



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA O
OBSERVATÓRIO DO PICO DOS DIAS**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Michel Yasuyuki Gejima Junior

Itajubá, MG, Brasil

2017

ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA O OBSERVATÓRIO DO PICO DOS DIAS

por

Michel Yasuyuki Gejima Junior

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

Orientador: Arcilan Trevenzoli Assireu

**Itajubá, MG, Brasil
2017**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

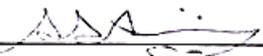
**ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA O OBSERVATÓRIO DO
PICO DOS DIAS**

elaborada por

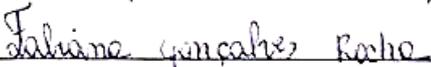
Michel Yasuyuki Gejima Junior

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

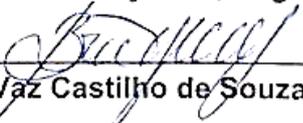
Comissão Examinadora:



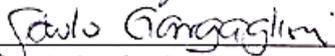
Arcilan Trevenzoli Assireu, Dr. (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Fabiana Gonçalves, Eng. Civ. (UNIFEI)



Bruno Vaz Castilho de Souza, Dr. (LNA/MCTI)



Saulo Roberly Gargaglioni, MSc. (LNA/MCTI)

Itajubá, 20 de novembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais por todo amor e dedicação para compor a minha formação. Sem eles nada seria possível. Aos meus avós por todo carinho e confiança depositados a mim, espero poder estar retribuindo deixando-os orgulhosos. Aos meus tios por cada conselho e orientação que me fizeram amadurecer e me tornar uma pessoa melhor a cada dia. E a todos os meus familiares, pois eu acredito que a família é muito importante na vida de todos.

Aos meus amigos por todos os momentos compartilhados, seja na alegria ou nos momentos mais difíceis. Sempre guardarei com carinho todas as lembranças que tive o prazer de compartilhar com cada um de vocês.

Agradeço também a todos os meus professores, que me ensinaram cada parte essencial da vida. Seja pelo conhecimento adquirido durante as aulas ou pelas experiências compartilhadas. Em especial gostaria de agradecer aos professores do curso de Ciências Atmosféricas da UNIFEI, foi um prazer enorme ter a oportunidade de conhecê-los. E acima de tudo, saber que vocês são os principais pilares para a formação intelectual de cada aluno que passou e vai passar por essa etapa magnífica da vida.

Sou grato ao Professor Doutor Arcilan pela oportunidade e orientação durante o desenvolvimento desse trabalho, espero ter correspondido as expectativas. Também aos alunos André Reis, Lara Marques e Paola Silva pelo auxílio e por toda contribuição perante esse estudo.

Agradecimentos ao LNA e ao OPD pelos dados e por todo suporte e disponibilidade fornecidos.

Para finalizar, contudo não menos importante, agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado iluminado o meu caminho e por sempre ouvir as minhas preces.

Aos meus pais Michel Yasuo Gejima e
Belmira S. da Silva Gejima.

“O que faz andar o barco não é a vela enfunada,
mas o vento que não se vê.”

— Platão.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO PARA O OBSERVATÓRIO DO PICO DOS DIAS.

AUTOR(A): MICHEL YASUYUKI GEJIMA JUNIOR
ORIENTADOR: ARCILAN ASSIREU TREVENZOLI
Local e Data da Defesa: Itajubá, 20 de novembro de 2017.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial eólico para implementação de geradores eólicos no Observatório do Pico dos Dias. Para esta tarefa, foram disponibilizados pelo Laboratório Nacional de Astrofísica dados de ventos no período de dez anos de medição. Através deles foi possível realizar uma breve análise para determinar a direção predominante do vento, bem como o seu comportamento diurno, sazonal e anual. A partir desses resultados, foram feitas simulações em túnel de vento com uma maquete em escala representativa da orografia do Pico do Dias. A maquete foi construída a partir de um modelo digital do terreno elaborada no Global Mapper® para analisar a interação do vento com o relevo da região. Os resultados das simulações mostraram que no topo da colina tem-se uma intensificação dos ventos. A análise diurna indicou ventos intensos durante o período da madrugada, que são capazes de fornecer energia cinética acima do mínimo esperado para manter os geradores eólicos em funcionamento. O estudo sazonal permitiu identificar em qual época do ano os ventos são mais propícios ao aproveitamento eólico. Esses resultados demonstraram que ao longo das estações do ano, os ventos atingem velocidades superiores no inverno. Com essas análises é possível dizer que para o Pico dos Dias, o vento é favorável a utilização de geradores eólicos.

Palavras-chave: Terreno complexo. Modelo digital de elevação. Túnel de vento. Energia eólica. Sítios astronômicos. Energia renovável.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização do OPD, (a) mapa ilustrativo, (b) informações do local, (c) imagem de satélite. Fonte: Google Maps, 2017.	3
Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas fixo à superfície da Terra em rotação. Fonte: MARTINS et al., 2008.	5
Figura 2.2 - Vento geostrófico resultante do equilíbrio das forças de Coriolis (F_{CO}) e Gradiente de pressão (F_P) em níveis atmosféricos elevados. Fonte: MARTINS et al., 2008.	7
Figura 2.3 - Vento gradiente no Hemisfério Sul em torno de centros de baixa pressão (B) e de alta pressão (A). Fonte: MARTINS et al., 2008.	7
Figura 2.4 - Circulação atmosférica nas proximidades de baixa pressão (B) e alta pressão (A) no Hemisfério Sul sob a influência do atrito da superfície. Fonte: MARTINS et al., 2008.	8
Figura 2.5 - Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. Fonte: MARTINS et al., 2008.	9
Figura 2.6 - Perfil da distribuição de Weibull de acordo com o parâmetro k. Fonte: AMARANTE et. al., 2009.	10
Figura 3.1 - Modelo Digital de Elevação em duas dimensões, o quadrado em vermelho delimita a região onde está localizado o Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	13
Figura 3.2 - Curvas de Nível para a região do Observatório do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	14
Figura 3.3 - Modelo Digital de Elevação do Terreno em 3 dimensões. A seta indica a localização do Observatório do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	15
Figura 3.4 - Exemplo do perfil de elevação do terreno que foi “plotado” no MatLab® para a construção da maquete. Fonte: DO AUTOR, 2017.	16
Figura 3.5 - Dimensões da maquete. Fonte: DO AUTOR, 2017.	16
Figura 3.6 - Esqueleto da maquete, feito de papel e papelão. Fonte: DO AUTOR, 2017.	17
Figura 3.7 - Maquete finalizada. Fonte: DO AUTOR, 2017.	18
Figura 3.8 - Comparação entre a maquete e o modelo digital de elevação do terreno. Fonte: DO AUTOR, 2017.	19
Figura 3.9 - Anemômetro de fio quente. Fonte: DO AUTOR, 2017.	20
Figura 3.10 - Câmara vazia indicando os pontos de medição. Fonte: DO AUTOR, 2017.	21
Figura 3.11 - Perfil do vento para todos os pontos, do chão ao topo da câmara. Fonte: DO AUTOR, 2017.	22
Figura 3.12 - Perfil do vento para os pontos escolhidos no túnel do vento, do chão ao topo da câmara. Fonte: DO AUTOR, 2017.	22
Figura 3.13 - Câmara com o fundo falso. Fonte: DO AUTOR, 2017.	23
Figura 3.14 - Perfil do vento nos pontos escolhidos, entre a altura 35 e 51 cm, no túnel de vento com fundo falso. Fonte: DO AUTOR, 2017.	24
Figura 4.1 - Indicação do vento predominante a partir de uma rosa dos ventos para o Pico dos Dias de acordo com os dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.	25
Figura 4.2 - Histograma com a frequência de velocidade do vento para todo o período estudado, construído com base nos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.	26

