acessado em 30/09/2015.

Ayotte, K.W.: **“Computational Modelling for Wind Energy Assessment”**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, pp 1571–1590, 2008.

ANSYS: **“ANSYS CFX-Solver Theory Guide”**, ANSYS Inc., Release 15.0, 2013.

Beljaars, A. C. M.; Walmsley, J. L.; Taylor, P. A.: **“A Mixed Spectral Finite-Difference Model for Neutrally Stratified Boundary-Layer Flow over Roughness Changes and Topography”**, Boundary-Layer Meteorology, vol. 38, pp 273–303, 1987.

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

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

Castro, F.A.; Palma, J.M.L.M.; Ribeiro, L.F.; Rodrigues, A.H.; Pinto A.P.: **“Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micro-siting in complex terrain”**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, pp 2308– 2326, Elsevier, 2008.

Conan, B.: **“Wind resource assessment in complex terrain by wind tunnel modelling”**. Other. Université d'Orléans, 2012.

Enercon: **“Product overview”**, Enercon, 2015.

European Commission: **“EU Guidance on Wind Energy Development in Accordance with the EU Nature Legislation”**, European Union, 2011.

IEA: **“World Energy Outlook 2014”**, <http://www.iea.org/textbase/npsum/weo2014sum.pdf>. Acessado em 30/09/2015.

IEC 61400-1: **“Wind Turbine – Part 1: Design Requirements”**, Ed. 3, 2005.

IRENA: **“REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap”**, June 2014. IRENA, Abu Dhabi.

GWEC: **“Wind in Numbers”**, <http://www.gwec.net/global-figures/wind-in-numbers/>. Acessado em 30/09/2015.

Jarvis, A.: **“Hole-filled SRTM for the globe Version 4”**, 2008. [www.cgiar-csi.org/data/srtm-90mdigital-elevation-database-v4-1](http://www.cgiar-csi.org/data/srtm-90mdigital-elevation-database-v4-1). Acessado em 10/06/2015.

Kim, H.; Patel, V.: 2000, **“Test of Turbulence Models for Wind Flow over Terrain with Separation and Recirculation”**, Boundary-Layer Meteorology, vol .94, pp 5–21, 2000.

Launder, B. F.; Spalding, D. B.: **“Mathematical Model of Turbulence”**, Academic Press, London, pp. 169, 1972.

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

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

Menter, F.: **“Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”**, AIAA, vol. 32(8), pp. 1598-1605, 1994.

Montezano, B.E.M.: **“Estratégias para identificação de Sítios Eólicos promissores usando Sistema de Informação Geográfica e Algoritmos Evolutivos”**, COPPE (UFRJ), 2012.

Prospathopoulos, J.; Voutsinas, S.G.: **“Implementation issues in 3D wind flow predictions over complex terrain”**, Journal of Solar Energy Engineering, vol. 128, 2006.

Schubert, C.; Eletrosul: **“Atlas Eólico do Rio Grande do Sul 2014”**, AGDI, 2014.

Stangroom, P.: **“CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain”**, The University of Nottingham, United Kingdom, 2004.

Yakhot, V; Orszag. S.A.: **“Renormalization-Group Analysis of Turbulence”**, Physical Review Letters vol. 57, pp. 1722, 1986.

Wilcox, D.C.: **“Turbulence Modeling for CFD”**, DCW Industries, Anaheim, CA – USA, 1998.

Zhang, M.H.: **“Wind Resource Assessment and Micro-Siting: Science and Engineering”**, Wiley, 2015.

Zhang, X.; Song, M.X.; Chen, K.; He Z.Y.: **“Wind resource assessment on complex terrain based on observations of a single anemometer”**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 125, pp 22-29, Elsevier, 2014.

## Anexo I – Classes de terreno, aerogerador e curva de potência

Tabela A.1 – Valores típicos de  $z_0$  para diferentes características de superfície (European Commission, 2011).

Terrain surface characteristics	Roughness length $z_0$ (m)	Roughness class
Forest and urban areas	0.7 ~ 1.0	
Suburbs and sheltering belts	0.3 ~ 0.5	3
Farmland with closed appearance, many trees, bushes	0.1	2
Farmland with open appearance, very few buildings, trees, etc.	0.02 ~ 0.05	1
Mown grass and airport runway areas	0.01	
Smooth snow surface	0.001	
Smooth sand surface	0.0003	
Water area	0.0002	0

Tabela A.2 – Classificação de turbinas eólicas de acordo com a IEC 61400-1, 2005, para densidade do ar de  $1,225 \text{ kg/m}^3$ .

