

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA MASS-CONSISTENT PARA  
SIMULAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES DO VENTO EM UM TERRENO  
COMPLEXO

por

João Pedro Silveira Viana

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 2019

## CIP - Catalogação na Publicação

Viana, João Pedro Silveira  
Análise da utilização da metodologia  
mass-consistent para simulação do campo de velocidades  
do vento em um terreno complexo. / João Pedro Silveira  
Viana. -- 2019.  
25 f.  
Orientadora: Adriane Prisco Petry.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Mass-Consistent. 2. Energia Eólica. 3. OpenWind.  
4. Terrenos complexos. I. Prisco Petry, Adriane,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

João Pedro Silveira Viana

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA MASS-CONSISTENT PARA  
SIMULAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES DO VENTO EM UM TERRENO  
COMPLEXO

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  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

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

Comissão de Avaliação:

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Prof. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, dezembro de 2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda minha família, aos meus amigos, à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Adriane pela orientação, à AWS Truepower pela concessão da licença de um de seus *softwares* comerciais e a todos aqueles que me auxiliaram na realização desse trabalho.

Viana, J. P. S. **Análise da utilização da metodologia mass-consistent para simulação do campo de velocidades do vento em um terreno complexo.** 2019. 25 p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo entre a metodologia de modelagem de escoamento do vento *Mass-Consistent* e uma metodologia de modelagem em CFD utilizada em um trabalho realizado anteriormente em um terreno cuja orografia é complexa. O terreno em questão trata-se de uma escarpa de 12 metros de altura envolta pelo mar na cidade de Roskilde Fjord na Dinamarca. A modelagem é utilizada através do programa computacional comercial *OpenWind*. Ademais, este trabalho realizou, também, uma análise comparativa entre os dados de velocidade e direção do vento da região em questão extraídos da base de reanálise climatológica MERRA-2, produzida pela NASA, e os dados de medições anemométricas realizadas anteriormente no local. Os dados extraídos do MERRA-2 apresentaram excelente desempenho frente às medições anemométricas. Quanto a metodologia *Mass-Consistent*, a mesma apresentou uma caracterização do escoamento de vento do terreno complexo similar à metodologia em CFD, identificando corretamente picos e vales de velocidades, no entanto, nos locais em que a orografia do terreno apresenta os maiores níveis de irregularidade, a mesma se mostrou ineficiente na exatidão dos valores apresentados.

PALAVRAS-CHAVE: *Mass-Consistent*, Energia Eólica, *OpenWind*, Terrenos complexos.

Viana, J. P. S. **Analysis of the utilization of Mass-Consistent methodology for wind speed flow simulation in a complex terrain.** 2019. 25 p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## ABSTRACT

The present work presents a comparative study between the wind flow model *Mass-Consistent* and a CFD wind flow model that was used in a previous paper in a complex terrain. The chosen terrain is a 12 meters tall hill in Roskilde Fjord, Denmark. The wind flow model is used by a commercial software called OpenWind. Moreover, this work also presents a comparative analysis between the wind speed and direction data of the studied region collected from climatological reanalysis database MERRA-2, developed by NASA, and the data from anemometric measurements previously accomplished. The data collected from MERRA-2 presented an excellent assertiveness compared with the anemometric measurements. About the *Mass-Consistent* model, it presented a similar description of the complex terrain wind flow compared with the CFD model, correctly identifying the peaks and valleys of the wind speed, however, where the orography has the highest levels of irregularity, this model proved inefficient in the accuracy of the values presented.

**KEYWORDS:** *Mass-Consistent*, Wind Energy, OpenWind, Complex terrain

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$C$	Fator de escala
$f_i$	Fator auxiliar
$k$	Constante de Von Kàrmàn
$U$	Velocidade no vento
$U_{ref}$	Velocidade, em m/s, de referência da região
$U_{x_i,y_i}$	Velocidade nas posições de cada torre anemométrica para as coordenadas geográficas $x$ , $y$ e $z$
$z$	Altura
$z_0$	Comprimento de rugosidade do local
$\rho$	Massa específica

### Abreviaturas e acrônimos

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
CFD	Dinâmica de Fluidos Computacionais
CLA	Camada Limite Atmosférica
GW	Gigawatt
MERRA	<i>The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications</i>
m/s	Metros por segundo
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes equations</i>
RV	Razão de Velocidades
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
WRG	<i>Wind Resource Grid</i>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Região estudada .....	6
Figura 2 –	Mapa de Topografia da Região Estudada .....	7
Figura 3 –	Rosa dos Ventos da Região Estudada.....	7
Figura 4 –	Distribuição de Weibull .....	8
Figura 5 –	Comparação da Rosa dos Ventos da Região Estudada.....	9
Figura 6 –	Mapa de Topografia da Região Estudada .....	10
Figura 7 –	Campo de Velocidades da Região Estudada.....	11
Figura 8 –	Posicionamento dos Pontos de Medições da Região Estudada .....	11
Figura 9 –	Razão de Velocidade ao longo da linha B .....	12
Figura 10 –	Linha B Projetada no Campo de Velocidades da Região Estudada.....	12

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Comparação entre Razões de Velocidade extraídas do OpenWind com Razões de Velocidades extraídas das medições anemométricas .....	12
--	----

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>2</b>
2.1. DADOS DE VENTO.....	2
2.2. ESCOAMENTO DO VENTO .....	2
<b>2.2.1. Dinâmica de Fluidos Computacionais .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2.2. Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP).....</b>	<b>2</b>
<b>2.2.3. OpenWind .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2.4. Túnel de Vento.....</b>	<b>3</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO .....</b>	<b>4</b>
4.1. CAMADA LIMITE.....	4
<b>4.1.1. Camada Limite Atmosférica .....</b>	<b>4</b>
4.2. CAMPO DE VELOCIDADES.....	5
<b>4.2.1. Distribuição de Weibull .....</b>	<b>5</b>
<b>4.2.2. Modelagem de Escoamento .....</b>	<b>5</b>
<b>4.2.3. Razão de Velocidades .....</b>	<b>6</b>
<b>5. CASO DE ESTUDO .....</b>	<b>6</b>
5.1. SOFTWARE OPENWIND .....	6
5.2. REGIÃO ESTUDADA.....	6
5.3. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL.....	7
<b>5.3.1. Dados de Vento .....</b>	<b>7</b>
<b>5.3.2. Dados de Topografia .....</b>	<b>8</b>
<b>5.3.3. Dados de Rugosidade .....</b>	<b>8</b>
5.4. GERAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES .....	8
<b>6. RESULTADOS .....</b>	<b>9</b>
6.1. COMPARAÇÃO DOS DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO.....	9
6.2. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE TOPOGRAFIA .....	9
6.3. ANÁLISE DO CAMPO DE VELOCIDADES.....	10
6.4. ANÁLISE DO CUSTO COMPUTACIONAL .....	13
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>14</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Hoje, a energia elétrica pode ser considerada como um fator indispensável na vida das pessoas, pois não está presente somente em residências, em hospitais e em supermercados, mas também no setor industrial, agindo de forma direta e indireta na rotina dos cidadãos. A demanda por este tipo de energia está em constante crescimento e pode ser suprida através de fontes não-renováveis ou renováveis. Devido ao elevado nível de crescimento desta demanda, as fontes renováveis de energia estão em destaque no cenário mundial, atraindo grandes investimentos em pesquisas e desenvolvimento.

Segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2019), a energia proveniente dos ventos, em 2019, atingiu o patamar de 2º recurso mais utilizado no Brasil para geração de energia elétrica. Em abril de 2019, a ABEEólica informou que o Brasil já possui 15 GW de capacidade instalada em 601 parques eólicos espalhados por 18 estados do território nacional, com 86% das unidades instaladas na região nordeste, o que corrobora com o elevado crescimento na utilização deste recurso energético.

Para a instalação de um parque eólico, é necessário um estudo prévio da região em que o mesmo será inserido e um projeto que viabilizará economicamente o seu desenvolvimento, levando em consideração o potencial de energia que será gerada em contraste com o custo projetado. Quanto à escolha do local para o parque, verifica-se qual é o comportamento do vento local através de dados de medições já realizados através de anemômetros e mapeados em um documento conhecido como Atlas Eólico. Além disso, a qualidade do acesso ao local estudado é muito importante, visto que, os equipamentos para construção de um parque eólico são de difícil transporte devido aos seus tamanhos e geometrias, necessitando de rodovias adequadas no entorno do local, caso o projeto se desenvolva. O projeto de viabilização econômica de um parque eólico visa mensurar o tempo necessário para que o investimento realizado na construção e no desenvolvimento do projeto seja retornado aos investidores.

Com o passar dos anos, a tecnologia presente no campo de estudo da energia eólica tem se desenvolvido em larga escala. Esta tecnologia não é voltada apenas para o estudo de desenvolvimento funcional e geométrico de turbinas eólicas, mas também na previsão de comportamento dos recursos naturais a serem explorados, mais precisamente, no comportamento do vento em uma determinada região. Hoje, utiliza-se recursos computacionais para o desenvolvimento de um projeto de parque eólico. Programas computacionais comerciais, amplamente conhecidos pelo mercado, simulam o desenvolvimento do perfil do vento a partir das medições pontuais realizadas e são capazes, ainda, de estabelecer o posicionamento das turbinas no local em questão, definindo o *layout* do parque, a fim de otimizar a geração de energia elétrica, prática, esta, conhecida como *micrositing*.

O custo computacional requerido para a realização destas simulações varia conforme a metodologia utilizada e conforme o nível de complexidade do terreno em questão. Hoje, busca-se otimizar este custo com modelagens mais simples que possuem uma alta taxa de assertividade quando aplicadas em terrenos complexos, reduzindo o custo inicial de projetos e, conseqüentemente, incentivando pesquisadores e empresas de menor porte a conseguirem realizar pesquisas e trabalhos nesta área.

O processo de determinação do comportamento e desenvolvimento de um escoamento de vento para estimar a sua potência disponível inicia-se com a medição de velocidade e direção do ar em alguns pontos da região em análise através de anemômetros. Após a realização destas medições, seleciona-se alguma metodologia para estimar o comportamento do vento não somente nos pontos em que ocorreram as medições, mas sim, em toda a região estudada, levando-se em consideração aspectos locais como a orografia local, a rugosidade do terreno da

região e a existência de obstáculos que possam interferir no escoamento do ar, como edificações e regiões alagadas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. DADOS DE VENTO**

Os dados de vento de uma região em que se deseja implementar um parque eólico são obtidos através de medições de velocidade e de direção do vento realizadas por torres anemométricas. O trabalho de Oliveira (2011) descreve as regras e boas práticas necessárias para realização de medições através de anemômetros e enfatiza a necessidade de medições para fins de instalações de turbinas eólicas serem coletadas em médias de 10 minutos durante o período de um ano, a fim de caracterizar as mudanças sazonais da região em análise.

Devido ao fato desta etapa possuir um alto custo, busca-se alternativas para obtenção de dados históricos de medições de velocidade e direção do vento em uma determinada região para realização de estudos no ramo da energia eólica. Uma alternativa trata-se da utilização de bases de reanálises climáticas que, em um projeto de parque eólico, não substituem a necessidade das medições no campo, mas são utilizadas para o estudo prévio do potencial energético presente na região em questão. Estas bases de reanálises representam um conjunto de dados obtidos a partir de modelos de circulação global com dados históricos de medições (STÜKER *et al.*, 2016). O trabalho de Bastazini (2018) realiza um estudo de comparação entre 4 bases de reanálises climatológicas e estimula a utilização de bases que obtiveram os menores erros, entre elas, a *The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2* (MERRA-2) produzida pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e utilizada neste trabalho.

### **2.2. ESCOAMENTO DO VENTO**

#### **2.2.1. Dinâmica de Fluidos Computacionais**

Uma das metodologias utilizadas para simular o escoamento de ar da região em estudo é a modelagem RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*), proposta por Reynolds (1984) e implementada através da Dinâmica de Fluidos Computacionais (CFD), baseada no Método de Volumes Finitos em que a região em análise é dividida em pequenos volumes de controle. Nesta metodologia, o custo computacional é alto, necessitando de uma máquina computacional de alta eficiência, pois a ferramenta de CFD realiza cálculos iterativos de velocidade em todos os volumes de controle como apresentado no trabalho de Roca (2015).

#### **2.2.2. Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP)**

Outra maneira de simular o escoamento de ar de uma região é através de um *software* imensamente difundido neste campo de estudo: o *Wind Atlas Analysis and Application Program* (WAsP), desenvolvido pelo *Riso DTU National Laboratory*, que utiliza uma simplificação da equação de Navier-Stokes para modelagem de escoamento de ventos. Este *software* utiliza o modelo numérico de escoamento linearizado baseado na teoria de Jackson-Hunt, que propõe uma divisão da camada limite atmosférica em duas regiões, considerando os efeitos de viscosidade somente na camada mais próxima ao solo (JACKSON; HUNT, 1975).