Figura 4.3 - Perfil da velocidade do vento diurno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.	27
Figura 4.4 - Perfil da velocidade do vento mensal construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.	27
Figura 4.5 - Perfil da velocidade do vento mensal em cada mês construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	28
Figura 4.6 - Perfil da velocidade do vento anual construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.	28
Figura 4.7 - Histograma com frequência de velocidade do vento no verão construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	29
Figura 4.8 - Perfil da velocidade do vento no verão construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	30
Figura 4.9 - Histograma com frequência de velocidade do vento no outono construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	31
Figura 4.10 - Perfil da velocidade do vento no outono construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	31
Figura 4.11 - Histograma com frequência de velocidade do vento no inverno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	32
Figura 4.12 - Perfil da velocidade do vento no inverno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	33
Figura 4.13 - Histograma com frequência de velocidade do vento na primavera construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	34
Figura 4.14 - Perfil da velocidade do vento na primavera construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.....	34
Figura 4.15 - Localização do Observatório do Pico dos Dias no modelo digital (esquerda) e na maquete (direita). Fonte: DO AUTOR, 2017.....	35
Figura 4.16 – Perfil de velocidade do vento vindo de noroeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	36
Figura 4.17 - Perfil de velocidade do vento vindo de norte nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	37
Figura 4.18 - Perfil de velocidade do vento vindo de nordeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	38
Figura 4.19 - Perfil de velocidade do vento vindo de nordeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	39
Figura 4.20 - Perfil de velocidade do vento vindo de oeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.	40

LISTA DE TABELA

Tabela 5.1 - Diferença da velocidade do vento medido no topo e na base da maquete.	42
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ρ – Densidade
 ϕ – Latitude
2D – Duas dimensões
3D – Três dimensões
A – Alta pressão
B – Baixa pressão
c – Fator de escala da distribuição de Weibull
f – Força de Coriolis
 F_p – Força do gradiente de pressão
 F_r – Fricção
g – Gravidade
GEOTIFF – Geographical Tagged Image File Format
HN – Hemisfério norte
HS – Hemisfério sul
K – Constante de Von Karmán
k – Define a forma da distribuição de Weibull
LNA – Laboratório Nacional de Astrofísica
MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDE – Modelo digital de elevação do terreno
OPD – Observatório do Pico dos Dias
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
u – Vento zonal
 U_a – Velocidade da parcela em um sistema inercial
UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá
v – Vento meridional
 $v(z)$ – Velocidade do vento em uma determinada altura z
 v^* – Velocidade de fricção
w – Vento vertical
 Z_0 – Comprimento da rugosidade

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELA.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	X
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 DINÂMICA DO VENTO	4
2.2 VENTOS EM ALTOS NÍVEIS	6
2.3 VENTOS PRÓXIMOS A SUPERFÍCIE	7
2.4 BASE DE DADOS.....	9
2.5 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1 TRATAMENTO DOS DADOS.....	12
3.2 OROGRAFIA DO PICO DOS DIAS.....	12
3.3 DESCRIÇÃO DA MAQUETE	16
3.4 DESCRIÇÃO DO ENSAIO NO TÚNEL DE VENTO	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5 CONCLUSÃO	41
6 REFERÊNCIAS.....	45

1 INTRODUÇÃO

A população mundial em 2017 está estimada em 7,5 bilhões de pessoas e esse número tende a crescer para 10 bilhões até o ano de 2056 (WM, 2017). Com o aumento populacional gradativo, a demanda por geração de energia também tende a aumentar. Atualmente, as principais fontes de energia são de origem fóssil (gás natural, petróleo, carbono dentre outros). Estudos recentes mostram que essa dependência irá provocar o esgotamento desses recursos naturais (STAOIL, 2016). Outro ponto relevante no uso de combustíveis fósseis é que durante sua queima ocorre a liberação de poluentes que estão diretamente ligados nas questões de mudança no clima (IPCC, 2014). A energia elétrica representa cerca de 65% da produção de energia do planeta, é responsável pelo grande desenvolvimento tecnológico e o crescimento econômico em âmbito mundial (BELTRÁN-TELLES, 2017). Uma parte da geração da energia elétrica produzida atualmente é de origem fóssil, portanto, também está sujeita as questões levantadas acima. Uma das alternativas para suprir as necessidades globais foi a busca por fontes de energia renovável, tais como: solar, eólica, hidráulica, biomassa, biocombustíveis dentre outras.

Energias renováveis são classificadas desta maneira pois são fontes capazes de manter-se disponíveis durante um longo período de tempo, contam com recursos que se regeneram ou se mantem ativos permanentemente. Seus processos durante a geração de energia não prejudicam o planeta, desta forma, são consideradas fontes de energia limpa (JUGEND; FIGUEIREDO, 2017). Existe um maior interesse em pesquisa na produção de energia renovável proveniente do sol e do vento devido a maior disponibilidade desses recursos ao longo do planeta Terra (BELTRÁN-TELLES, 2017). Segundo o Boletim da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2016) o número de parques eólicos no Brasil tem crescido rapidamente. Em 2016, 81 usinas foram instaladas fechando o ano com um total de 430 usinas eólicas pelo país, um crescimento de 23,06% em relação a dezembro de 2015. Tais pesquisas demonstram a importância no estudo do regime dos ventos, e isto acontece com o intuito de identificar regiões com grande potencial para construção de sítios eólicos (LIRA et al., 2017).

Para um local ser favorável a implementação de um parque eólico, ele necessariamente deve possuir um regime de ventos constante e com pouca

turbulência. Esses atributos geralmente são encontrados em terrenos planos, pois o vento consegue obter um melhor escoamento quando comparado com terrenos irregulares. Estudos anteriores demonstram que é possível ter um aproveitamento eólico com ventos médios superiores a 2,54m/s (LIMA; BEZERRA FILHO, 2012).

Segundo Rosa e Tiago Filho (2007) para avaliar o potencial eólico de uma região, a princípio é necessário conhecer o regime dos ventos. A instalação de estações meteorológicas é fundamental para obter tal conhecimento. Também podemos obter informações sobre o vento através de simulações computacionais, onde é possível determinar as características do vento sobre uma região, embora esse procedimento não seja tão confiável em comparação aos dados medidos em uma estação meteorológica.

Com a construção de um modelo reduzido em escala da região de interesse, é possível realizar testes em túnel de vento para entender e avaliar a interação do vento com a região e assim, determinar a capacidade de implementação de sistemas eólicos sobre a área estudada.

As análises em túneis de vento geralmente são realizadas para terrenos planos. Estudos em terrenos complexos com morfologias irregulares são mais difíceis de serem encontrados justamente por sua complexidade de entendimento (ROBALLO; FISCH; GIRARDI, 2009). Instalação de turbinas eólicas em terrenos complexos tem se tornado cada vez mais comum, embora não seja o melhor local para a implementação de um parque eólico, devido ao alto nível de turbulência e cisalhamento no fluxo de vento (TENELER, 2011).

Visando esse pensamento e partindo de uma suposta finalidade para este estudo, pretende-se realizar uma pesquisa para avaliar a viabilidade de implementação de turbinas eólicas de baixo custo no Observatório do Pico dos Dias (OPD) para geração de energia elétrica.

O Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) é um instituto de pesquisa em astronomia, órgão que é responsável por gerenciar o Observatório do Pico dos Dias. O OPD se encontra em uma região de terreno complexo, localizado no sul de Minas Gerais, entre os municípios de Brazópolis e Piranguçu (Figura 1.1: Localização do OPD). Está a 1864m acima do nível médio do mar, nas coordenadas geográficas: - 45° 34' 57" de longitude e -22° 32' 04" de latitude (LNA, 2011). Sendo o OPD considerado um dos principais polos em pesquisa astronômica da América Latina.



Figura 1.1 - Localização do OPD, (a) mapa ilustrativo, (b) informações do local, (c) imagem de satélite. Fonte: Google Maps, 2017.

Esse estudo foi baseado em medições realizadas pela estação meteorológica localizada no Observatório do Pico dos Dias, que foram fornecidas pelo Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) / MCTIC, com o intuito de utilizar das próprias condições naturais do local para gerar energia elétrica de modo eficiente e assim, reduzir os gastos com energia, bem como promover o desenvolvimento sustentável. A partir dessas medições foi possível realizar análises cujos os resultados serão discutidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O vento refere-se ao movimento das parcelas de ar na atmosfera. Para a meteorologia, o vento é considerado como uma variável muito importante assim como a temperatura, umidade e a pressão. Ele é capaz de mudar as condições do tempo através do transporte de energia e umidade pela atmosfera. Ventos muito intensos na atmosfera podem estar relacionados a tornados e furacões. Já ventos com muita umidade podem estar associados com os processos de formação de nuvens e de água precipitável.

Por ser um fluido atmosférico em movimento, ele possui energia cinética. Essa energia pode ser utilizada tanto em sua forma bruta quanto transformada em outro tipo de energia, como por exemplo, energia elétrica. Por isso, assim como a água, o vento também é uma fonte de energia inesgotável e pode ser aproveitada pela humanidade para promover o desenvolvimento sustentável.

2.1 Dinâmica do vento

A aceleração sofrida pelas parcelas de ar respeita a segunda lei de Newton, que diz que a força resultante que atua sobre um corpo é igual ao produto da aceleração adquirida por ele vezes a sua massa. Neste caso, o gradiente de pressão é a principal força que atua sobre o movimento das massas de ar. Essa força por unidade de massa que atua sobre uma parcela de ar, por decorrência de um gradiente de pressão, pode ser expressada vetorialmente pela seguinte equação:

$$\frac{F_p}{m} = -\frac{1}{\rho} \nabla p$$

Onde F_p é a força do gradiente de pressão, p é a pressão, ρ é a densidade e m a massa.

Devemos considerar também que as parcelas de ar sofrem a ação da gravidade:

$$\frac{F_g}{m} = g *$$

Onde F_g é a força gravitacional e g^* é a aceleração gravitacional.

A fricção interna representada por F_r , também exerce um papel sobre as parcelas de ar, de modo a fazer com que a parcela resista ao movimento.

Considerando uma parcela de ar individual com massa constante que se move na mesma direção que o escoamento e adotando um sistema de coordenadas inercial, a segunda lei de Newton pode ser reescrita como:

$$\frac{D_a U_a}{Dt} = \sum \frac{F}{m}$$

Onde \mathbf{U}_a representa a velocidade da parcela no sistema inercial e $D_a \mathbf{U}_a / Dt$ a taxa de variação de \mathbf{U}_a .

Essa expressão diz que o somatório de todas as forças aplicadas na parcela deve ser igual a aceleração da parcela de ar. Logo:

$$\frac{D_a U_a}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + g * + F_r$$

Porém, em dinâmica, é adotado um sistema de coordenadas fixo à superfície terrestre (Figura 2.1: Sistema de coordenadas fixo). Esse sistema é composto pelas direções zonal (eixo x) e meridional (eixo y). Por decorrência o vento também possui essas componentes: \mathbf{u} que representa o vento zonal e \mathbf{v} que representa o vento meridional. Também existe a componente \mathbf{w} que representa o vento na vertical e assume valores positivos para ventos ascendentes.

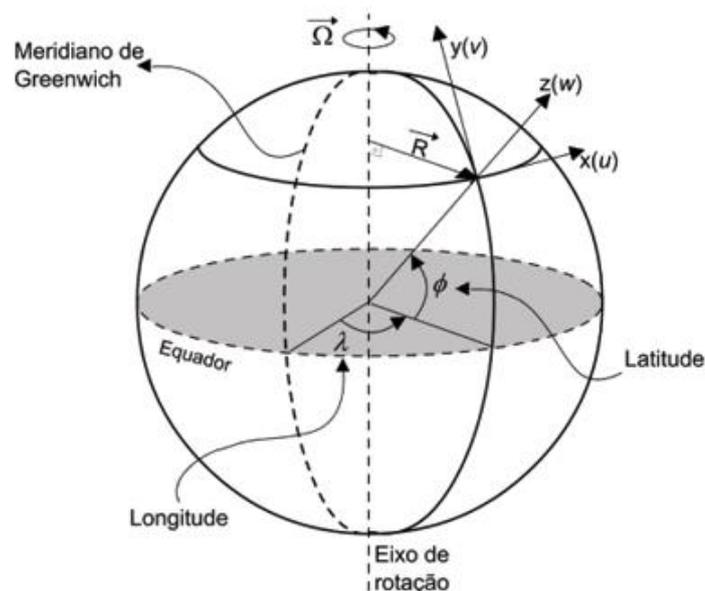


Figura 2.1 - Sistemas de coordenadas fixo à superfície da Terra em rotação. Fonte: MARTINS et al., 2008.

Como a Terra encontra-se em constante movimento, não podemos considerar um sistema de referência inercial. Portanto, para ajustar a equação, deve-se adicionar

ao sistema as chamadas “forças aparentes” que são geradas a partir do movimento de rotação da Terra (HOLTON, 1992).

$$\frac{DU}{Dt} = -2\Omega \times U + \Omega^2 R - \frac{1}{\rho} \nabla p + g + F_r$$

Onde $\mathbf{DU/Dt}$ é a taxa de variação da velocidade, referente ao sistema de coordenadas fixo à superfície da Terra e seguindo o movimento da parcela de ar. O primeiro e o segundo termo do lado direito representam a *força de Coriolis* e a *aceleração centrífuga* respectivamente. Esses são os termos correspondentes as forças aparentes.

A partir da força de gravidade \mathbf{g} , podemos reescrever a equação acima:

$$\frac{DU}{Dt} = -2\Omega \times U - \frac{1}{\rho} \nabla p + g + F_r$$

Com isso obtemos a expressão vetorial geral do movimento das parcelas de ar na atmosfera. Que pode ser expandida em expressões escalares para o vento horizontal zonal (u) e meridional (v):

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + F_{rx}$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + fu + F_{ry}$$

Onde $\mathbf{f=2\Omega \sin\phi}$ é o chamado parâmetro de Coriolis, e ϕ é a latitude do local.

Resumidamente, o vento surge a partir do gradiente de pressão que se instaura pela atmosfera. A força de Coriolis e de atrito atuam apenas para modificar o movimento das parcelas de ar na atmosfera. Esse gradiente de pressão se origina pelo aquecimento diferenciado da atmosfera que está intimamente ligado com a temperatura do ar e as trocas de calor na atmosfera.

2.2 Ventos em altos níveis

Embora a troposfera não seja a região mais alta da atmosfera, é nela que ocorrem a maioria dos fenômenos meteorológicos relacionados a mudança do tempo e do clima. Portanto, quando se trata de analisar os altos níveis, estamos nos referindo ao topo dessa camada.

