

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

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO POTENCIAL EÓLICO EM UM TERRENO COMPLEXO POR  
CFD E WASP

por

Rodrigo Cerqueira de Campos

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, dezembro de 2016



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

AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO POTENCIAL EÓLICO EM UM TERRENO COMPLEXO POR  
CFD E WASP.

por

Rodrigo Cerqueira de Campos

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

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

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Letícia Jenisch Rodrigues

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 07 de dezembro de 2016.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, João e Maria por todo o apoio e compreensão, sempre propiciando o suporte necessário durante a graduação;

ao meu irmão Rafael, pelo incentivo e conselhos durante a graduação;

à minha noiva Hellen, pelo apoio e companheirismo neste período;

agradeço à minha professora e orientadora, Dr<sup>a</sup> Adriane Prisco Petry, pelo tempo e conhecimento disponibilizado ao longo do trabalho;

à UFRGS, pela excelente formação durante o curso;

à HIDROPAN, pela disponibilização das informações climáticas;

à DTU Wind Energy, pelo fornecimento de licença educacional gratuita do WAsP.

Campos, R. C. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO POTENCIAL EÓLICO EM UM TERRENO COMPLEXO POR CFD E WASP**. 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## RESUMO

A avaliação do potencial eólico em determinada região é uma etapa crucial do projeto para definição da viabilidade de instalação de um parque eólico no local. Apesar da existência de diversos métodos de avaliação, todos apresentam algum problema, como a necessidade de elevado recurso computacional para métodos mais precisos, ou a possibilidade de resultados não condizentes com a realidade devido às simplificações. O presente trabalho estuda a distribuição de velocidades do vento em um terreno complexo, situado próximo ao município de Panambi-RS, por dois métodos: através de simulações em CFD, utilizando o *software* comercial Ansys Fluent, método mais complexo e exige tempo e recursos computacionais elevados; e através do *software* WASP (*Wind Atlas Analysis and Application*), um método mais simples, mas que pode divergir da realidade em certos casos. Foi avaliada a velocidade média do vento obtida por ambos os métodos em 4 pontos diferentes, a 60, 80 e 100 metros de altura, e comparadas entre si. As velocidades obtidas através da modelagem por WASP foram menores que as obtidas por dinâmica dos fluidos computacional em todas as alturas avaliadas, sendo a maior variação de aproximadamente 1,3 m/s a 60 m de altura, mas foi observado que os resultados tendem a convergir com o aumento da altura. Através das velocidades médias calculadas, foi avaliado a densidade de potência eólica nos mesmo pontos, para cada altura, bem como a diferença percentual da densidade de potência em cada ponto. Finalmente, conclui-se que em casos que a altura de interesse é relativamente baixa, os métodos tendem a divergir, e a diferença do potencial é consideravelmente alta. Porém, para alturas mais altas, os resultados tendem a convergir, com variações menores entre os resultados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluent, WASP, Densidade de Potência, Terreno Complexo.

Campos, R. C. **COMPARATIVE EVALUATION OF WIND POTENTIAL IN A COMPLEX TERRAIN USING CFD AND WASP**. 2016. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

## **ABSTRACT**

The evaluation of wind potential in a given region is a crucial step in the project to define the viability of installing an on-site wind farm. Despite the existence of several methods of evaluation, there's always a problem, such as the need for high computational resources for more precise methods, or the possibility that the results are not consistent with reality due to simplifications. The present work studies the distribution of wind speeds in a complex terrain, located near the city of Panambi-RS, by two methods: through CFD simulations, using the commercial software Ansys Fluent, a more complex and time-consuming method, which requires high computational resources; and through the WAsP (Wind Atlas Analysis and Application) software, a simpler method, but which may differ from reality in some cases. The average wind speed obtained by both methods was evaluated in 4 different spots, at 60, 80 and 100 meters in height, and compared to each other. The wind speeds obtained through WAsP modeling were lower than those obtained by computational fluid dynamics at all evaluated heights, with the greatest variation being approximately 1.3 m/s at 60 m, but it was observed that the results tend to converge as the height increases. Through the calculated wind speeds, the wind power density at the same points for each height were evaluated, as the percentage difference of the power density at each point. Finally, it is concluded that in cases where the height of interest is relatively low, the methods tend to diverge, and the potential difference is considerably high. However, as the height increases, the results tend to converge, with smaller variations between the results.

**KEYWORDS:** Fluent, WAsP, Power Density, Complex Terrain.

## ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
3 FUNDAMENTAÇÃO .....	3
3.1 Camada Limite Atmosférica (CLA) .....	3
3.2 Potencial Eólico.....	3
3.3 WAsP.....	3
4 METODOLOGIA.....	4
4.1 Modelagem do local estudado.....	4
4.1.1 Aquisição de dados anemométricos.....	5
4.2 Modelagem em CFD.....	6
4.2.1 Modelo Geométrico.....	6
4.2.2 Discretização do Modelo.....	6
4.2.3 Condições de Contorno.....	7
4.3 Modelagem pelo WAsP.....	8
4.4 Pontos de avaliação.....	9
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	10
5.1 Resultados obtidos por CFD.....	10
5.2 Resultados obtidos por WAsP.....	11
5.3 Potencial Eólico.....	13
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
Apêndice A: Função UDF para Perfil de Velocidades.....	16
Apêndice B: Imagem da malha selecionada.....	17

## 1. INTRODUÇÃO

Os ventos têm origem na dinâmica da atmosfera terrestre, e são causados, principalmente, pelos gradientes de pressão da atmosfera aliados ao próprio movimento rotacional da Terra. Os gradientes de pressão são causados pelos gradientes de temperatura resultantes do aquecimento heterogêneo da superfície pelo sol. Dessa forma, o vento e a energia eólica são efeitos permanentes da dinâmica terrestre e, portanto, uma fonte inesgotável de energia.

Um grande desafio enfrentado pela sociedade é atender à demanda sempre crescente de energia e, ao mesmo tempo, controlar as agressões ao meio ambiente, responsáveis por mudanças climáticas que alteram as características terrestres. A energia eólica é um recurso seguro e limpo, não há custos de aquisição e, conseqüentemente, riscos com preços de combustíveis a longo prazo. Este tipo de geração de energia apresenta uma certa vantagem em relação as demais fontes alternativas de energia por já existir tecnologia desenvolvida disponível para implementação.

A região latino-americana apresenta um vasto potencial para produção de energia elétrica através de fontes renováveis, como solar, hídrica e eólica. Até recentemente, a produção de eletricidade local manteve-se concentrada em hidrelétricas e biomassa, enquanto as demais fontes disponíveis em abundância mantiveram-se praticamente inexploradas. As alterações no índice de pluviosidade afetaram a produção de energia através de hidrelétricas (principal meio de produção no Brasil), e períodos de seca em regiões metropolitanas importantes, como São Paulo, têm um impacto considerável na economia nacional. Em conjunto aos impactos ambientais, a crescente demanda por eletricidade atraiu o interesse de investidores e organizações governamentais para a diversificação da matriz energética, com a instalação de usinas de biomassa, usinas solares e parques eólicos.

Em 2016, o Brasil já possui mais que 400 parques eólicos, com capacidade de produção acima de 10 GW, além de 7.72 GW em construção [ABEEólica, 2016], sendo um dos maiores produtores de energia eólica no mundo. A estimativa do governo, presente no Plano Decenal de Expansão de Energia, 2014, é de que a capacidade eólica instalada no Brasil chegue a aproximadamente 24 GW.