Primeiramente, o WAsP gera um perfil de escoamento do vento para a região estudada com base nos parâmetros de entrada, ou seja, extrapolando as medições de velocidade e de

direção obtidos previamente. Após esta etapa, é necessário informar ao *software* as características da região, como rugosidade, obstáculos presentes e presença de áreas alagadas. Ao final das simulações, o WAsP gera o campo de velocidade da região analisada com grande taxa de assertividade em regiões cuja orografia não é complexa, como explica Martins (2015) em sua obra. No âmbito da utilização desta metodologia, exalta-se o trabalho de Araújo (2015), que descreve, através de uma aplicação prática, o funcionamento do WAsP e compara os resultados obtidos com o trabalho de Roca (2015), que descreve um método de CFD, ambos para o mesmo local em análise e com um alto índice de similaridade entre os resultados atingidos pelas duas metodologias.

### 2.2.3. OpenWind

Outra ferramenta computacional que está sendo utilizada com mais frequência pela indústria, mas em menor escala quando comparado ao WAsP, é o *software* OpenWind. O OpenWind foi desenvolvido pela AWS Truepower com o objetivo de otimizar *layouts* de parques eólicos, maximizando a produção de energia gerada e minimizando as perdas existentes. Além disso, o OpenWind também pode ser utilizado para simulação do comportamento do vento com base em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e para análise financeira de um projeto de parque eólico. Conforme explicado pelo trabalho de Martins (2015), este *software*, ao contrário do WAsP, visa simplificar a resolução do comportamento de escoamentos de vento. Isto ocorre devido ao fato de o programa não resolver a equação de Navier-Stokes, mas sim utilizar a equação da continuidade na simulação da camada limite atmosférica, realizando, assim, a projeção do comportamento do vento local para toda a região requerida com baixo custo computacional.

O trabalho de Freitas (2019) descreve um projeto de parque eólico utilizando o *software* OpenWind para avaliação dos recursos naturais e simulação da produção energética e enfatiza o fato deste *software* ser a única ferramenta disponível para a realização deste tipo de estudo que é capaz de realizar estimativas de produção energética na microescala em bases temporais horárias e mensais, em vez de apenas anuais como é observado nas demais ferramentas.

### 2.2.4. Túnel de Vento

Uma alternativa usada para validar os modelos matemáticos utilizados em simulações realizadas por CFD ou por algum *software* comercial é a adoção de um procedimento de um procedimento experimental em um túnel de vento. A vantagem da utilização de um experimento em túnel de vento é a capacidade de poder investigar individualmente diferentes peculiaridades do terreno que possam influenciar o perfil de escoamento do vento da região em questão. Além disso, a acurácia deste método experimental é mais alta do que a encontrada em métodos matemáticos (STANGROOM, 2004).

O trabalho de Mattuella (2012) consiste em um estudo de investigação das características do vento em um terreno complexo através de um procedimento experimental realizado em um túnel de vento e comparou os resultados obtidos com resultados provenientes de modelos teóricos, evidenciando efeitos no escoamento devido à complexidade da orografia do terreno que os modelos teóricos não haviam considerados.

Utiliza-se, também, procedimentos experimentais em túnel de vento para validar modelos matemáticos, como realizado por de Freitas Filho (2012) em seu trabalho de análise de uma metodologia de CFD para avaliação do potencial eólico em terrenos complexos. Neste trabalho, as metodologias utilizadas para geração do campo de velocidades do vento são validadas por

dados gerados a partir de um procedimento experimental anteriormente realizado em um túnel de vento.

### 3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar a assertividade de dados públicos de medições de vento de um terreno cuja orografia é complexa. Esta análise é realizada através da comparação de dados de medições obtidos em bibliotecas digitais de livre acesso com dados de medições já realizadas por torres anemométricas. Além disso, este trabalho visa analisar a assertividade de uma metodologia de simulação de escoamento de vento, cujo custo computacional requerido é mais baixo do que as outras metodologias que são empregadas hoje, no mesmo terreno complexo. Esta segunda análise é realizada com base na comparação do emprego da metodologia estudada com uma metodologia de CFD utilizada no trabalho de Radünz (2018), que simula o desenvolvimento do escoamento de vento neste mesmo terreno complexo. Sendo assim, este trabalho visa verificar a realização de projetos na área de energia eólica em terrenos complexos com ferramentas de domínio público e que não demandem máquinas computacionais de alta capacidade, reduzindo custos de pesquisa e estimulando o aumento da quantidade de projetos eólicos que venham a ser realizados utilizando estas técnicas.

### 4. FUNDAMENTAÇÃO

O equacionamento apresentado neste capítulo tem como objetivo explicar tanto fisicamente, quanto matematicamente a maneira com que o OpenWind opera na realização de suas simulações e projeções.

#### 4.1. CAMADA LIMITE

O conceito de Camada Limite, apresentado por Prandtl (1904), demonstrou que, em escoamentos externos, há uma região próxima à fronteira sólida em que o escoamento sofre uma desaceleração devido ao atrito da superfície com o fluido viscoso. Sendo assim, Prandtl justifica que há uma região próxima a uma fronteira sólida, denominada Camada Limite, em que é necessário considerar o efeito da viscosidade do fluido e que, em locais a partir desta região, afastando-se da superfície, pode-se desprezar este efeito (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

##### 4.1.1. Camada Limite Atmosférica

A Camada Limite Atmosférica (CLA) trata-se da região próxima à superfície terrestre em que o perfil da velocidade do vento é perturbado pela rugosidade do terreno local. Esta perturbação pode ser proveniente da vegetação e orografia local, da presença de construções no terreno e da possibilidade de áreas alagadas na região. A Camada Limite Atmosférica, então, possui grande influência nos recursos eólicos, os quais desejam ser explorados em um determinado local. No interior da região da CLA, o perfil de velocidades do vento pode ser definido pela lei logarítmica, descrita pela Equação 1:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

em que  $U(z)$  representa a velocidade no vento, em m/s, na altura  $z$ , em m,  $k$  representa a constante de Von Kàrmàn cujo valor é de 0,4 (ARAÚJO, 2015) e  $z_0$  representa o comprimento de rugosidade do local.

## 4.2. CAMPO DE VELOCIDADES

Conforme citado anteriormente, a velocidade do vento varia em relação ao tempo e ao espaço. A fim de levar em consideração os efeitos destas variações, recorre-se a uma técnica estatística para estimar a distribuição de probabilidade da velocidade média do vento em um determinado local e a um método de modelagem de escoamento.

### 4.2.1. Distribuição de Weibull

A fim de corrigir a variação em relação ao tempo, Justus *et al.* (1976) descreve em seu trabalho a utilização da função densidade de probabilidade de Weibull para estimar a distribuição do espectro de frequência de velocidade média do vento. Esta distribuição é gerada após os dados de medições de velocidade e de direção do vento serem obtidos. A função densidade de probabilidade de Weibull é especificada pela Equação 2:

$$f(U) = \frac{K}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{K-1} e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^K} \quad (2)$$

em que  $K$  é um fator de forma adimensional,  $C$  é um fator de escala em m/s e  $U$  é a velocidade do vento, também em m/s.