Nos níveis mais afastados da superfície terrestre o atrito pode ser desprezado. Logo, o vento pode ser descrito pelo equilíbrio entre a força do gradiente de pressão e a força de Coriolis. Essa aproximação que despreza o atrito em altos níveis origina o chamado vento geostrófico (Figura 2.2: Vento geostrófico resultante do equilíbrio das forças de Coriolis (F_{CO}) e Gradiente de pressão (F_P) em níveis atmosféricos

elevados). Justamente por se tratar de uma aproximação o vento geostrófico é um modelo idealizado, mas consegue representar bem o comportamento do vento em altos níveis nas médias e altas latitudes. Vale lembrar que o vento geostrófico é sempre paralelo as isóbaras (linhas de mesma pressão).

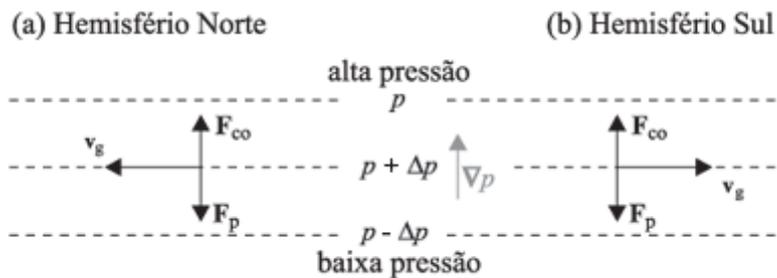


Figura 2.2 - Vento geostrófico resultante do equilíbrio das forças de Coriolis (F_{co}) e Gradiente de pressão (F_p) em níveis atmosféricos elevados. Fonte: MARTINS et al., 2008.

Quando as isóbaras se conectam entre si formando um círculo originam os centros de alta ou baixa pressão. Nesse local o vento geostrófico se modifica e passa a se chamar vento gradiente (Figura 2.3: Vento gradiente no Hemisfério Sul em torno de centros de baixa pressão (B) e de alta pressão (A)). Esse vento também é paralelo as isolinhas de pressão e se origina a partir da aceleração centrípeta que é resultado do desequilíbrio entre a força de Coriolis e a força do gradiente de pressão.

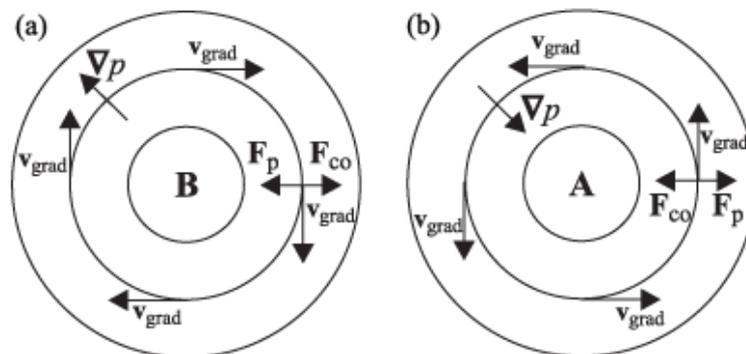


Figura 2.3 - Vento gradiente no Hemisfério Sul em torno de centros de baixa pressão (B) e de alta pressão (A). Fonte: MARTINS et al., 2008.

2.3 Ventos próximos a superfície

Nos níveis próximos a superfície o vento gradiente e o vento geostrófico não podem ser aplicados, pois perto do chão, o atrito começa a atuar. Nessa região da atmosfera, o relevo modela o escoamento das massas de ar. A camada limite planetária é definida como a região compreendida entre a superfície e uma determinada altura (depende das condições de estabilidade da atmosfera), que apresenta um comportamento diferenciado em relação a atmosfera livre devido a interação superfície-atmosfera (HOLTON, 1992).

Próximo ao chão a velocidade do ar diminui devido ao atrito ocasionado pela própria rugosidade da superfície. Portanto a intensidade da força de Coriolis também diminui. Com isso, o vento deixa de ser paralelo as isóbaras e passa a apresentar um componente no sentido da força do gradiente de pressão (Figura 2.4: Circulação atmosférica nas proximidades de baixa pressão (B) e alta pressão (A) no Hemisfério Sul sob a influência do atrito da superfície). Logo, um escoamento ciclônico converge para um centro de baixa pressão provocando movimentos ascendentes, deixando a atmosfera instável e possibilitando a formação de nuvens. Já um escoamento anticiclônico diverge de um centro de alta pressão promovendo movimentos descendentes, deixando a atmosfera estável em condições de tempo bom.

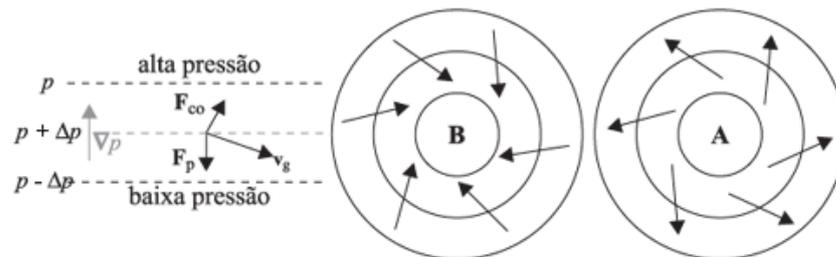


Figura 2.4 - Circulação atmosférica nas proximidades de baixa pressão (B) e alta pressão (A) no Hemisfério Sul sob a influência do atrito da superfície. Fonte: MARTINS et al., 2008.

Outro aspecto importante a ser considerado em baixos níveis está relacionado ao cisalhamento dos ventos. Onde, bem próxima a superfície, o vento é nulo e quando ele se aproxima da atmosfera livre passa a ter um comportamento geostrófico. Na camada limite superficial (onde ocorrem as trocas de calor, momento e umidade entre a superfície e a atmosfera), se observa um perfil vertical logarítmico do módulo da velocidade do vento (Figura 2.5: Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico). Prandtl desenvolveu uma equação para

representar essa variação vertical da velocidade do vento em uma camada limite turbulenta.

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

Onde $v(z)$ é a velocidade em uma determinada altura z , v^* velocidade de fricção, k a constante de von Karmán e z_0 é o comprimento de rugosidade.

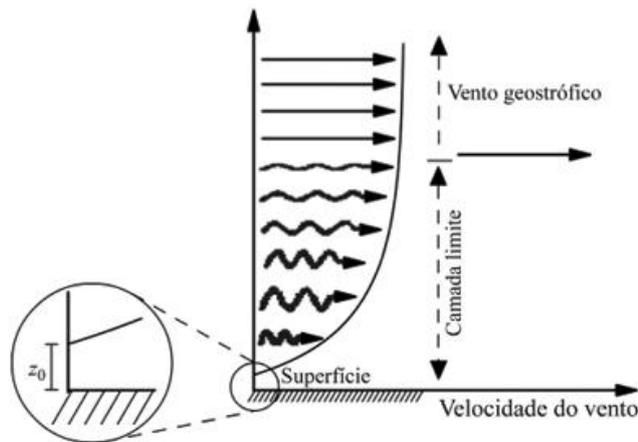


Figura 2.5 - Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. Fonte: MARTINS et al., 2008.

2.4 Base de dados

Os avanços tecnológicos na meteorologia permitiram um grande desenvolvimento em pesquisa, pois a cada dia tem-se uma maior cobertura na coleta de dados meteorológicos, seja por estações meteorológicas, satélites, radar, modelos numéricos, que estão cada vez mais evoluídos. Nos dias de hoje, é possível obter para uma mesma região diversas fontes de dados. O que vai determinar sua aplicabilidade para o setor eólico são a extensão temporal e a resolução espacial, bem como a maneira como esse dado foi obtido (MARTINS et al.,2008).