Wind turbine class	I	II	III	S
$V_{ave}$ (m/s)	10	8.5	7.5	User defined
$V_{ref}$ (m/s)	50	42.5	37.5	
$V_{50,gust}$ (m/s)	70	59.5	52.5	
$I_{ref}$				
	A	0.16		
	B	0.14		
	C	0.12		

As turbinas são divididas em classes I, II e III, para velocidade do vento, bem como A, B e C, para intensidade média de turbulência  $I_{ref}$ .  $V_{ave}$  é velocidade média anual na altura da nacelle,  $V_{ref}$  a velocidade extrema medida sob 10 minutos com período de recorrência de 50 anos e  $V_{50,gust}$  a velocidade extrema medida sob 3 segundos com período de recorrência de 50 anos, todas em [m/s]. No presente trabalho,  $V_{ave}$  foi tomada como a média dentre todos os aerogeradores instalados, de modo a representar o comportamento global do site.  $V_{50,gust}$  foi retirada de Schubert e Eletrosul, 2014, e encontra-se como item #6 na Tabela AIV.1 do apêndice.

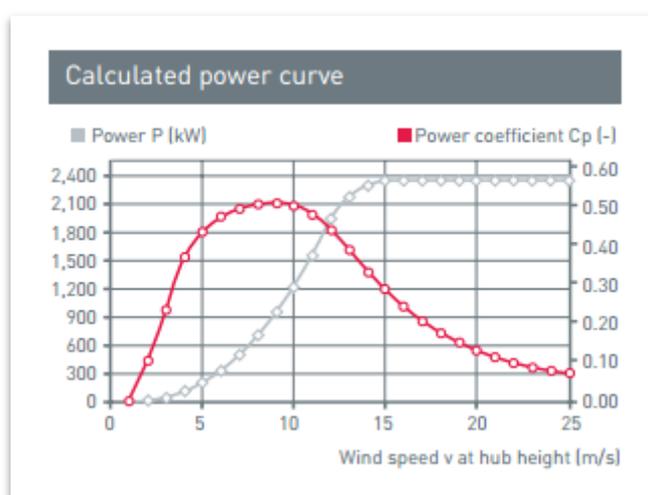


Figura A.1 – Curva de potência do aerogerador modelo Enercon E-70 E4 (2,3 MW). Retirado de Enercon, 2015.

## Apêndice I – Modelo $k$ - $\varepsilon$ padrão e com coeficientes modificados

O modelo de turbulência de duas equações  $k$ - $\varepsilon$ , desenvolvido por Launder e Spalding, 1974, não só resolve o transporte da turbulência, mas também a sua taxa de dissipação. Assim, a viscosidade turbulenta introduzida em 2.4 é redefinida como

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (\text{AI.1})$$

onde  $C_\mu$  é uma constante (definida na Tabela AI.1),  $k$  [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ] é a energia cinética turbulenta por unidade de massa e  $\varepsilon$  [ $\text{m}^2/\text{s}^3$ ] é a taxa de dissipação da energia cinética por efeitos viscosos. A equação (2.4.4) assume, portanto, as formas abaixo:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \partial k}{\partial x_i} \right] \quad (\text{AI.2})$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \quad (\text{AI.3})$$

Nestas duas equações, surgem as constantes  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$ , definidas na Tabela AII.1, do Apêndice II. Apesar da robustez e baixo-custo computacional, este modelo geralmente não é adequado para simulações da CLA devido ao tratamento isotrópico da turbulência, conforme Zhang, 2015. Modificações neste modelo foram propostas a fim de contornar a deficiência do mesmo para escoamentos com descolamento da camada limite e sobre superfícies curvas – um deles sendo o  $k$ - $\varepsilon$  padrão com coeficientes modificados segundo Beljaars et. al., 1987, e o outro o  $k$ - $\varepsilon$  RNG. Os coeficientes propostos são apresentados na tabela AII.1 do Apêndice II.

## Apêndice II – Modelo $k$ - $\varepsilon$ RNG

O modelo  $k$ - $\varepsilon$  RNG foi proposto por Yakhot e Orzag, 1986, e é baseado no modelo  $k$ - $\varepsilon$  padrão. A diferença é que as constantes previamente apresentadas são modificadas, e  $C_{\varepsilon 1}$  é combinada com a função  $C_{\varepsilon 1RNG}$  (equação AII.1)

$$C_{\varepsilon 1RNG} = 1,42 \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{4,38}\right)}{1 + \beta_{RNG} \eta^3} \quad (\text{AII.1})$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P_k}{\rho C_{\mu RNG} \varepsilon}} \quad (\text{AII.2})$$

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (\text{AII.3})$$

onde  $\beta_{RNG}$  ( $=0,012$ ) e  $C_{\mu RNG}$  são constantes do modelo e  $P_k$  é a geração de turbulência devido aos efeitos viscosos em [ $\text{N}/\text{m}^3$ ]. As demais constantes do modelo (não mostradas explicitamente), são definidas na tabela AII.1.