### 4.2.2. Modelagem de Escoamento

Como as medidas de velocidades em um local em que se deseja analisar para a implantação de uma turbina eólica é realizada pontualmente, o OpenWind utiliza um modelo chamado *Mass-Consistent* para calcular os campos de velocidade. Para o emprego deste modelo, é necessário importar ao *software* os dados de medições de velocidade e direção do vento, assim como informações sobre a topografia e a rugosidade do terreno em questão (OPENWIND MANUAL, 2017).

Este modelo, explicado no trabalho de Freitas (2019), primeiro extrapola verticalmente as velocidades medidas com base no perfil logarítmico, descrito pela Equação 6. Após esta etapa, extrapola-se horizontalmente os dados medidos somente na mesma altura das medições. Quando houver mais de um ponto de medição na mesma altura, os dados são ponderados pelo inverso do quadrado da distância entre os pontos, isto é, de modo em que a velocidade extrapolada no ponto entre as medições, representada por  $U_z$ , é descrita pelas Equações 3 e 4:

$$U_z = \frac{\sum f_i U_{x_i, y_i}}{\sum f_i} \quad (3)$$

$$f_i = \frac{1}{((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2)} \quad (4)$$

em que  $U_{x_i, y_i}$  representa a velocidade nas posições de cada torre anemométrica para as coordenadas geográficas  $x$ ,  $y$  e  $z$  e  $f_i$  um fator auxiliar. Após a obtenção das velocidades em toda a região para as alturas em que foram realizadas as medições, o modelo utiliza-se do perfil logarítmico de velocidades novamente para extrapolar verticalmente os novos dados, levando

em consideração a rugosidade e a elevação do terreno. Assim, é gerado um campo inicial de velocidade em toda a região estudada  $U_0 = (u_{0\ x,y,z}, v_{0\ x,y,z}, w_{0\ x,y,z})$ . Finalmente, o modelo realiza um processo iterativo para encontrar o campo de velocidade final que se aproxime o máximo do inicial com a restrição da Equação de Continuidade, apresentada pela Equação 5.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

### 4.2.3. Razão de Velocidades

A fim de comparações, a análise do campo de velocidades deste trabalho foi adimensionalizada e expressa em função da Razão de Velocidades,  $RV$ , descrita pela Equação 6.

$$RV = \frac{U}{U_{ref}} \quad (6)$$

em que  $U_{ref}$  é a velocidade, em m/s, de referência da região estudada medida na mesma altura de  $U$ , porém em um local que não haja influência da complexidade do terreno.

## 5. CASO DE ESTUDO

### 5.1. SOFTWARE OPENWIND

Primeiramente, para o desenvolvimento deste trabalho, foi requisitado junto à AWS Truepower uma licença acadêmica do *software* OpenWind com prazo acordado de duração. Após a concessão da licença e correta execução do programa, foi realizada a escolha do local, cujo terreno fosse de orografia complexa, para aplicação do estudo de perfil de escoamento do vento local e consequente otimização do posicionamento de uma turbina eólica.

### 5.2. REGIÃO ESTUDADA

A região escolhida para aplicação do estudo do comportamento do vento local e simulação do funcionamento de uma turbina eólica trata-se de uma escarpa de 12 metros de altura envolta pelo mar situada na cidade de Roskilde Fjord na Dinamarca. Este terreno possui 130 metros de comprimento e 75 metros de largura. Além disso, superficialmente, o terreno é coberto por grama e não possui nenhuma construção ou obstáculo que possa interferir o perfil do escoamento do vento local como pode ser observado na Figura 1.

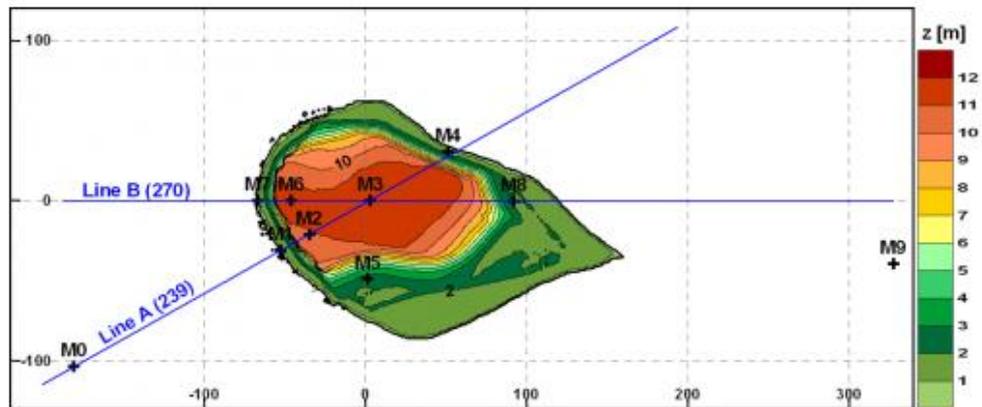
Figura 1 – Região estudada



Fonte: Bechmann; Johansen; Sorensen (2009).

Este terreno foi escolhido para aplicação da metodologia em questão pelo fato de possuir uma orografia complexa que pode ser encontrada em diversos locais da Terra, estimulando a implementação de unidades eólicas em mais opções de terrenos e motivando ainda mais a disseminação desta prática de obtenção de energia elétrica. O seu mapa de topografia pode ser observado pela Figura 2.

Figura 2 – Mapa de Topografia da Região Estudada



Fonte: WindBench (2011).

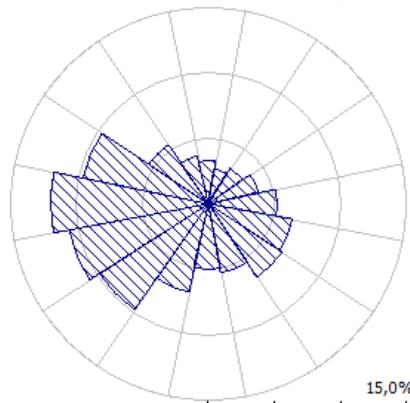
### 5.3. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL

Com o local previamente escolhido, iniciou-se a fase de caracterização da região e exportação de dados já mensurados de vento no local. Conforme citado anteriormente, o OpenWind utiliza-se de SIG para caracterização geográfica do terreno, sendo assim, utilizou-se de dados provenientes de bibliotecas digitais para caracterização da orografia e rugosidade local, a fim de caracterizar a região dentro do programa.