Apesar do rápido crescimento do setor eólico, o custo da eletricidade gerada ainda é elevado quando comparado a fontes previamente exploradas. Dessa forma, a otimização de projetos que visam a produção energética através de avaliações precisas de recursos disponíveis se torna necessária, a fim de se obter uma melhor expectativa da energia gerada por determinado projeto. Para tanto, diversas formas de avaliação destes recursos foram desenvolvidas, desde *softwares* de baixa complexidade, como o WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application*), até métodos de alta complexidade como a utilização de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

A partir do cenário exposto, o presente trabalho visa a avaliação do potencial eólico em um terreno considerado complexo, devido as ondulações topográficas, situado próximo ao município de Panambi. O estudo da distribuição de velocidade do vento foi realizado por CFD, através do pacote comercial Ansys Fluent e, paralelamente, através do WAsP. Utilizou-se informações sobre a topografia e dados anemométricos, e considerou-se a influência da rugosidade do terreno. Para fins de comparação, foi considerado quatro pontos diferentes no terreno para avaliação da velocidade média calculada e densidade de potência eólica.

Os dados meteorológicos de vento foram obtidos por uma torre instalada no local, financiada como parte do projeto de título “Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação do Potencial Eólico para Terrenos Complexos Visando Geração Distribuída”, desenvolvida pela HIDROPAN em parceria com a UFRGS e ANEEL.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na década de 90 iniciaram-se medidas em torres com alturas superiores a 20 m em alguns estados como Ceará, Bahia, Minas Gerais e Paraná. Ainda em meados de 1990, foi apresentado um relatório da Companhia Hidroelétrica do Vale do São Francisco (CHEFS), consolidando os primeiros dados com essa rede inicial, e mostrando o enorme potencial eólico, principalmente nos litorais do Rio Grande do Norte e do Ceará. Nos anos seguintes, outras iniciativas foram realizadas, como no Paraná, com 5 anos de dados medidos em 25 locais usando-se torres de 18 e 64 m, e resolução de 2 km na horizontal considerando efeitos de rugosidade e relevo do terreno.

Em 2001, foi publicado o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará, utilizando a metodologia do WindMap, para 50 e 70 m, com resolução de 500 m, demonstrando que o litoral era um ótimo potencial, com médias de 9 m/s. Nesta mesma linha, foi elaborado o Atlas Eólico do Rio de Janeiro, determinando o potencial eólico para as alturas de 50, 75 e 100 m, utilizando o modelo MesoMap, cujo núcleo é um modelo de mesoescala denominado MASS (*Mesoscale Atmospheric Simulation System*).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a fonte hidráulica é a maior fonte de energia explorada no Brasil. O problema desta matriz energética é a forte dependência do crescimento do país a fenômenos naturais. Além disso, é observado que em algumas regiões o recurso hidráulico está em seu limite. Considerando que a necessidade de crescimento nacional é imediata, e a importância da diversificação da matriz elétrica, a busca por formas eficientes de exploração dos recursos disponíveis aumentou nos últimos anos.

A crescente demanda por energia elétrica, associada à atual preocupação ambiental, tem levado muitos países a focarem na produção de energia através de fontes limpas e renováveis. Estima-se que 70% das emissões de gases poluentes são oriundas do setor energético, o que aumenta a preocupação com as mudanças climáticas. Portanto, o investimento em fontes energéticas limpas aumentou muito nos últimos anos, e tende a continuar em crescimento. Em 2014, por exemplo, o Brasil foi o quarto colocado no ranking internacional de expansão de potência eólica, e a previsão do governo, segundo o Plano Decenal de Energia, 2014, é que até o ano de 2024, o país tenha 24 GW de potência eólica instalada. O notável crescimento dos empreendimentos eólicos no Brasil, bem como os riscos no investimento em projetos eólicos estão diretamente ligados à precisão com que é feita a estimativa de energia gerada pelo parque eólico durante a fase de avaliação, denominada por anteprojeto, para assegurar a viabilidade econômica.

Um dos desafios da simulação do comportamento dos ventos em uma região é estimar seu comportamento ao longo da região de interesse sem, obrigatoriamente, ter medições realizadas em todos os pontos que se deseja avaliar. Com essa finalidade, emprega-se métodos de extrapolação de medidas realizadas em um ponto para se calcular o potencial eólico em uma determinada extensão. O primeiro *software* que ficou mais conhecido para cálculos de mapas eólicos foi o WAsP, desenvolvido pela *RISØ National Laboratory*, que é, atualmente, o mais utilizado no setor.

Os modelos empregados para prever o potencial eólico envolvem a análise de escoamentos turbulentos, cada qual com suas suposições. O WAsP, por exemplo, um método tradicional que utiliza um modelo de escoamento linearizado proposto em 1975 por Jackson e Hunt, resolve as equações de Navier-Stokes sob várias suposições, como escoamento de estado estacionário, advecção linear e problema de fechamento de turbulência de primeira ordem. O WAsP já foi validado por inúmeras comparações entre resultados obtidos e medições reais [Miljødata, 2002], mas ao desconsiderar os termos de segunda ordem, o WAsP falha na geração de bons resultados em topografias muito complexas.

Por outro lado, a dinâmica de fluidos computacional é uma ferramenta altamente difundida na engenharia, capaz de modelar as características de um fluxo complexo. Porém, o CFD exige recursos computacionais avançados, e mais tempo de cálculo. Apesar de já ser uma metodologia bem estabelecida em diversas áreas, a aplicação do CFD para análise da camada limite atmosférica ainda requer maiores validações.



### 3. FUNDAMENTAÇÃO

#### 3.1 Camada Limite Atmosférica (CLA)

Também conhecida como Camada Limite Planetária, exerce uma grande importância na análise do potencial energético de um parque eólico. Ela descreve a região em que há interferência de uma fronteira sólida em um escoamento livre causando a desaceleração do fluido devido ao atrito com a superfície. Portanto, a CLA é diretamente afetada pelas características da superfície terrestre, como a rugosidade causada por árvores, morros, vales e construções civis contidos nela.

O perfil de velocidades do vento na CLA pode ser modelado pela lei logarítmica, representada por

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (2.1)$$

na qual  $u(z)$  corresponde à velocidade do vento (m/s) na altura  $z$ ;  $k$  representa a constante de Von Kármán, igual a 0,4 [Schlichting, 1978];  $u^*$  é a velocidade de atrito e  $z_0$  é a rugosidade do terreno [Troen e Lundtang, 1990], ambos dependentes das características do terreno. Este modelo tende a divergir para alturas elevadas, superiores à CLA, porém, apresenta boas aproximações para camadas próximas ao solo.

#### 3.2 Potencial Eólico

A eletricidade gerada através de uma turbina eólica é oriunda da transformação da energia cinética do vento em movimento rotacional da turbina e, finalmente, em energia elétrica por um gerador. A potência disponível em determinado local pode ser descrita por

$$P_{DISP} = \frac{1}{2} \rho_{ar} A U^3, \quad (2.2)$$

na qual  $A$  representa a área do rotor da turbina (m<sup>2</sup>);  $U$  representa a velocidade do vento (m/s) e  $\rho_{ar}$  representa a massa específica do ar local (kg/m<sup>3</sup>).