2.5 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é um parâmetro estatístico que é utilizado para estudar o comportamento do vento quando se deseja avaliar o potencial eólico, pois possui uma maior precisão para descrever os eventos que ocorrem durante esse processo. É uma distribuição de probabilidade contínua e leva em consideração o

desvio padrão dos dados analisados. O parâmetro c , fator de escala da distribuição, está diretamente ligado a velocidade média. O parâmetro k define a forma da distribuição (Figura 2.6: Perfil da distribuição de Weibull de acordo com o parâmetro k) e está diretamente relacionado com o desvio padrão dos dados. A distribuição de Weibull obedece a seguinte equação:

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

Onde k é o parâmetro de forma da distribuição dos ventos, é adimensional, c é o parâmetro de escala, a velocidade média, dado em m/s, u é o parâmetro temporal (período útil) e $f(u)$ é a função da densidade de probabilidade.

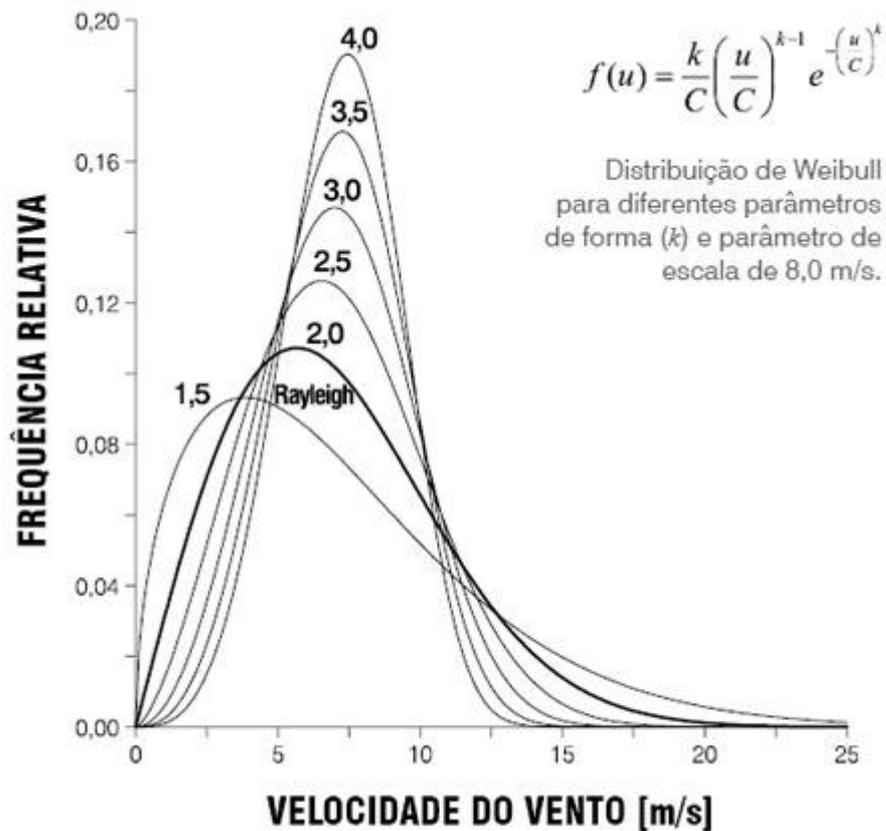


Figura 2.6 - Perfil da distribuição de Weibull de acordo com o parâmetro k . Fonte: AMARANTE et. al., 2009.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o presente trabalho, é primordial realizar um estudo preliminar sobre a orografia da região onde está localizado o OPD, pois essas condições influenciam diretamente no regime do vento, principalmente quando se trata de ventos de baixa intensidade (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2013). Para tal tarefa foi utilizado o software Global Mapper®, capaz de construir um modelo digital de elevação do terreno. Com esse modelo é possível produzir uma maquete em escala reduzida que representa o local de interesse.

Também é importante estudar como é o comportamento do vento sobre a região. O conhecimento de suas direções predominantes e velocidades médias se faz necessário no planejamento desse projeto, considerando que o vento é um agente meteorológico e sua variabilidade interfere substancialmente nas condições de tempo e espaço (MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

A partir dessas considerações, os dados de vento foram disponibilizados pelo LNA. Com essas medições é possível fazer um estudo sobre o vento ao longo do período para determinar: a variação diurna, mensal, sazonal, anual, a direção e intensidade do fluido em questão.

Ensaio em túnel de vento estão sendo bastante difundidos, tanto no meio acadêmico, quanto no meio da pesquisa. Esse método consegue reproduzir fenômenos em pequena escala com um grau de confiabilidade satisfatória em um ambiente controlado. Podemos citar a utilização do túnel de vento para o estudo da dispersão de poluentes na atmosfera, para o escoamento turbulento atmosférico, para o estudo da aerodinâmica de aeronaves e principalmente para estudar o comportamento do vento. Nesse trabalho foram realizados ensaios em um túnel de vento que se encontra Laboratório de Instrumentação Meteorológica da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Os resultados que foram obtidos durante o experimento serão analisados e discutidos, a fim de descrever o comportamento do vento sobre o Pico dos Dias, para determinar a existência de qualquer possibilidade em que o vento possa ser utilizado como fonte de energia alternativa.

3.1 Tratamento dos dados

O OPD conta com uma estação meteorológica automática e três estações meteorológicas móveis, todas capazes de medir direção e velocidade do vento. Para esse trabalho, foram utilizados os dados da estação automática, pois as outras ainda não haviam sido instaladas em locais adequados. As medições feitas no Pico dos Dias foram fornecidas pelo LNA através de um arquivo texto contendo dados dispostos em um intervalo de cinco em cinco minutos durante um período de dez anos com início em 2006 e término em 2016. A princípio, esses dados passaram por um processamento para filtrar e eliminar períodos onde haviam inconsistências nas medições. Com isso, foi possível selecionar apenas as informações relevantes desse arquivo no processo de análise. Após esse trabalho o arquivo nos forneceu a direção e a velocidade do vento.

Com essas informações foi possível determinar a direção predominante dos ventos a partir de uma rosa dos ventos feita no Excel. Também foi construído através do software Windographer® os gráficos do comportamento diurno, mensal e sazonal do vento, bem como os histogramas com as frequências de velocidade durante cada período estudado. Esses resultados preliminares serviram como subsídio primário para entender o comportamento do fluido sobre a região e posteriormente, para a realização de uma simulação em modelo reduzido dentro do túnel de vento.

3.2 Orografia do Pico dos Dias

O estudo sobre a orografia do Pico dos Dias também é relevante, porque exige a necessidade do conhecimento da interação do vento com a morfologia do pico. Um modelo digital de elevação do terreno (MDE) atende as necessidades do estudo, visto que esse modelo fornece os meios adequados para construção de uma maquete representativa do relevo em questão. A interação entre o pico e o vento pode então, ser simulada introduzindo a maquete em um túnel de vento.