#### 5.3.1. Dados de Vento

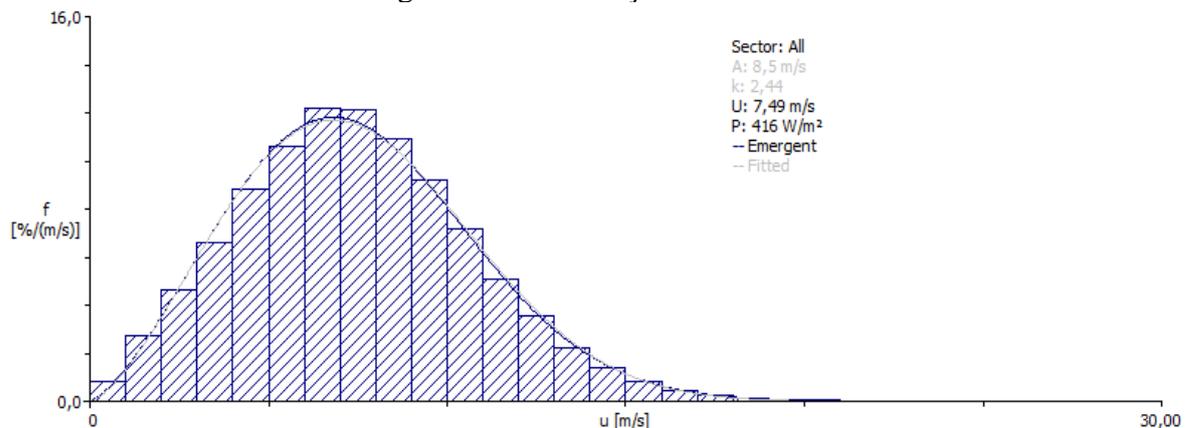
A coleta de dados de velocidade e direção do vento local foi realizada junto à MERRA-2 e tratada através do *software Windographer*, utilizado para geração de relatórios e gráficos analíticos de vento. A partir do tratamento dos dados, projetou-se a rosa dos ventos e a distribuição de Weibull dos dados, respectivamente, pela Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 – Rosa-dos-ventos da Região Estudada



Fonte: Windographer (2018).

Figura 4 – Distribuição de Weibull



Fonte: Windographer (2018).

### 5.3.2. Dados de Topografia

Os dados obtidos para caracterizar a topografia da região foram obtidos através do modelo digital de terreno conhecido por *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) desenvolvido pela NASA. Este modelo é de domínio aberto e pode ser acessado publicamente por qualquer pessoa no mundo. O SRTM foi criado a partir de dados obtidos em uma missão espacial realizada pela NASA em fevereiro de 2000.

Estes dados possuem uma resolução espacial de 30 metros e são importados ao OpenWind sob forma de uma *raster*, isto é, um conjunto de linhas e colunas de pixels, com cada pixel representando uma região geográfica segundo o estudo introdutório ao SIG realizado pelo *QGIS Development Team*. Esta informação de elevação do terreno, conforme citado anteriormente, serviu para a simulação do campo de escoamento de vento do local estudado.

### 5.3.3. Dados de Rugosidade

Os dados de rugosidade do terreno foram obtidos através do trabalho de Radünz (2018) que estabelece um valor de 0,015 metros para toda a superfície da escarpa e, de acordo com Berg *et al.* (2011), um valor de 0,0003 metros para toda a superfície do oceano.

## 5.4. GERAÇÃO DO CAMPO DE VELOCIDADES

Ao finalizar as especificações das características do vento e das características geofísicas do terreno da região, iniciou-se o processo de geração do mapa de velocidades e direções do vento. Este mapa de velocidades assemelha-se a um atlas eólico e é chamado de *Wind Resource Grid* (WRG) pelo OpenWind. Ao término da simulação, o WRG foi gerado sob formato de *raster* em que cada pixel tratava de uma informação referente à velocidade média do ponto e elevação do terreno, no mesmo ponto.

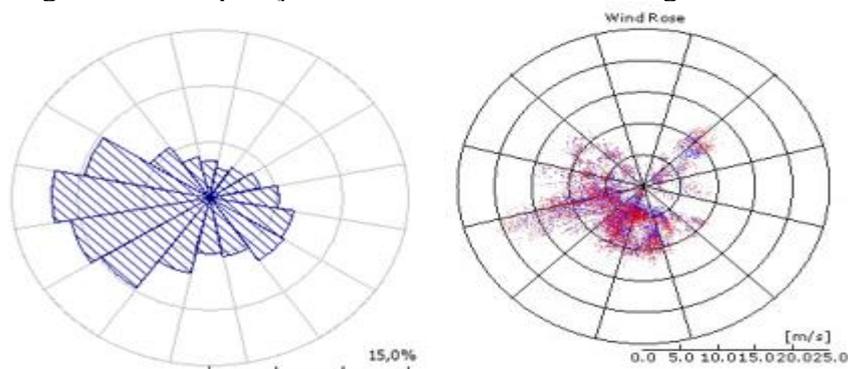
A partir do WRG, é possível calcular a produção energética das turbinas em que se deseja utilizar em um projeto de parque eólico. Além disso, este WRG é o resultado da simulação que foi utilizado na comparação com o resultado do desenvolvimento do campo de velocidade simulado na escarpa por Radünz (2018).

## 6. RESULTADOS

### 6.1. COMPARAÇÃO DOS DADOS DE DIREÇÃO DO VENTO

Conforme observado na Figura 3, as direções de escoamento do vento que são mais representativas na região da escarpa em Roskilde Fjord com base nos dados de reanálises climatológicas do MERRA-2 provêm de oeste e de sudoeste. Segundo o trabalho de Bechmann, Johansen e Sorensen (2009) que realizou a análise do escoamento de vento mensurado pelas medições anemométricas e simulados através de CFD, as principais direções presentes em tais medições foram, também, oeste e sudoeste, como observado na Figura 5.

Figura 5 – Comparação da Rosa dos Ventos da Região Estudada



Fonte: Windographer. Bechmann *et al.* (2009).