Em alguns casos, a avaliação do potencial eólico é realizada através da Densidade de Potência, ou Fluxo de Potência Eólica, como é descrito no Atlas Eólico, 2002. A densidade de Potência eólica é normalmente apresentada em W/m<sup>2</sup>, e pode ser expressa por

$$P_{DENS} = \frac{1}{2} \rho V_N^3. \quad (2.3)$$

#### 3.3 WAsP

O WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application*) é um *software* comercial desenvolvido pela *RISØ National Laboratory*, da Dinamarca, que extrapola vertical e horizontalmente os dados de vento medidos em uma torre anemométrica, sobre diferentes tipos de topografia, visando a obtenção de uma grade de dados que descreva a climatologia dos ventos sobre a superfície da área a ser analisada e a uma determinada elevação, por meio de modelos que resolvem o fluxo eólico sobre diferentes tipos de topografia, e corrigindo os efeitos causados pela presença de obstáculos [MORTENSEN et al., 2005]. Seu objetivo principal é o cálculo do

potencial eólico de um local baseando-se em alguns dados de entrada, como dados do vento em um ponto representativo da região, orografia, obstáculos nas proximidades e rugosidade do terreno. O *software* permite, ainda, a simulação da geração de uma ou mais turbinas eólicas utilizando a respectiva curva de potência como entrada.

Segundo Bowen e Mortensen (2004), o modelo está baseado em condições atmosféricas que são predominantemente neutras, e correções para uma atmosfera não neutra podem ser aplicadas. Os desenvolvedores recomendam que o WAsP seja utilizado, preferencialmente, em terrenos com topografia de declives baixos ou suavizado.

Para realizar os cálculos, é utilizado o modelo numérico de escoamento linearizado baseado na teoria de Jackson-Hunt [Troen, 1990], desenvolvida em 1975 com o estudo de escoamento de vento sobre terrenos complexos. Este método propõe a divisão da camada limite atmosférica em uma camada próxima ao solo, onde os efeitos da viscosidade são relevantes, e outra região mais afastada que pode ser considerada invíscida [Jackson e Hunt, 1975]. Geralmente, os casos de interesse se encontram na camada inferior, onde os termos de segunda ordem da equação de Navier-Stokes são desconsiderados, e é definido apenas uma relação entre o perfil de velocidades e as tensões cisalhantes causadas pelo atrito com o solo [Jackson e Hunt, 1975].

O *software* resolve a equação linearizada de Navier-Stokes através de uma expansão de Bessel (*Bessel Expansion on a Zooming Grid*), que utiliza a teoria de Jackson e Hunt [Zhang, 2015]. Essa expansão produz uma malha radial sobre os pontos de interesse e integra o modelo de rugosidade superficial. Assim, simula o perfil de velocidades na camada limite inferior considerando tensões cisalhantes, advecção linear, gradientes de pressão e camada limite com espessura de aproximadamente 1 km [Zhang, 2015].

Utilizando dados discretos de velocidade e direção do vento, o WAsP gera um mapa estatístico com a distribuição de frequências de velocidade com curvas de Weibull, compondo uma rosa dos ventos e, finalmente, um mapa eólico do local.

Apesar de ser um método simples e rápido de se obter resultados, as simplificações dos modelos numéricos adotados pelo WAsP podem divergir muito da realidade quando aplicados sob condições não recomendadas [Bowen e Mortensen, 2004]. A utilização deste *software* é mais recomendada em terrenos suaves, nos quais os resultados obtidos foram validados em trabalhos anteriores, e considerados satisfatórios. Ao desconsiderar os termos de segunda ordem, os resultados em recirculações que podem ocorrer por descolamento do escoamento do ar com o solo divergem da realidade.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 Modelagem do Local Estudado

O local estudado está localizado a aproximadamente 23 km ao norte do município de Panambi, no Rio Grande do Sul, e apresenta aproximadamente 550 m de altitude. O terreno se encontra próxima a uma linha de transmissão que chega a Panambi, conforme ilustrado na Figura 4.1, o que facilita a instalação de um parque eólica nas proximidades.

O terreno se encontra entre três municípios, Panambi, Nova Ramada e Palmeira das Missões. Existem estradas que conectam as três cidades, o que facilita a logística envolvida no projeto eólico.

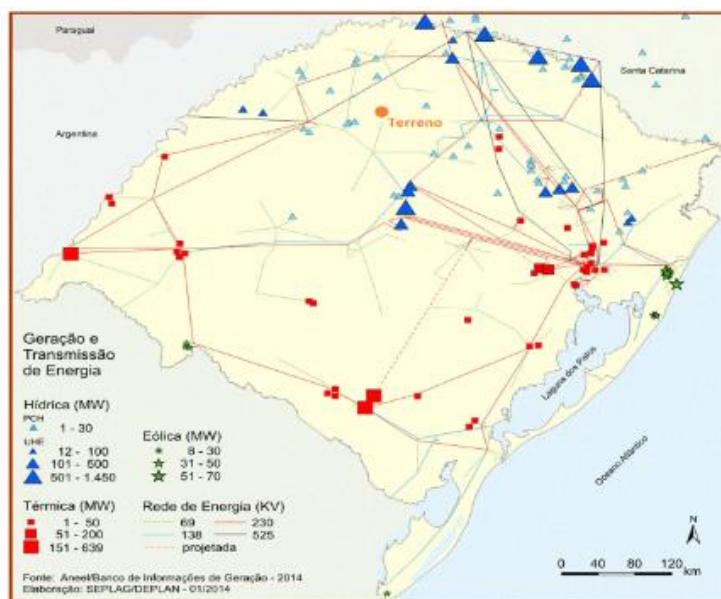


Figura 4.1: Mapa de geração e transmissão de energia, com indicação da área estudada.

#### 4.1.1 Aquisição de Dados Anemométricos

Em agosto de 2013, uma torre anemométrica foi instalada na região de interesse, registrando dados da velocidade do vento local em três alturas (60, 80 e 100 m), e para cada altura, há um anemômetro coletando as informações.

A aquisição destes dados é realizada a cada 10 minutos, acumulando dados suficientes para gerar dados estatísticos, gráficos e histogramas. Para o presente trabalho, foi calculado a partir destes dados a velocidade média do vento a 80 m de altura, pelo período de um ano, resultando em uma velocidade média de 6.87 m/s na posição da torre. Essa informação foi utilizada posteriormente como parâmetro de referência nas simulações em CFD.

As informações obtidas pela aquisição de dados da torre anemométrica também foram importantes para a obtenção da direção de escoamento do vento no local. A Figura 4.2 apresenta a Rosa dos Ventos, gerada por estes dados. Observa-se que a direção preferencial do vento é Norte, com maior frequência de vento.