Tais modificações aumentam significativamente o desempenho do modelo para escoamentos onde ocorre separação da camada limite, e ainda assim mantendo a baixa demanda de processamento.

Tabela AII.1 – Constantes dos modelos  $k$ - $\varepsilon$  padrão, modificado segundo Beljaars et. al., 1987 e  $k$ - $\varepsilon$  RNG.

Modelo	$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
$k$ - $\varepsilon$	0,09	1,44	1,92	1,0	1,3
$k$ - $\varepsilon$ modificado	0,033	1,44	1,92	1,0	1,85
$k$ - $\varepsilon$ RNG	0,085	eq. (AII.1)	1,68	0,7179	0,7179

### Apêndice III – Modelo SST (*Shear Stress Transport*)

O maior problema com o modelo  $k$ - $\omega$  de Wilcox, 1998, é a forte sensibilidade às condições da corrente livre do escoamento, de modo que os resultados variam consideravelmente com o valor do parâmetro  $\omega$  atribuído nas condições de contorno. O modelo SST baseado em  $k$ - $\omega$  desenvolvido por Menter, 1994, consiste na mistura do modelo  $k$ - $\omega$  próximo à superfície e do  $k$ - $\varepsilon$  distante da parede. Isto é feito através da multiplicação da formulação de Wilcox por uma função de mistura,  $F_1$ , e a transformação do modelo  $k$ - $\varepsilon$  para uma formulação  $k$ - $\omega$ , seguida da multiplicação desta por  $(1-F_1)$ .  $F_1$  assume o valor de 1 na parede e 0 distante dela e, assim, as duas formulações se misturam. Um limitador é aplicado a fim de contornar a superestimação da viscosidade de turbilhão, uma das deficiências que motivou a formulação do SST. O modelo, portanto, traz as vantagens e reduz as desvantagens dos modelos  $k$ - $\varepsilon$  e  $k$ - $\omega$ . A viscosidade turbulenta (AIII.1) permanece igual à de Wilcox, 1998, enquanto que as equações para  $k$  e  $\omega$  assumem as formas (AIII.2) e (AIII.3), respectivamente.

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (\text{AIII.1})$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \left( \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (\text{AIII.2})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \left( \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) \right] + (1-F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 \quad (\text{AIII.3})$$

As constantes do modelo SST são uma combinação linear das constantes dos dois modelos base (tabela AIII.1), conforme mostra a equação (AIII.4).

$$\Phi_3 = F_1 \Phi_1 + (1-F_1) \Phi_2 \quad (\text{AIII.4})$$

Tabela AIII.1 – Constantes dos modelos base utilizadas no cálculo das constantes do modelo SST desenvolvido por Menter, 1994. Fonte: ANSYS CFX 13.0 - Solver Theory guide.

$\beta'$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\sigma_{k1}$	$\sigma_{\omega 1}$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\sigma_{k2}$	$\sigma_{\omega 2}$
0,09	5/9	0,075	2	2	0,44	0,0828	1	1/0,856

## Apêndice IV – Informações e detalhes da modelagem

Tabela AIV.1 – Dados retirados de Schubert e Eletrosul, 2014, utilizados na modelagem em CFD. Mapas georreferenciados em *Global Mapper* para extração de coordenadas.

#	Dado	Valor	Mapa do AERS (2014)	Coordenadas
1	Vel. anual à 100 m [m/s]	8,0	7.4	31°35'44,132"S 53°29'14,483"O
2	Vel. anual à 150 m [m/s]	8,5	7.6	
3	Fator de forma $k$	2,5	7.9	
4	$\rho$ média anual [kg/m <sup>3</sup> ]	1,15	7.10	
5	$z_0$ [m]	0,153	6.3	
6	Vel. de rajada (50 anos) [m/s]	52	7.8	

Tabela AIV.2 – Velocidades médias anuais na altura dos rotores ( $u_r$ ) para os aerogeradores Enercon E-70 E4 e as respectivas EAGs.  $u_r$ , EAG (efetiva e nominal) e FC do site.

#AG	$u_r$ [m/s]	EAG [GWh]	#AG	$u_r$ [m/s]	EAG efetiva [GWh]
1	9,31	8,34	23	8,49	7,04
2	9,27	8,27	24	8,55	7,14
3	9,25	8,25	25	8,60	7,22
4	8,94	7,77	26	8,64	7,28
5	9,11	8,02	27	8,60	7,22
6	9,10	8,02	28	8,35	6,82
7	8,81	7,56	29	8,91	7,71
8	8,39	6,87	30	8,70	7,39
9	8,22	6,60	31	9,04	7,92
10	8,56	7,16	32	8,86	7,64
11	8,68	7,36	33	8,74	7,45
12	8,76	7,48	34	8,78	7,50
13	8,91	7,72	35	8,63	7,27
14	8,98	7,83	36	8,77	7,49
15	8,92	7,74	37	8,45	6,98
16	8,90	7,70	38	8,34	6,79
17	8,81	7,55	39	8,24	6,62
18	8,69	7,36	40	8,54	7,12
19	8,99	7,84	Site	8,75	298,33
20	8,93	7,75	EAG nominal		745,88
21	8,73	7,43	FC do site		0,40
22	8,52	7,10			