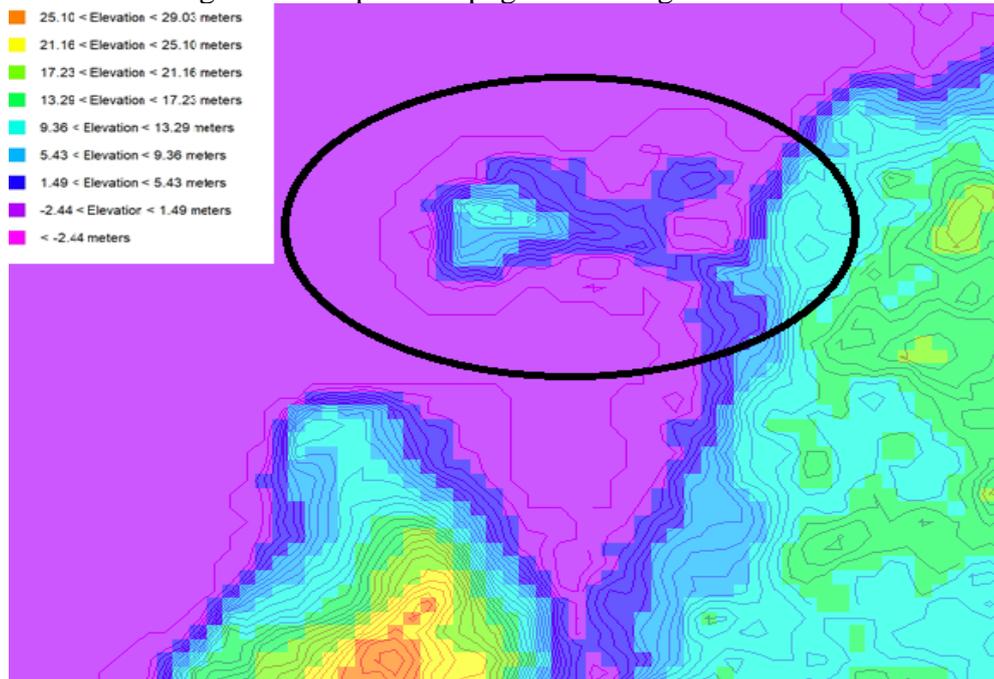
Conforme observado na Figura 5, a diferença mais perceptível entre os dados do MERRA-2 e os dados mensurados se trata da direção principal de escoamento do vento que, segundo o MERRA-2, está presente a  $270^\circ$ , enquanto nos dados de medições anemométricas está presente a  $240^\circ$ .

Analisando as duas distribuições de frequência das direções do vento, percebe-se uma similaridade presente nos dados de reanálises climatológicas do MERRA-2, evidenciando a importância e a relevância desta base de dados para fins de análises de terrenos em que se deseja realizar o projeto de um parque eólico.

### 6.2. VALIDAÇÃO DOS DADOS DE TOPOGRAFIA

Os dados de topografia utilizados para simular o campo de velocidades através do OpenWind foram extraídos, também, de uma base de dados de acesso público desenvolvida pela NASA. A partir da importação destes dados para o programa, gerou-se um mapa de topografia do terreno, observado através da Figura 6.

Figura 6 – Mapa de Topografia da Região Estudada



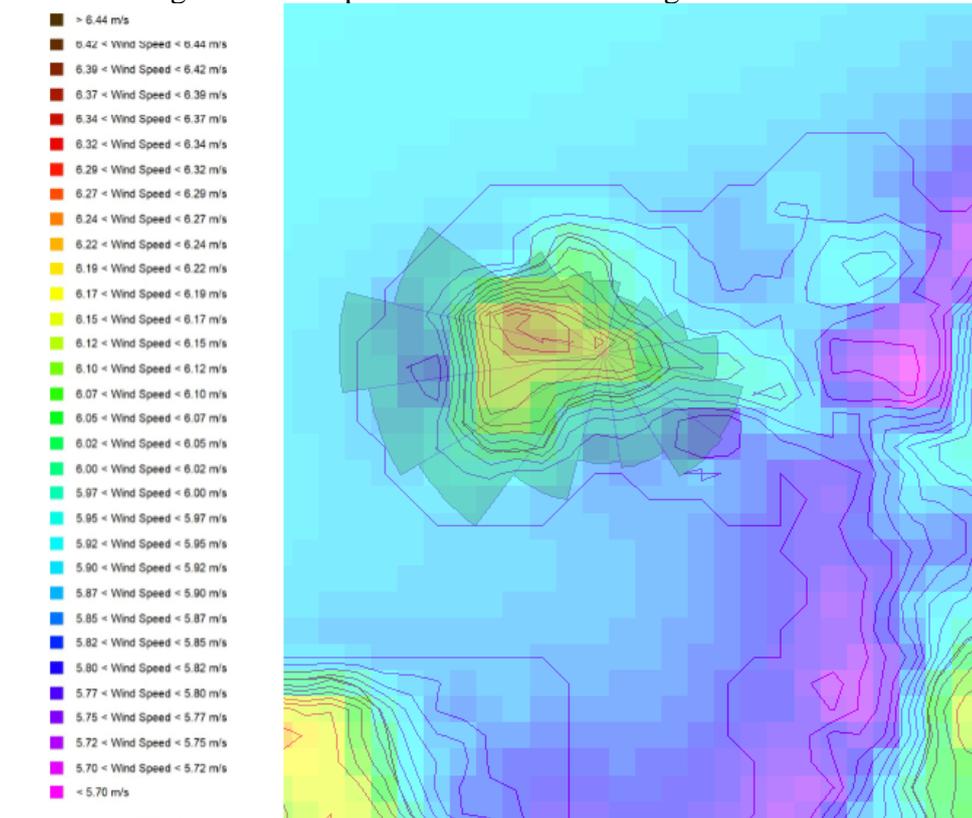
Como pode-se observar no mapa e na sua legenda, a topografia da região se assemelha com o que foi descrito por Radünz (2018) quando o mesmo realizou um estudo do escoamento nesta região através de um modelo de CFD e caracterizou a topografia da região com uma elevação de 12 metros.

### 6.3. ANÁLISE DO CAMPO DE VELOCIDADES

O campo de velocidades gerado com base no modelo *Mass-Consistent* foi calculado para a altura de 25 metros. O primeiro campo teve o objetivo de ilustrar as variações presentes no escoamento de vento próximas à superfície do terreno e identificar as semelhanças com o estudo proposto por Radünz (2018). Já o segundo campo, teve o objetivo de ilustrar quais seriam as velocidades máximas atingíveis no terreno em uma altura que pudesse ser alocada uma turbina eólica de grande porte.

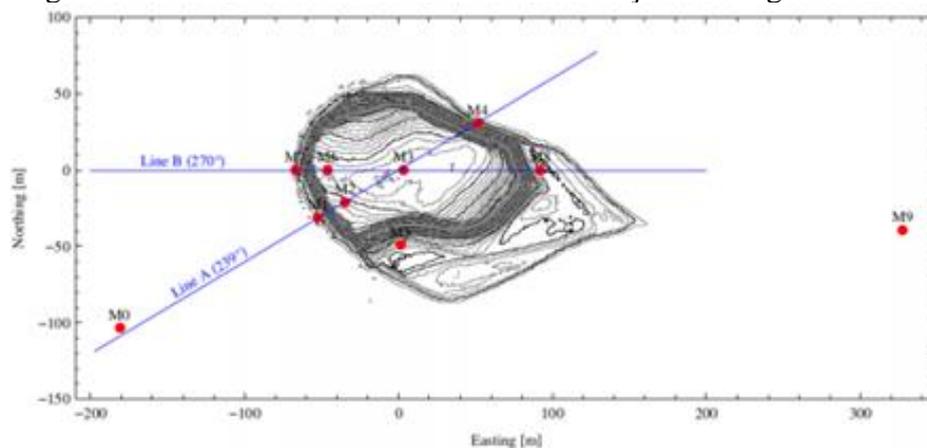
O primeiro campo de velocidades, calculado para uma altura de 25 metros é ilustrado pela Figura 7 e como pode-se observar, identificou uma velocidade máxima de 6,25 m/s na maior elevação da escarpa.