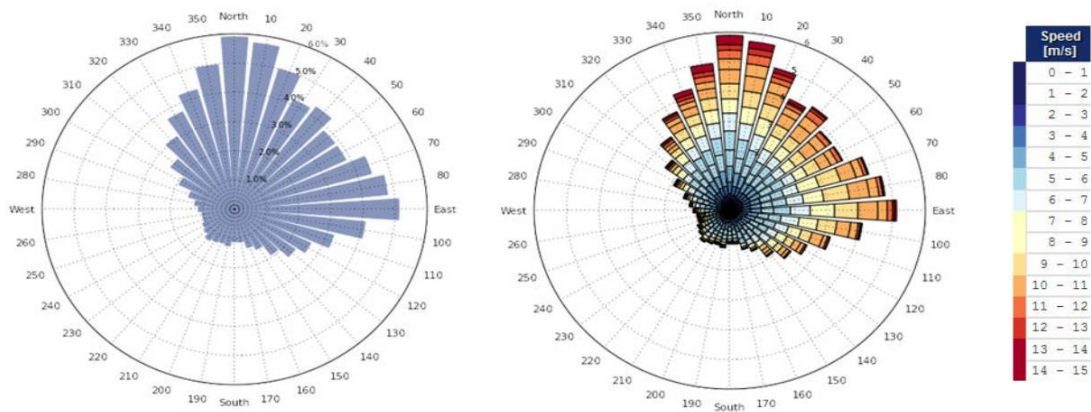


Figura 4.2: Rosa dos ventos e da velocidade normalizada por direção

## 4.2 Modelagem em CFD

### 4.2.1 Modelo Geométrico

Para representar o terreno em um domínio computacional, obteve-se os dados topográficos da região a partir do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) da NASA. Através do *software* Global Mapper, foi exportado um modelo tridimensional do terreno, com dimensões de 5 km x 5 km, para um *software* CAD, que possibilita melhor manipulação do domínio. Com uma sobreposição das imagens de satélite do local, obtidas pelo Google Earth, foi possível subdividir o domínio em duas regiões, conforme a vegetação local.

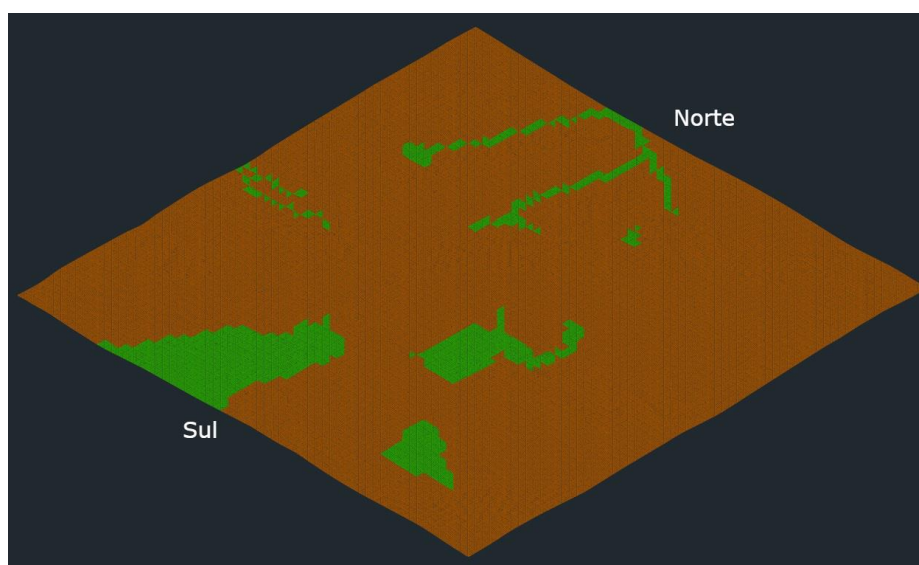


Figura 4.3: Modelagem do terreno em CAD

Pela Figura 4.3, é possível visualizar as diferentes regiões de vegetação, onde a área em verde é composta por árvores, com altura de rugosidade de 2 m, e a área marrom é composta por terra e gramíneas, com altura de rugosidade de 0,2 m. Dessa forma, é possível atribuir as diferentes rugosidades para cada sub-região. Através do modelo em CAD, foi possível ainda detectar a variação da topografia.

### 4.2.2 Discretização do Modelo

A partir da topologia do terreno, foi feita a discretização do modelo computacional no *software* Ansys Meshing. O estudo de qualidade de malha realizado por Roca, 2015, no qual 3 malhas foram submetidas a análise de convergência e avaliadas pelo método GCI, mostrou-se apropriada para este estudo. Portanto, foram criadas outras 2 malhas semelhantes entre si, e à malha selecionada por Roca, 2015, variando apenas quanto ao refinamento. As duas novas malhas foram submetidas à uma simulação preliminar, com as mesmas condições descritas na Tabela 4.1, e optou-se pela que apresentou resultados mais próximos da velocidade média no ponto central, onde se localiza a torre de medição.

As dimensões do domínio, ilustrado pela Figura 4.4, são 5 x 5 x 1 km. As malhas criadas, que apresentam volumes hexaédricos para o presente estudo, foram submetidas à simulação de acordo com as condições de contorno descritas na seção 4.2.3. As velocidades médias obtidas por cada malha, a 80 m de altura, no centro do domínio, foram comparadas com a velocidade média da torre anemométrica (6,88m/s). Foi selecionada a malha que

apresentou o resultado mais próximo da velocidade média. No Apêndice B, é apresentada uma imagem da malha utilizada.

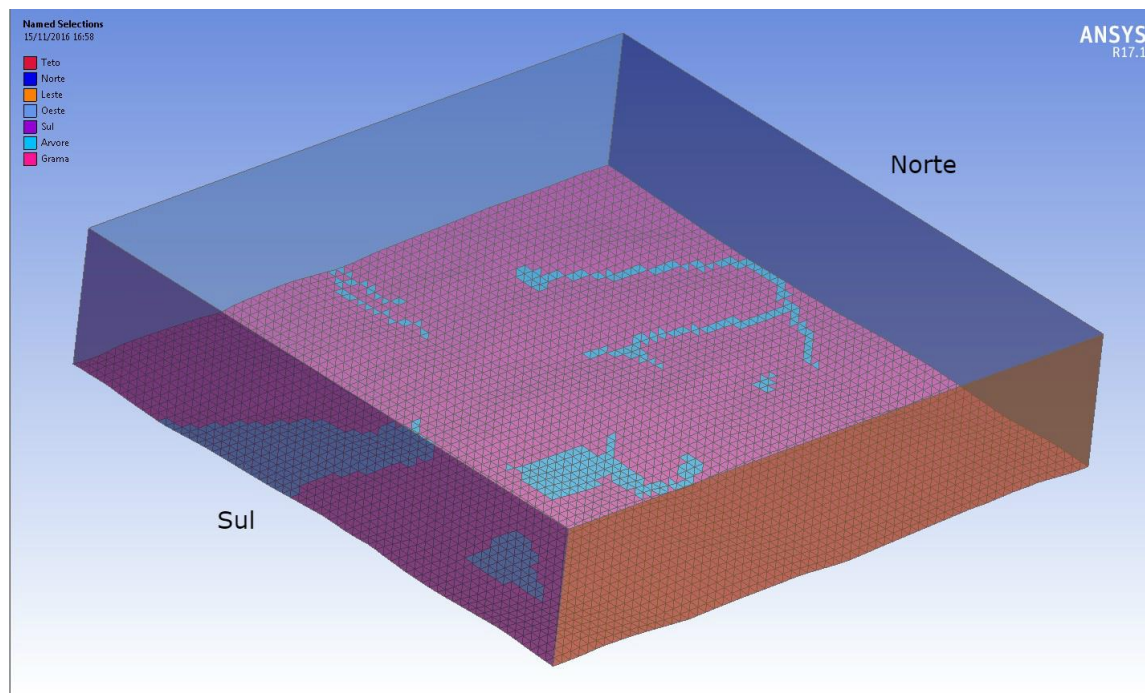


Figura 4.4: Domínio gerado para o modelo.

#### 4.2.3 Condições de Contorno

Para representar devidamente o problema físico, ao importar o modelo discretizado para o *software* Ansys Fluent, deve-se definir o modelo de turbulência a ser utilizado, neste caso, o *kw*-SST proposto por Wilcox, 2006, com valores padrões do Fluent.