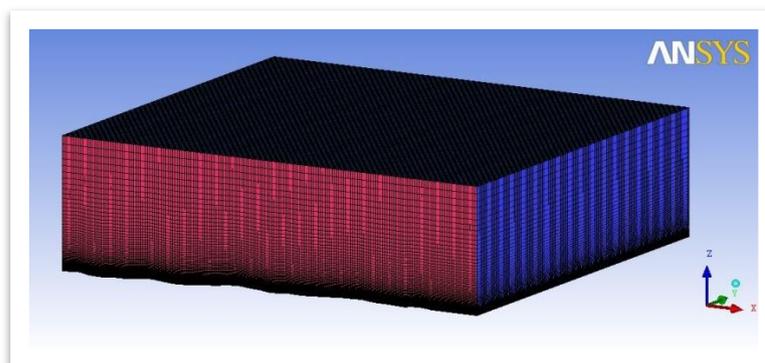


Figura AIV.1– Malha computacional hexaédrica de 2.098.152 elementos utilizada no estudo de *micrositing* desenvolvida no software ANSYS ICEM-CFD.

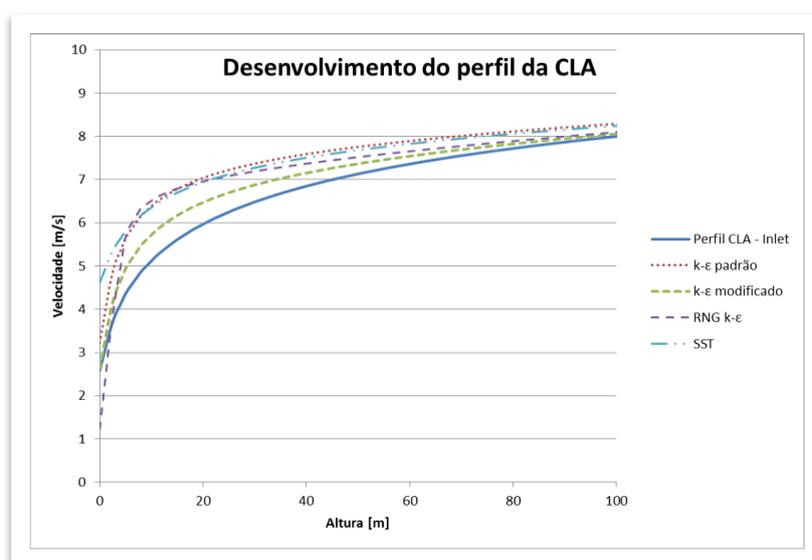


Figura AIV.2 – Comparação entre perfis da CLA na entrada e no meio do domínio de diferentes modelos de turbulência em terreno plano 2D.

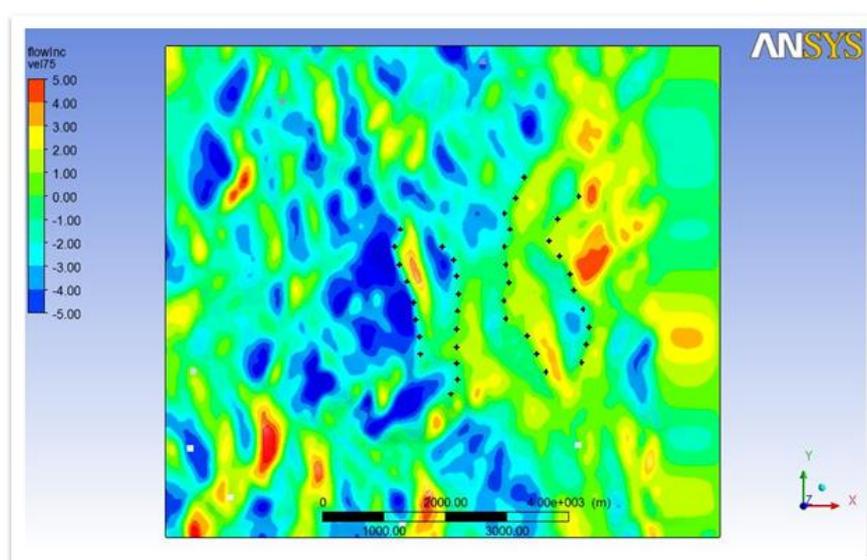


Figura AIV.3 – *Micrositing* dos aerogeradores Enercon E-70 (em preto) sob os contornos de inclinação do escoamento (em graus) à altura relativa de 75 metros.