Figura 7 – Campo de Velocidades da Região Estudada



Radünz (2018) analisa, em seu estudo, a variação da RV em uma linha horizontal a  $270^\circ$  no local estudado, representada pela Linha B na Figura 8 e compara a sua modelagem com os valores medidos por torres anemométricas.

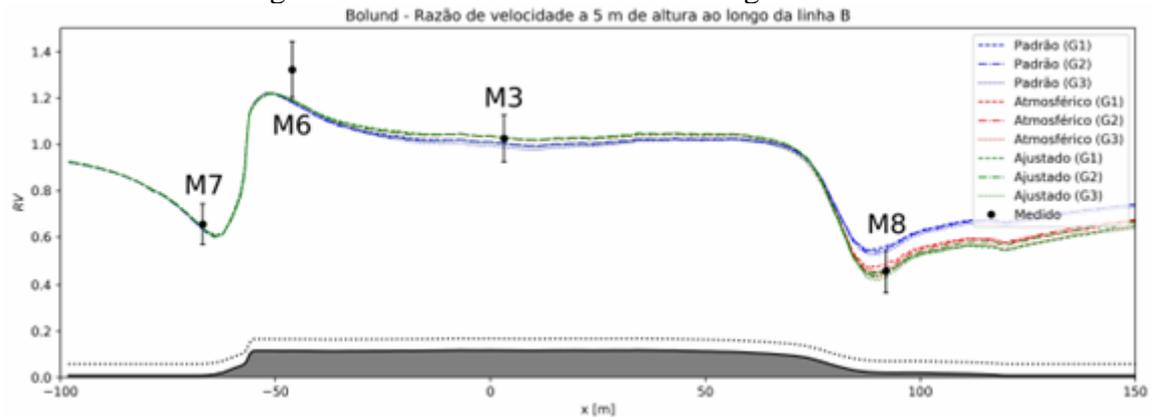
Figura 8 – Posicionamento dos Pontos de Medições da Região Estudada



Fonte: Berg *et al.* (2011).

Ao projetar a variação da RV ao longo da Linha B, as medições, indicadas pela legenda como “Medido” na Figura 9, demonstram que, à montante da escarpa, há um decréscimo da RV. Além disso, logo no início da escarpa há um pico da RV e conforme se desenvolve o escoamento ao longo do terreno, a RV se mantém estável, decrescendo novamente à jusante.

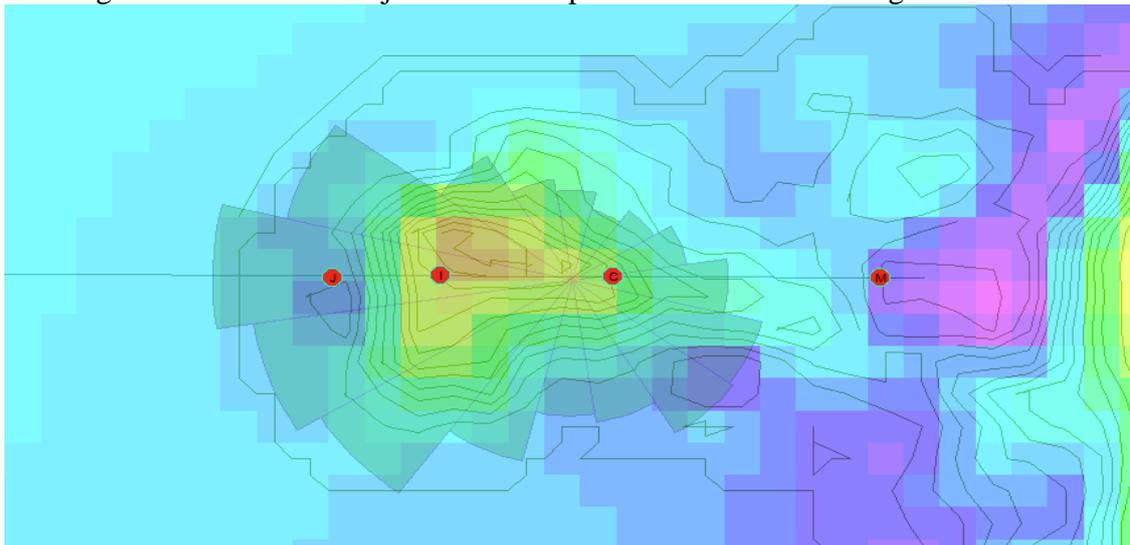
Figura 9 – Razão de Velocidade ao longo da linha B



Fonte: Radünz (2018).

Para verificação e validação da modelagem utilizada neste trabalho com o auxílio do *software* OpenWind, foram selecionados 4 pontos ao longo da mesma linha B: o ponto J à jusante da escarpa, o ponto I no início da escarpa, o ponto C no centro do terreno e o ponto M à montante da escarpa. Estes pontos podem ser observados pela Figura 10.

Figura 10 – Linha B Projetada no Campo de Velocidades da Região Estudada



A Tabela 1 compara os valores da RV para 4 pontos e os compara com os dados estabelecidos pelas medições anemométricas.

Tabela 1– Comparação entre Razões de Velocidade extraídas do OpenWind com Razões de Velocidades extraídas das medições anemométricas

Ponto	Mass-Consistent	Medições	Varição
J	0,98	0,65	51%
I	1,04	1,32	-21%
C	1,02	1,08	-5%
M	0,98	0,47	108%

Como pode-se perceber, no campo de velocidades do presente trabalho, o perfil de velocidades é semelhante ao perfil extraído diretamente das medições anemométricas, com os picos, vales e estagnações da RV ocorrendo nos mesmos pontos em ambos os casos. No entanto,

o modelo utilizado não se mostrou eficiente na exatidão dos valores, apresentando as maiores variações principalmente nos pontos de complexidade do terreno.

#### 6.4. ANÁLISE DO CUSTO COMPUTACIONAL

A metodologia empregada através do OpenWind apresentou um baixo custo computacional conforme o esperado. A geração do campo de velocidades foi realizada dentro de um período de intervalo de tempo de 10 minutos para um computador pessoal com processador de 8ª geração Intel Core i7 com disco rígido de 2 TB, memória RAM de 8 GB e sistema operacional de 64 bits.