Deve-se definir ainda as condições de contorno do modelo. Conforme descrito anteriormente, a Camada Limite Atmosférica apresenta um perfil de velocidades logarítmico, dado pela equação 2.1. Para aplicar este perfil ao modelo, foi criada uma UDF (*User Defined Function*) em linguagem em C, cuja calibração foi realizada pelo processo de *matching*, ou seja, a velocidade do vento no ponto central de uma superfície a 80 m de altura em relação ao solo foi monitorada, enquanto a UDF era modificada. Dessa forma, pode-se garantir que a velocidade no ponto de medição é equivalente aos dados coletados pela torre. Através do processo de *matching*, aplicou-se um fator multiplicativo de 0.76 ao perfil criado, obtendo-se o valor de 6,89 m/s como resultado neste ponto (enquanto a velocidade medida pelos anemômetros é de 6,88 m/s). Este código é descrito no Apêndice A. A Tabela 4.1 apresenta a descrição das condições de cada face do domínio

Tabela 4.1: Condições de contorno aplicadas no CFD.

Face	Condição de Contorno
Chão	Parede sem escorregamento
Norte	Perfil de Velocidades UDF
Sul	Pressão Atmosférica
Leste	Parede com Escorregamento Livre
Oeste	Parede com Escorregamento Livre
Topo	Parede com Escorregamento Livre

Vale ressaltar que, a definição da entrada de velocidade condiz com a orientação de maior ocorrência, como apresentado anteriormente pela Rosa dos Ventos. A modelagem do chão também leva em consideração as rugosidades de 0,2 m e 2 m para as regiões de grama e árvores, respectivamente, e foi adotado intensidade de turbulência de 10% e comprimento médio de turbulência de 1 m. As demais condições servem apenas para permitir o escoamento livre.

### 4.3 Modelagem pelo WAsP

Através do *software* Global Mapper, foi exportado um mapa de curvas de nível a cada 5 m. O mapa foi importado pelo WAsP para representar a orografia da região, e discretizado em 166464 elementos.

A rugosidade da região foi determinada com o auxílio de imagens de satélite obtidas com o *software* Google Earth. Ao sobrepor essas imagens e o mapa, foi possível definir as diferentes rugosidades presentes. A Figura 4.5 apresenta as linhas de contorno de nível, em vermelho, e linhas de rugosidade do terreno, em verde.

Obstáculos ao escoamento do vento provocam alterações na Camada Limite Atmosférica, e devem, portanto, ser corretamente determinados para evitar erros consideráveis nos resultados. Novamente, com auxílio das imagens de satélite, foram identificados os estabelecimentos com maior impacto ao escoamento do vento, e modelados no próprio WAsP, informando os ângulos de posicionamento e o raio em relação à torre de medição.

Os dados coletados pela torre de medição que descrevem o regime eólico local foram importados para WAsP. As turbinas foram posicionadas conforme descrito na Tabela 4.2, para análise a 60, 80 e 100 m de altura.

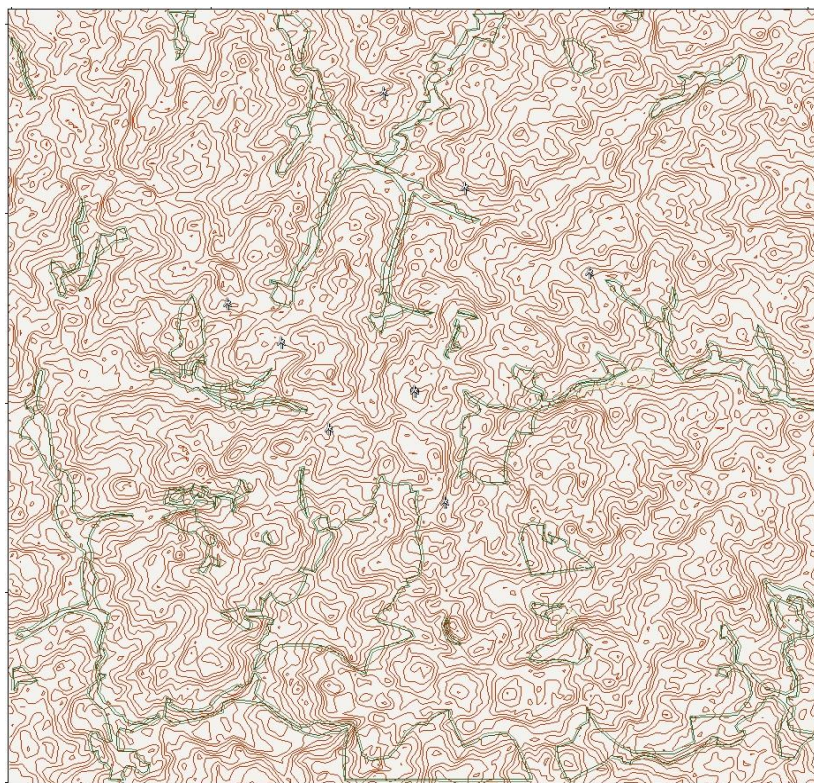


Figura 4.5: Modelagem do terreno em curvas de nível e rugosidade.

#### 4.4 Pontos de Avaliação

O processo de *micrositing* visa a maximização da energia produzida em um parque eólico através do melhor posicionamento das turbinas. Para tanto, é considerado características do regime de vento local, como direção preferencial e velocidade máxima do vento e distância entre as turbinas. O presente trabalho adotou o estudo de *micrositing* realizado por Roca, 2015, e adotado também por Araújo, 2015, para selecionar os pontos no terreno que serão avaliados. A Tabela 4.2 apresenta a localização geográfica da torre anemométrica e a posição geográfica dos pontos selecionados, numerados de 1 a 4, enquanto a Figura 4.6 mostra a imagem de satélite com as respectivas posições. As posições descritas foram utilizadas para avaliar as velocidades médias do vento obtidos por CFD e pelo WASP, de forma a possibilitar a comparação entre os métodos.

Tabela 4.2: Localização geográfica da torre de medição e pontos avaliados.

	Latitude	Longitude
Torre	28° 3' 20.30" S	53° 31' 21.30" O
1	28° 3' 58.38" S	53° 31' 11.16" O
2	28° 3' 32.70" S	53° 31' 53.09" O
3	28° 3' 02.52" S	53° 32' 09.88" O
4	28° 2' 48.96" S	53° 32' 29.37" O



Figura 4.6: Posição da torre anemométrica e pontos avaliados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados Obtidos por CFD

Com a finalidade de verificar se o perfil de velocidades definido pela UDF é compatível com os resultados esperados, foi criada uma linha de vetores no ponto central do domínio (exatamente na posição da torre anemométrica) para verificar o perfil resultante, representado pela Figura 5.1. Verifica-se que o perfil resultante é logarítmico, comprovando que a UDF foi corretamente definida no *software*.