A construção do modelo digital foi realizada através do software Global Mapper®. Primeiramente foi preciso fazer o download do arquivo do modelo digital de elevação (MDF) obtido a partir do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) no formato GeoTIFF, disponível em: <https://www.ufrgs.br/labgeo/index.php/dados-espaciais/260-modelos-digitais-de-elevacao-do-srtm-no-formato-geotiff>. Após extrair

o arquivo é possível abri-lo no Global Mapper®. Com esses dados apenas, não é possível delimitar as regiões e tão pouco, identificar a localização exata do OPD. Para resolver esse problema, foi utilizado o software Google Earth® para criar um polígono que delimitava a região de interesse. Abrindo esse polígono juntamente com o modelo digital de elevação no Global Mapper® conseguimos identificar a região onde se encontra o Pico dos Dias (Figura 3.1: Modelo Digital de Elevação em duas dimensões, o quadrado em vermelho delimita a região onde está localizado o Pico dos Dias). Para complementar as informações também foi construído um mapa das curvas de nível da região pelo software QGIS® (Figura 3.2: Curvas de Nível para a região do Observatório do Pico dos Dias).

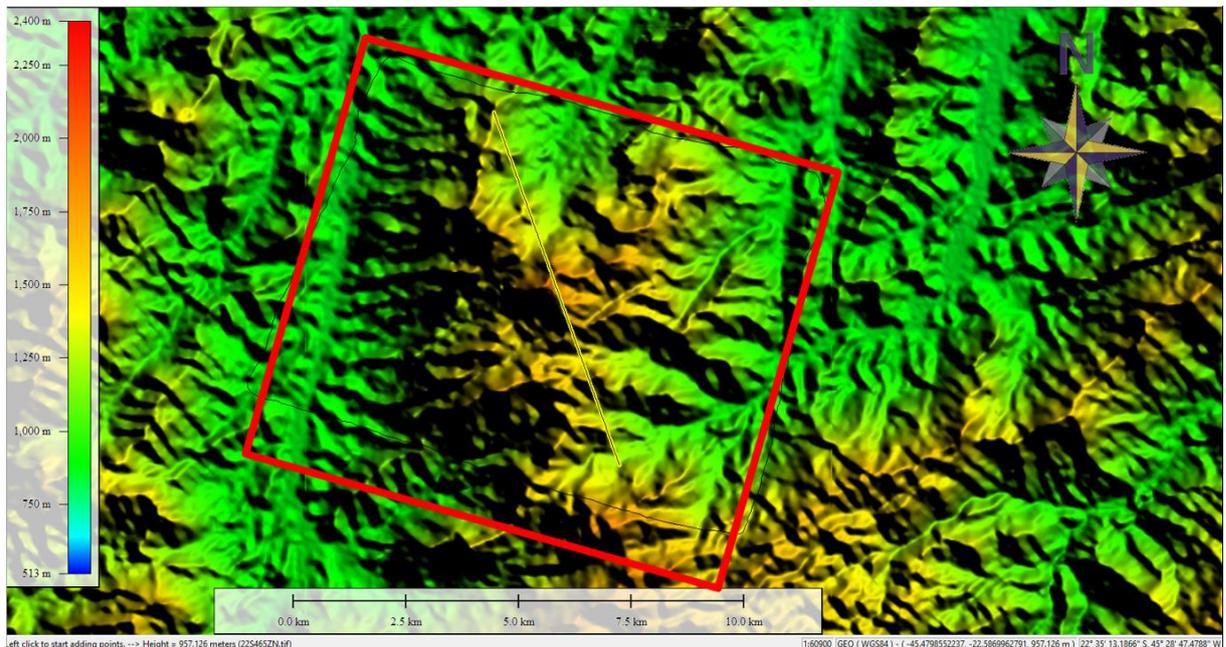


Figura 3.1 - Modelo Digital de Elevação em duas dimensões, o quadrado em vermelho delimita a região onde está localizado o Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

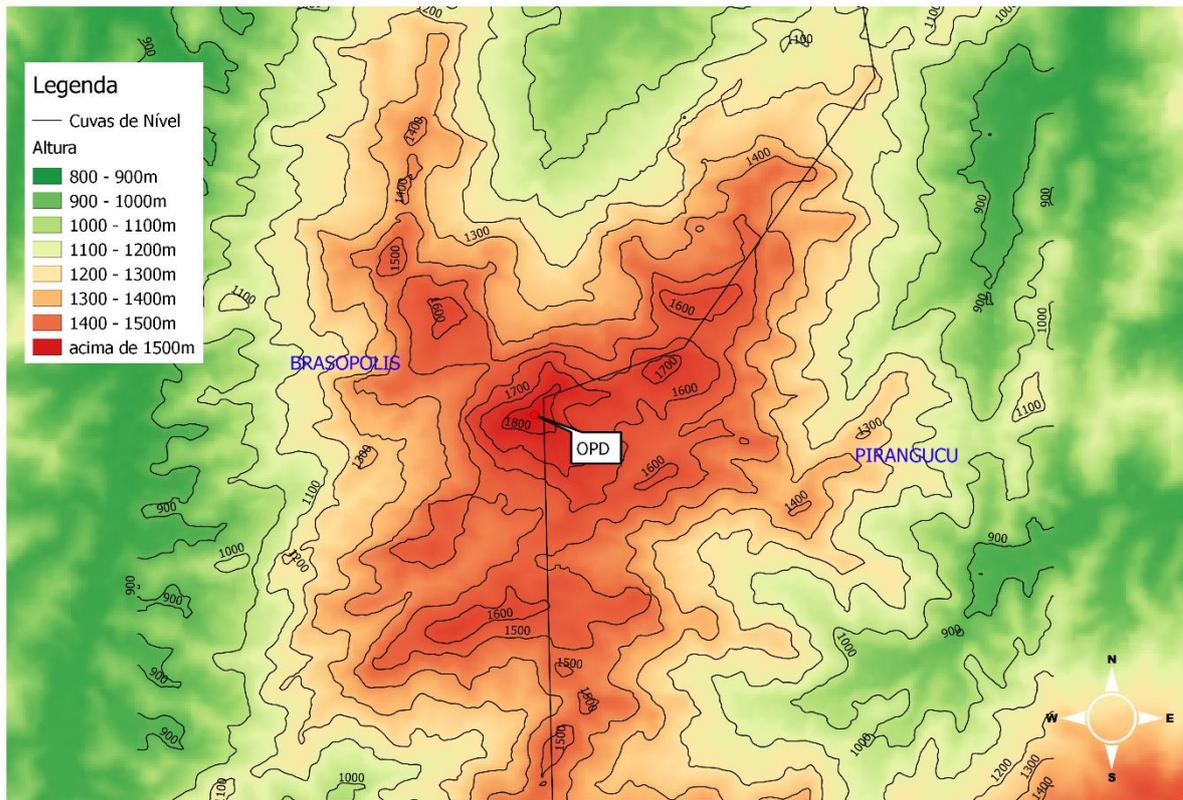


Figura 3.2 - Curvas de Nível para a região do Observatório do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Uma das opções do Global Mapper® permite visualizar o MDE em três dimensões. A partir desse modo podemos identificar com facilidade a localização do Observatório no Pico (Figura 3.3: Modelo Digital de Elevação do Terreno em 3 dimensões. A seta indica a localização do Observatório do Pico dos Dias).