### 7. CONCLUSÃO

No presente trabalho, foi analisada a implementação de uma base de dados de reanálise climática de acesso público para fins de projetos eólicos em terrenos complexos. A base de dados pública utilizada foi a MERRA-2, produzida pela NASA, e, a partir dela, dados de direções e velocidades médias do vento de uma região foram extraídos e comparados com dados de medições anemométricas realizadas na mesma região. O objetivo desta comparação era validar a utilização desta base de dados para fins de estudos de escoamento de vento em regiões com terrenos complexos, a fim de estimular novos projetos de parques eólicos.

As distribuições das direções do vento influenciam diretamente no posicionamento do eixo das pás das turbinas eólicas presentes em um parque, visto que as mesmas são posicionadas para extrair a maior quantidade de potência disponível do escoamento. Embora houvesse o risco dos dados da MERRA-2 apresentarem discrepâncias frente aos dados de medições, percebeu-se o contrário, pois os dados da base da NASA mostraram-se muito próximos aos dados de medições anemométricas, minimizando a possibilidade de ocorrência deste erro.

Outra análise que foi realizada se refere a utilização do modelo digital SRTM, da NASA, para extração de dados topográficos de terrenos. Este modelo apresentou um bom desempenho, visto que projetou a escarpa com altura máxima semelhante ao que é indicado pelos outros estudos realizados na mesma região e conseguiu caracterizar de maneira adequada a região ao redor, composta por mar.

Por fim, a última análise realizada foi feita com o objetivo de verificar o desempenho do modelo *Mass-Consistent* utilizado pelo *software* computacional OpenWind em um terreno complexo. Os dados obtidos pela geração do campo de velocidades no programa foram comparados com os dados de medições anemométricas presentes no trabalho de Radünz (2018). Qualitativamente, o modelo utilizado apresentou um resultado próximo ao esperado no estudo do desenvolvimento do escoamento para o terreno, identificando picos e vales de velocidade nos mesmos pontos encontrados pelas medições. No entanto, quantitativamente, levando em consideração a exatidão dos valores, o modelo se mostrou ineficaz nas áreas de alta complexidade do terreno e eficaz nas áreas em que a topografia do terreno não apresentava grandes variações.

Sendo assim, não se recomenda a utilização do modelo utilizado em regiões cujo terreno apresenta grande complexidade, pelo menos em distâncias muito próximas às variações de topografia. No entanto, em regiões em que o terreno apresenta regularidade, o modelo utilizado pelo *software* se mostrou eficiente e se aproximou de modelos desenvolvidos com base em medições anemométricas. Recomenda-se a realização de novos projetos de validação com o OpenWind devido ao baixo custo computacional requerido e à gama de funções presentes no programa que não foram utilizadas neste trabalho, principalmente em terrenos com orografia complexa, a fim de encontrar parâmetros que possam minimizar os erros encontrados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBEólica - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Eólica já é a segunda fonte da matriz elétrica brasileira com 15 GW de capacidade instalada**. 2019. Disponível em: <http://www.canalbioenergia.com.br/eolica-ja-e-a-segunda-fonte-da-matriz-eletrica-brasileira-com-15-gw-de-capacidade-instalada/>. Acesso em: 20 set. 2019.
- ARAÚJO, 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. 24 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- BASTAZANI, M. E. S. **Comparação entre diferentes reanálises como base de dados para estimativa da produção eólio-elétrica**. 2018. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Fluminense, 2018.
- BECHMANN, A.; JOHANSEN, J.; SORENSEN, N. N. **The Bolund Experiment** - Design of Measurement Campaign using CFD. Risø National Laboratory, 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/242705522\\_The\\_Bolund\\_Experiment\\_-\\_Design\\_of\\_Measurement\\_Campaign\\_using\\_CFD](https://www.researchgate.net/publication/242705522_The_Bolund_Experiment_-_Design_of_Measurement_Campaign_using_CFD). Acesso em: 18 set. 2019.
- BERT, J. *et al.* The Bolund Experiment, Part I: Flow Over a Steep, Three-Dimensional Hill. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 141, p. 219–243, 2011.
- BIBLIOTECA DO MERRA. Disponível em: <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/>. Acesso em: 20 set. 2019.
- BIBLIOTECA DA ELEVAÇÃO DO TERRENO. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 20 set. 2019.
- DE FREITAS FILHO, D. G. R. **Análise da Aplicação da Dinâmica dos Fluidos Computacional para Avaliação do Potencial Eólico em Terrenos Complexos**. 2012. 75 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluídos. 7. ed. LTC, 2010.
- JACKSON, P. S.; HUNT, J. C. R. Turbulent Wind Flow over a Low Hill. **Quart J. R. Met. Soc.**, p. 929-955, 1975.
- JUSTUS, C. G. *et al.* Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. **Journal of applied meteorology**, v. 17, 1978. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/26178009?seq=1>. Acesso em: 20 set. 2019.
- MATTUELLA, J. M. L. **Avaliação em Túnel de Vento do Comportamento da Camada Limite Atmosférica em Terrenos Complexos**. 2012. 286 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

OLIVEIRA, L. D. S. D. **Regras e Boas Práticas para Instalação de Torres Anemométricas Voltadas para Estudo de Potencial Eólico**. 2011. 155p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

OPENWIND. **User Manual**. 2018. Disponível em: <https://awsdewi.ul.com/software-openwind/>. Acesso em: 18 set. 2019.

QGIS DOCUMENTATION. **Dados Raster**. 2017. Disponível em: [https://docs.qgis.org/2.14/pt\\_BR/docs/gentle\\_gis\\_introduction/raster\\_data.html](https://docs.qgis.org/2.14/pt_BR/docs/gentle_gis_introduction/raster_data.html). Acesso em: 25 set. 2019.

RADÜNZ, W. **Metodologia de micrositing para terrenos complexos baseada em CFD com softwares livres de código aberto**. 2018. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

REYNOLDS, O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 186, p. 123-164, 1894.

ROCA, W. **Dimensionamento de um parque eólico e sua subestação comparando ferramentas de CFD e atlas eólicos**. 2015. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

STANGROOM, P. **CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain**. 2004. 298 p. Nottingham – UK. 2004.

STÜKER, E. *et al.* Comparação entre os dados de vento das reanálises meteorológicas ERA-Interim e CFSR com os dados das estações automáticas do INMET no Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Pampa. **Revista Ciência e Natura**, v. 38, p. 284-290, 2016.

WINDBENCH. **Bolund**. 2011. Disponível em: <https://windbench.net/bolund>. Acesso em: 20 set. 2019.

WINDOGRAPHER. 2018. Disponível em: <https://www.windographer.com/>. Acesso em: 20 set. 2019.