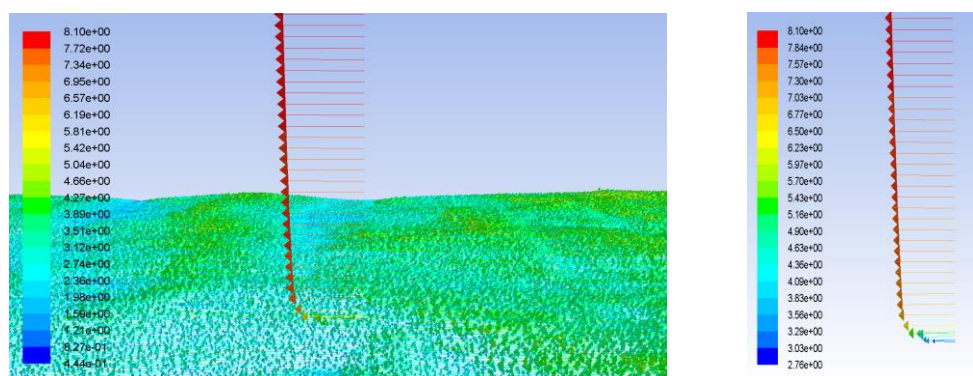


Figura 5.1: Resultado para o perfil de velocidades no ponto central

A partir do modelo descrito na seção 4.2, foi realizado a simulação do perfil de velocidades no Ansys Fluent. As Figuras 5.2 a 5.4 apresentam a distribuição de velocidades para superfícies a 60, 80 e 100 m.

Observa-se nas Figuras 5.2a, 5.3a e 5.4a uma alta variação da velocidade média do vento ao longo da superfície. Nota-se, ainda, uma heterogeneidade mais acentuada na superfície a 60 m, com uma faixa de velocidades de 5.21 m/s e 7.81 m/s (diferença de 2.6 m/s), enquanto a 100 m, apesar da alta variação, apresenta uma distribuição mais homogênea, cuja faixa de velocidades varia de 6.35 m/s a 7.85 m/s (diferença de 1.5 m/s). Esta diferença pode ser atribuída ao efeito da rugosidade do solo na camada limite atmosférica.

Em seguida, foram consultados os resultados obtidos nos pontos de interesse. A Tabela 5.1 apresenta os resultados para as velocidades do vento nas posições especificadas na Tabela 4.2, e respectivas alturas.

Inicialmente, pode-se observar que a velocidade obtida na posição da torre anemométrica, a 80 m de altura está muito próxima a velocidade média calculada a partir dos dados medidos no local, especificado na seção 4.1.1, resultando em uma diferença de apenas 0,01 m/s.

Tabela 5.1: Resultados das velocidades e obtidas por CFD.

	60 m	80 m	100 m
Ponto	U (m/s)	U (m/s)	U (m/s)
1	6,58	6,98	7,15
2	7,29	7,56	7,63
3	7,58	7,66	7,71
4	7,46	7,52	7,55
Torre	6,70	6,89	7,19



## 5.2 Resultados Obtidos pelo WASP

Após a modelagem no WASP, os resultados são muito mais rápidos, sendo obtidos em questão de minutos. As Figuras 5.2b, 5.3b e 5.4b apresentam as distribuições da velocidade média em superfícies a 60, 80 e 100 m de altura, obtidos pelo *software*.

Visualmente, as distribuições obtidas pelo WASP diferem muito às distribuições calculadas por CFD apresentadas anteriormente. As faixas de velocidades foram de 5,56 a 6,56 m/s para a altura de 60 m, de 6,12 a 7,01 m/s a 80 m e 6,49 a 7,30 m/s para 100 m de altura. Vale ressaltar que, da mesma forma que as faixas de velocidades diminuíram conforme o aumento da altura para os resultados por CFD, ocorreu para as faixas calculadas pelo WASP que, a 60 m, a diferença entre a maior e menor velocidade é de 1 m/s, e a 100 m, a diferença é 0,81 m/s. Isso mostra que, em ambos os métodos, com o aumento da altura, a distribuição de velocidades tende a ficar mais homogênea. A Tabela 5.2 apresenta as velocidades médias do vento nos pontos estudados, conforme descritos na Tabela 4.2.

Tabela 5.2: Resultados das velocidades obtidas por WASP.

	60 m	80 m	100 m
Ponto	U (m/s)	U (m/s)	U (m/s)
1	6,04	6,56	6,94
2	6,39	6,84	7,19
3	6,29	6,73	7,08
4	6,39	6,81	7,14
Torre	6,50	6,92	7,24

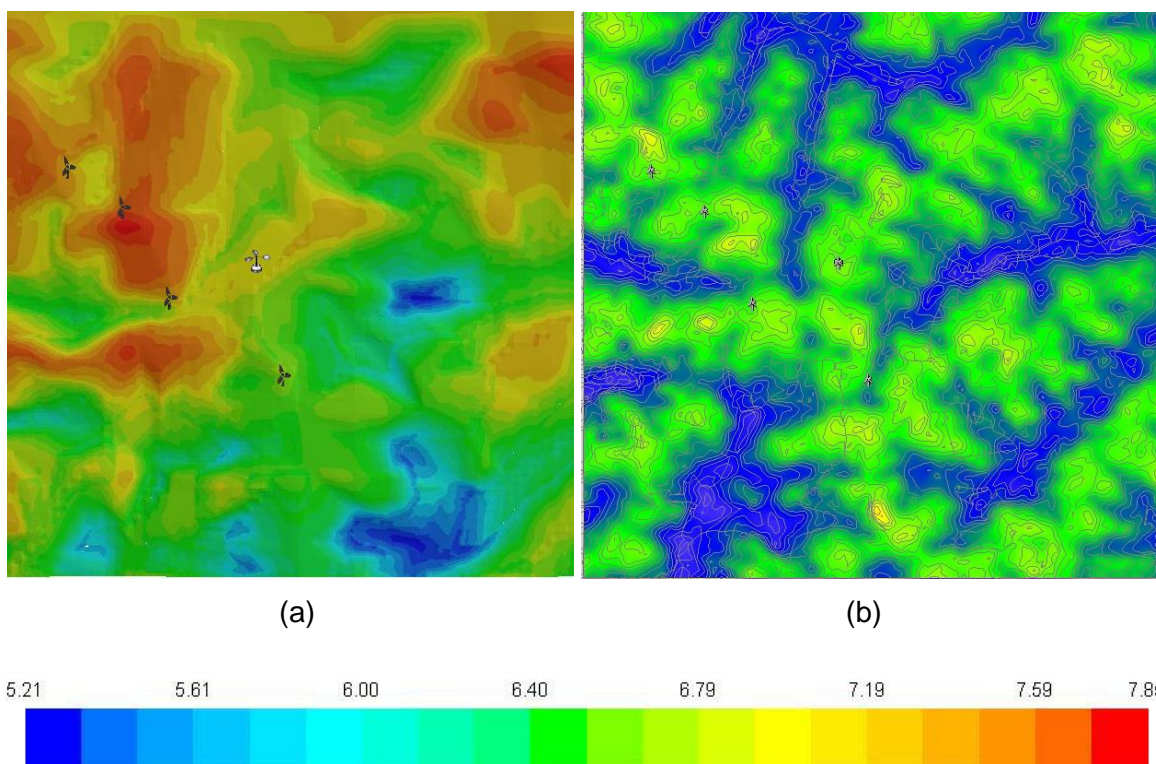


Figura 5.2: Distribuições de velocidade obtidos por CFD (a) e WASP (b) a 60 m de altura.