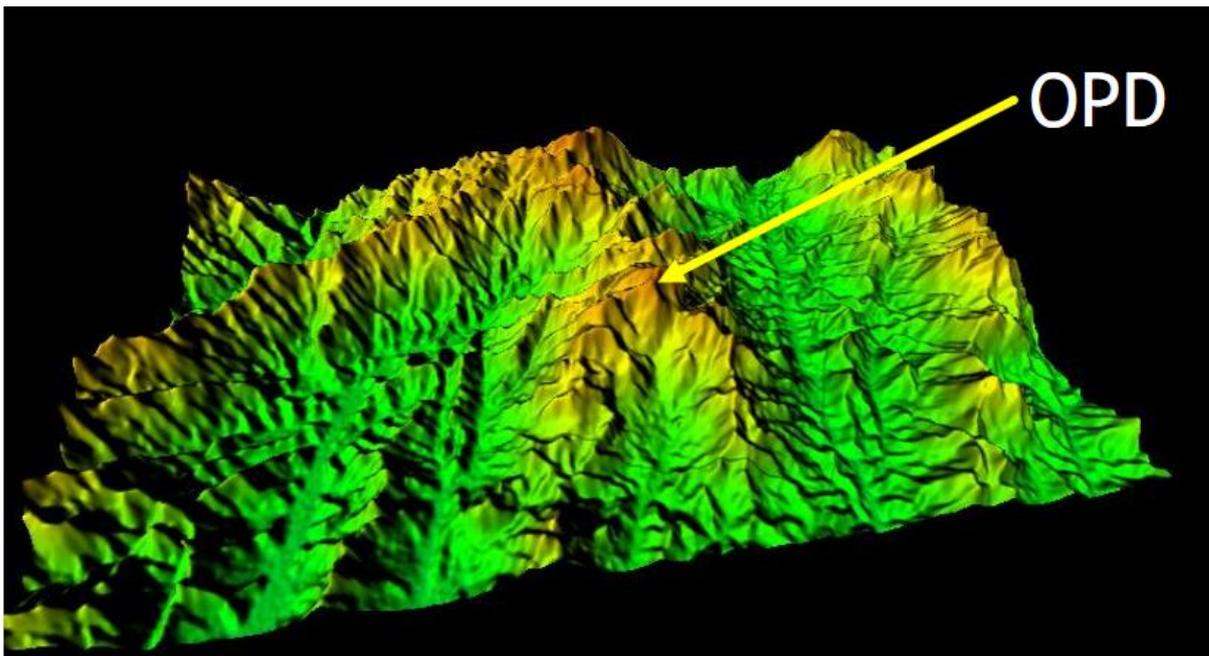


Figura 3.3 - Modelo Digital de Elevação do Terreno em 3 dimensões. A seta indica a localização do Observatório do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Também pelo Global Mapper® foi possível gerar um arquivo no formato texto que continha uma matriz onde cada ponto representava uma elevação do terreno de uma dada região do modelo digital. Utilizando um script feito através do software MatLab® que está disponível no anexo desse trabalho, selecionou-se quinze linhas e vinte e duas colunas dessa matriz para plotar os perfis do relevo do MDE da região do Pico dos Dias (Figura 3.4: Exemplo do perfil de elevação do terreno que foi “plotado” no MatLab® para a construção da maquete). Essa seleção foi categorizada em determinadas orientações já pré-estabelecidas, de modo a manter uma resolução adequada para não gerar disparidades entre o modelo digital de elevação do terreno e o modelo reduzido.

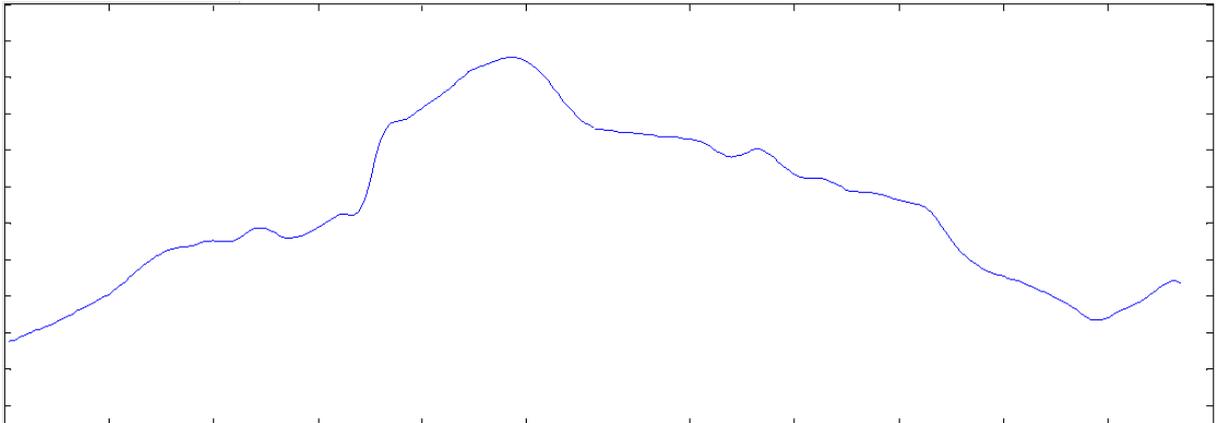


Figura 3.4 - Exemplo do perfil de elevação do terreno que foi “plotado” no MatLab® para a construção da maquete. Fonte: DO AUTOR, 2017.

3.3 Descrição da maquete

É importante que a escala da maquete baseada no MDE seja dimensionada de acordo com as dimensões do Túnel de Vento, que possui 1m de comprimento, 1m de largura e 1m de altura. Para atender essas necessidades, a maquete foi construída com as dimensões de aproximadamente 41cm de largura, 32cm de comprimento e 15cm de altura (Figura 3.5: Dimensões da maquete).



Figura 3.5 - Dimensões da maquete. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Os materiais utilizados na construção foram: papel, papelão, gesso e um porcelanato branco. O porcelanato foi utilizado para servir base, o papel e o papelão foram utilizados como molde para a montagem do esqueleto (Figura 3.6: Esqueleto da maquete), já o gesso foi usado para preencher as lacunas deixadas pelo molde do esqueleto e também para dar o acabamento final na maquete (Figura 3.7: Maquete finalizada).



Figura 3.6 - Esqueleto da maquete, feito de papel e papelão. Fonte: DO AUTOR, 2017.



Figura 3.7 - Maquete finalizada. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Para verificar se a maquete representava de modo satisfatório o modelo digital de elevação do terreno, foram tiradas várias fotos de ângulos diferentes com o intuito de comparar a maquete com o MDE (Figura 3.8: Comparação entre a maquete e o modelo digital de elevação do terreno). Ilustrando nas imagens abaixo, verifica-se uma grande semelhança entre eles. Após o final dessa etapa do trabalho, foi possível introduzir a maquete no túnel de vento para iniciar os testes.