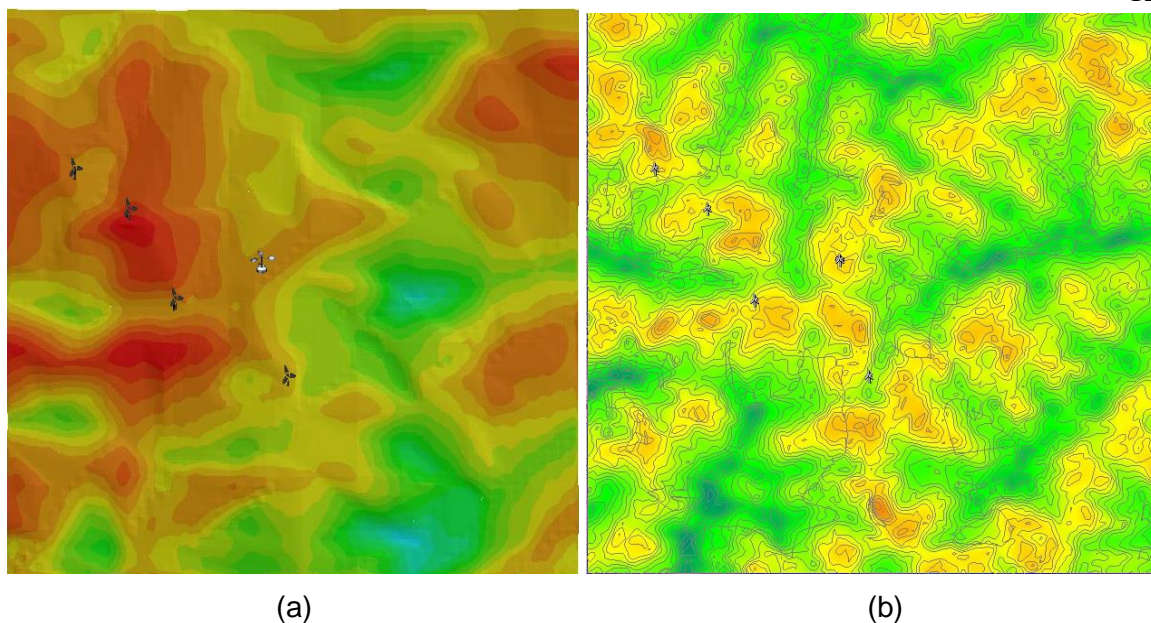


Figura 5.3: Distribuições de velocidade obtidos por CFD (a) e WAsP (b) a 80 m de altura.

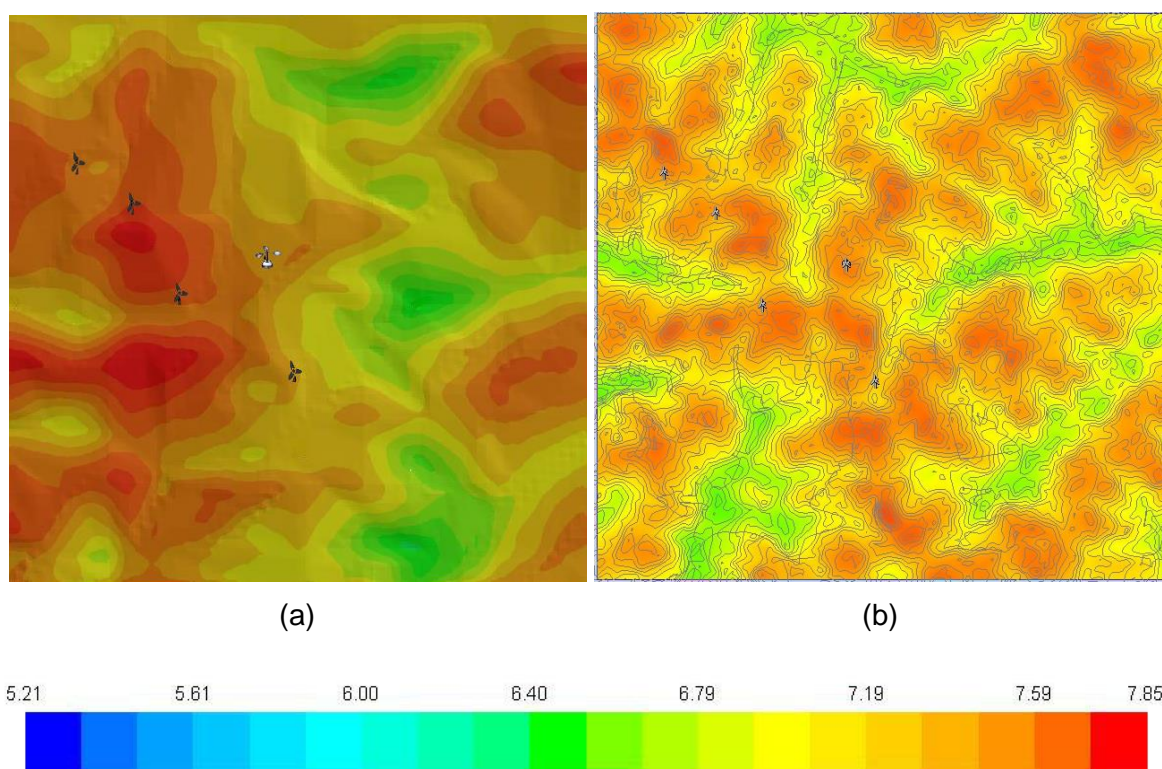


Figura 5.4: Distribuições de velocidade obtidos por CFD (a) e WAsP (b) a 100 m de altura.

Comparando-se os valores descritos nas Tabelas 5.1 e 5.2, observa-se que as velocidades médias obtidas através do WAsP são consideravelmente menores que as obtidas através do CFD. Analisando as diferenças das velocidades em cada posição avaliada, apresentadas na Tabela 5.3, pode-se notar que as diferenças entre os resultados de cada método são maiores na superfície mais baixa, atingindo uma diferença de 1,3 m/s no caso mais crítico, e a menor diferença é de 0,20 m/s. Porém, essa diferença tende a diminuir conforme o aumento da altura, como pode ser observado para 80 m, cuja maior e menor diferença são de

0,93 m/s e 0,03, respectivamente, e para 100 m, onde a maior variação foi de 0,63 m/s e a menor foi de 0,05 m/s.

Tabela 5.3: Diferença entre as velocidades médias obtidas pelo WAsP e por CFD, em m/s.

60 m			80 m			100 m		
CFD	WAsP	Dif.	CFD	WAsP	Dif.	CFD	WAsP	Dif.
6,58	6,04	0,54	6,98	6,56	0,42	7,15	6,94	0,21
7,29	6,39	0,90	7,56	6,84	0,72	7,63	7,19	0,44
7,58	6,29	1,29	7,66	6,73	0,93	7,71	7,08	0,63
7,46	6,39	1,07	7,52	6,81	0,71	7,55	7,14	0,41

### 5.3 Potencial Eólico

Conforme descrito na seção 3.2, o potencial eólico disponível em determinada região é proporcional ao cubo da velocidade do vento. Portanto, uma diferença relativamente pequena nessa velocidade resulta em uma diferença considerável em termos de potência disponível. A Tabela 5.4 apresenta a Densidade de Potência calculada para cada posição, bem como a diferença entre os resultados obtido por cada método. Observa-se que as diferenças percentuais entre os potenciais são bem elevados, atingindo uma diferença de aproximadamente 43% no caso mais crítico.

Tabela 5.4: Comparação da Densidade de Potência Eólica disponível.

Altura [m]	Ponto	$P_{DENS}$ [W/m <sup>2</sup> ] - CFD	$P_{DENS}$ [W/m <sup>2</sup> ] - WAsP	$\Delta P_{DENS}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\Delta P_{DENS}$ [%]
60	1	174,5	135,0	39,5	22,7
	2	237,3	159,8	77,5	32,7
	3	266,8	152,4	114,3	42,9
	4	254,3	159,8	94,5	37,2
80	1	208,3	172,9	35,4	17,0
	2	264,6	196,0	68,6	25,9
	3	275,3	186,7	88,6	32,2
	4	260,5	193,4	67,0	25,7
100	1	223,9	204,7	19,2	8,6
	2	272,1	227,7	44,4	16,3
	3	280,7	217,4	63,3	22,6
	4	263,6	222,9	40,7	15,4

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi realizada a análise da distribuição de velocidade do vento em um terreno complexo, baseada na aquisição dos dados de direção e velocidade, obtidos através de uma torre anemométrica instalada no local. Foram adotados dois métodos distintos: a utilização de Dinâmica dos Fluidos Computacional, com o *software* comercial Ansys Fluent, e por WAsP (*Wind Atlas Analysis and Application*), que utiliza um modelo linearizado das equações de Navier-Stokes. O objetivo principal foi comparar a diferença nos resultados da

distribuição de velocidades através dos dois métodos de avaliação, e o impacto desta diferença no potencial eólico disponível.

O WAsP é um *software* que apresenta um método simplificado de cálculo, que não requer recursos computacionais avançados e a interface de usuário não é complicada. Como se utiliza apenas um sistema linearizado, o tempo de cálculo é reduzido drasticamente e os resultados podem ser visualizados em questão de minutos. Porém, essa abordagem simplificada pode ocasionar erros na previsão de energia produzida em determinados casos, principalmente em terrenos muito complexos, ou em baixas alturas.

O CFD, por outro lado, é um método muito mais complexo, no qual a modelagem do terreno e o processo de discretização do domínio demandam tempo e conhecimento prévio. Após a modelagem, o cálculo do campo de velocidades durou pouco mais que um dia até a convergência.

Conforme descrito na seção 5, os resultados obtidos pelo WAsP foram consideravelmente menores que os obtidos através do Ansys Fluent, com variações máximas de 1,3 m/s a 60 m de altura, 0,9 m/s a 80 m e 0,6 m/s a 100 m de altura. Como a potência eólica disponível é proporcional ao cubo da velocidade média, a seleção correta do método de avaliação é crucial.

Analisando as diferenças nos resultados de cada método, foi constatado que a baixas alturas, os métodos têm uma divergência maior entre si. A 60 m de altura, foi obtido diferenças de 1,29 m/s no caso mais crítico, e 0,54 m/s no caso menos crítico, o que, em termos de Densidade de Potência, representa diferenças de 42,9 % e 22,7 %, respectivamente. A 80 m de altura, essas diferenças foram menores, com variação de 0,93 m/s no caso mais crítico e 0,42 m/s no caso menos crítico, representando variações de 32,2% e 17%, respectivamente. A 100 m, os resultados foram mais convergentes, com variação mais crítica de 0,63 m/s, ou 22,6% em termos de densidade de potência, e menos crítica de 0,21 m/s, sendo 8,6% de densidade de potência.

O método de extrapolação utilizada pelo WAsP indica que sua utilização deve ser cautelosa, levando em consideração a altura de interesse e variações topográficas. Além da recomendação do próprio desenvolvedor, os resultados apresentados na seção 5 indicam que o modelo utilizado pelo *software* tende a divergir das informações obtidas por outros métodos em casos mais complexos. Porém, os resultados obtidos no presente trabalho indicam que o WAsP responde melhor em alturas mais altas.

O CFD, devido ao modelo utilizado, é uma abordagem mais conservadora. O cálculo do escoamento turbulento do ar por este método já foi validado em muitos trabalhos anteriores, apresentando resultados coerentes com a realidade.

Apesar desta avaliação ter sido realizada a partir dos dados obtidos de uma torre anemométrica, os resultados alcançados neste trabalho mostram que há uma diferença acentuada na estimativa da velocidade do vento por cada método abordado e, conseqüentemente, no potencial eólico da região. Contudo, estes resultados ainda não são suficientes para afirmar categoricamente qual modelo é mais preciso e adequado devido à falta de medições práticas em cada posição avaliada.

O processo de *matching*, descrito na seção 4.2.3 para implementação do perfil de velocidades no CFD, foi realizado a 80 m de altura. Recomenda-se que, em trabalhos futuros, seja realizado o mesmo processo a 60 e 100 m de altura, para verificar se há alteração nos resultados do próprio CFD, e verificar novamente as diferenças entre CFD e WAsP.

A utilização de dados obtidos por uma única torre anemométrica, com medições em diversas alturas, permitiria a validação da precisão vertical dos métodos de extrapolação abordados, porém, ainda não seria possível avaliar a precisão de extrapolação horizontal. Recomenda-se, portanto, para projetos eólicos futuros, além das medições obtidas pela torre anemométrica, a medição do vento em outra posição através da tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging*) para a obtenção das velocidades médias em diversas alturas. Dessa forma, seria possível comparar os resultados com medições locais em duas posições distintas, permitindo a realização de um novo estudo comparativo entre os métodos abordados neste trabalho, com uma melhor validação dos resultados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEólica: **Nosso Setor**. Acesso: 21 de 09 de 2016.

Disponível em: <http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/nosso-setor.html>

Araujo, G. **Avaliação Comparativa do Estudo de Escoamento de Ar em um Terreno Complexo com Determinação do Potencial Eólico e Layout do Parque em Panambi – RS**. 2015.

Bowen, A. J., & Mortensen, N. G. **WASP prediction errors due to site orography**. Roskilde, Denmark: RISø National Laboratory, 2004.

EPE, E. d. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Acesso: 21 de 09 de 2016.

Disponível

em:

<http://www.epe.gov.br/PDEE/Relat%C3%B3rio%20Final%20do%20PDE%202024.pdf>

Jackson, P. S.; Hunt, J. C.R. **Turbulent Wind Flow over a Low Hill**. Quart J. R. Met. Soc., pp 929-955. 1975.

Miljødata, E. o. **Case Studies Calculating Wind Farm Production-Main Report**. Denmark: Energi- og Miljødata, 2002.

Roca, W. B. **Dimensionamento de um Parque Eólico e sua Subestação, Comparando Ferramentas de CFD e Atlas Eólicos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

Schlichting, D. H. **Boundary-Layer Theory**. McGraw-Hill, New York, 1978.

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

Stangroom, P. **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain**. Nottingham, UK. 2004.

Troen, I.; Lundtang, E. P. **El Atlas Eólico Europeo**. Roskilde: Riso National Laboratory, 1990.

Wilcox, D. C. **Turbulence Modeling for CFD (Third Edition)**. La Canada: CA: DCW industries, 2006.

Zhang, M.H. **Wind Resource Assessment and Micro-siting**. John Wiley & Sons. 2015. ISBN 111890012X

## APÊNDICE

### Apêndice A: Função UDF para Perfil de Velocidades

O seguinte código em Linguagem em C foi utilizado para criar um perfil logarítmico de velocidades, conforme a Equação 2.1, para a condição de contorno da entrada de escoamento no Ansys Fluent.

```
#include "udf.h"

#define Uf 0.4859
#define k 0.4
#define zo 0.281
#define C 0.76

DEFINE_PROFILE(velocidade_log,t,i)

{
    real x[ND_ND];
    real z;
    face_t f;
    begin_f_loop(f,t)
    {
        F_CENTROID(x,f,t);
        z=x[2];
        if(z<0)z=z*(-1);
        F_PROFILE(f,t,i)=C*(Uf/k)*log(z/zo);
    }
    end_f_loop(f,thread);
}
```

**Apêndice B: Imagem da malha selecionada.**