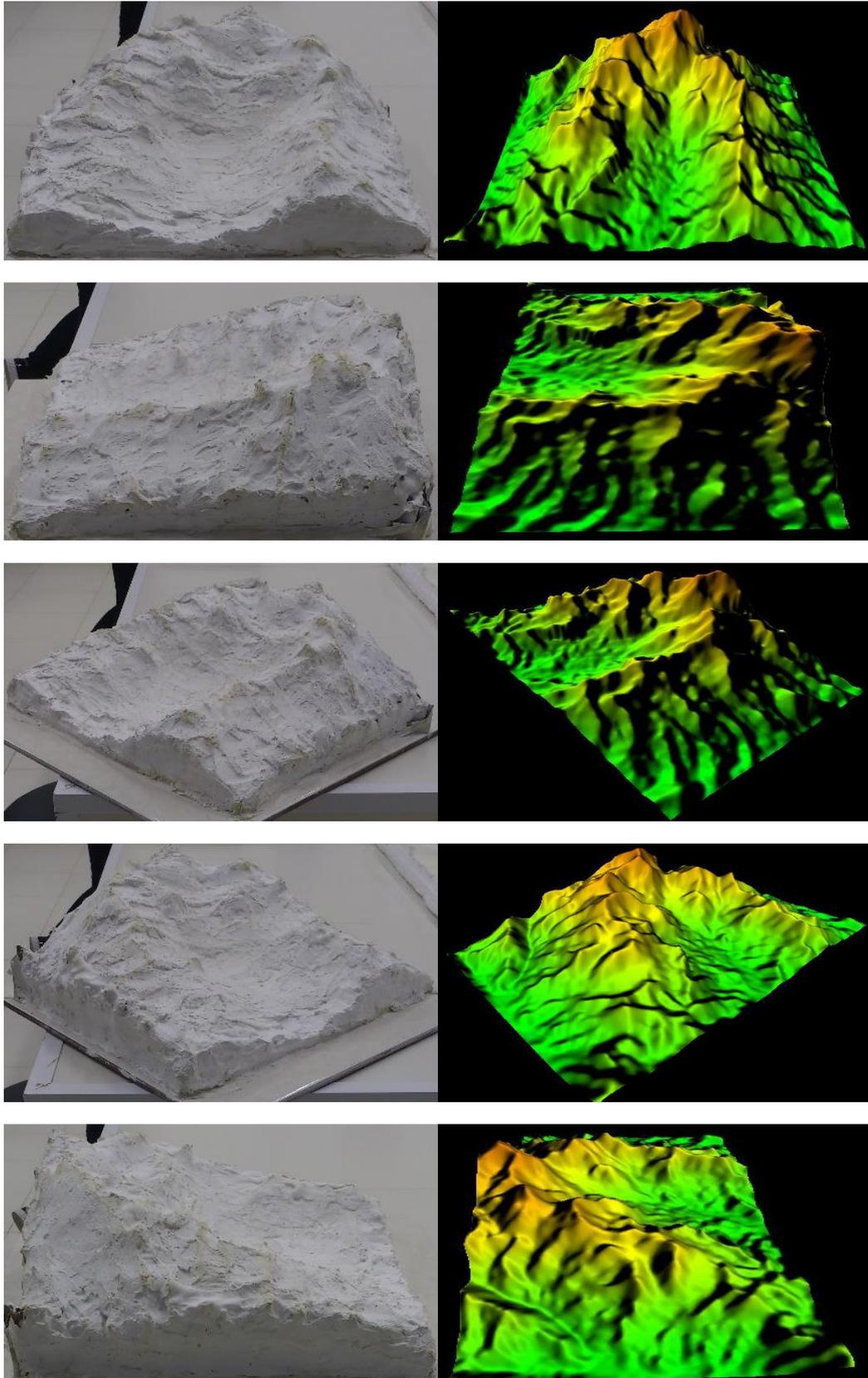


Figura 3.8 - Comparação entre a maquete e o modelo digital de elevação do terreno. Fonte: DO AUTOR, 2017.

3.4 Descrição do ensaio no túnel de vento

O túnel de vento disponibilizado para os ensaios possui uma câmara de teste com dimensões 1x1x1m interligada por duas tubulações, uma de entrada do vento e outra de saída. Na tubulação de entrada existe um mecanismo de aletas, e com ele é possível regular a saída do vento de modo a deixá-lo mais ou menos turbulento. Para esse estudo, as aletas estavam semiabertas para simular as condições naturais da turbulência do vento. A tubulação de entrada também está conectada a um motor responsável por gerar os ventos que passam pela câmara. Esse motor é controlado por um mecanismo onde é possível alterar a velocidade de acordo com um rpm (rotações por minuto) pré-estabelecido. Antes que a maquete fosse colocada dentro do túnel, foram realizadas medições com um anemômetro de fio quente (Figura 3.9: Anemômetro de fio quente) a cada 10cm de altura. Assim, é possível entender o comportamento do vento quando a câmara está vazia. Foi determinado para esta primeira fase das análises que o motor trabalhasse com 10rpm, que equivale a uma velocidade de aproximadamente 5,5m/s. Esse procedimento era necessário, pois era importante conhecer a influência das bordas dentro da câmara para que posteriormente não fosse feita nenhuma inferência equivocada. Os pontos onde foram realizadas as medidas estão ilustrados na Figura 3.10: Câmara vazia indicando os pontos de medição.



Figura 3.9 - Anemômetro de fio quente. Fonte: DO AUTOR, 2017.



Figura 3.10 - Câmara vazia indicando os pontos de medição. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Através dessas medições realizadas na câmara vazia do túnel de vento foi possível identificar a influência das bordas em cada ponto medido (Figura 3.11: Perfil do vento para todos os pontos, do chão ao topo da câmara). Portanto, para uma melhor simulação do experimento foi necessário alinhar a maquete nos pontos de medição onde a velocidade mais se aproximava da velocidade estabelecida a 10rpm, que era de aproximadamente 5,5m/s.

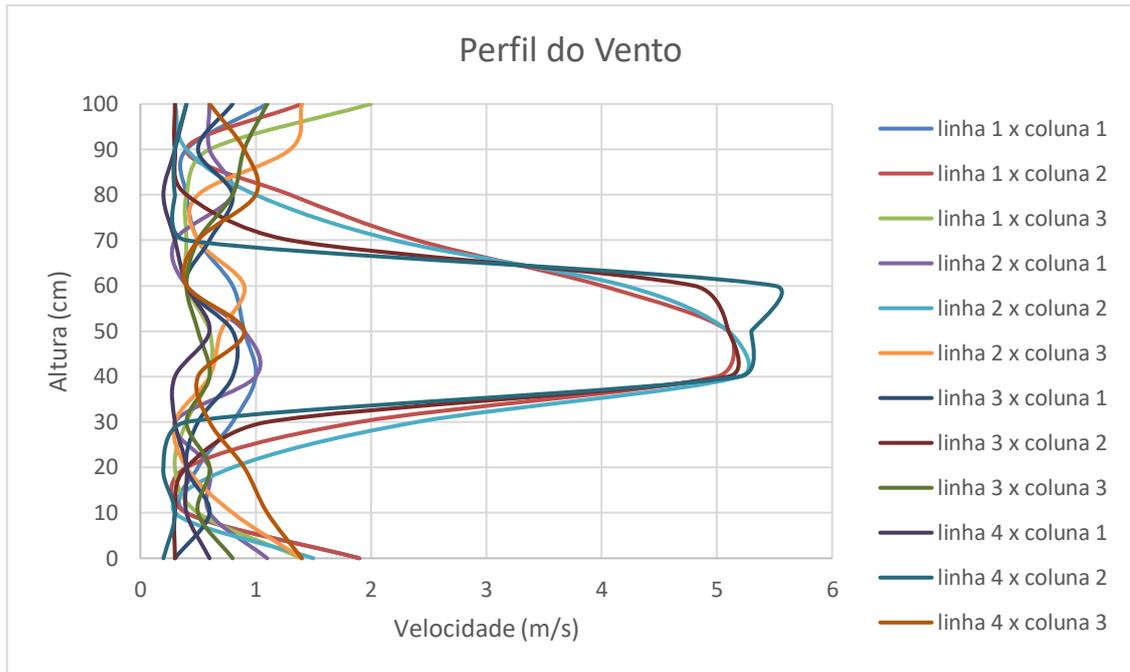


Figura 3.11 - Perfil do vento para todos os pontos, do chão ao topo da câmara. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Os pontos que mais se aproximaram da velocidade real em uma determinada altura (Figura 3.12: Perfil do vento para os pontos escolhidos no túnel do vento, do chão ao topo da câmara) foram os da linha 2 x coluna 2, linha 3 x coluna 2 e a linha 4 x coluna 2.

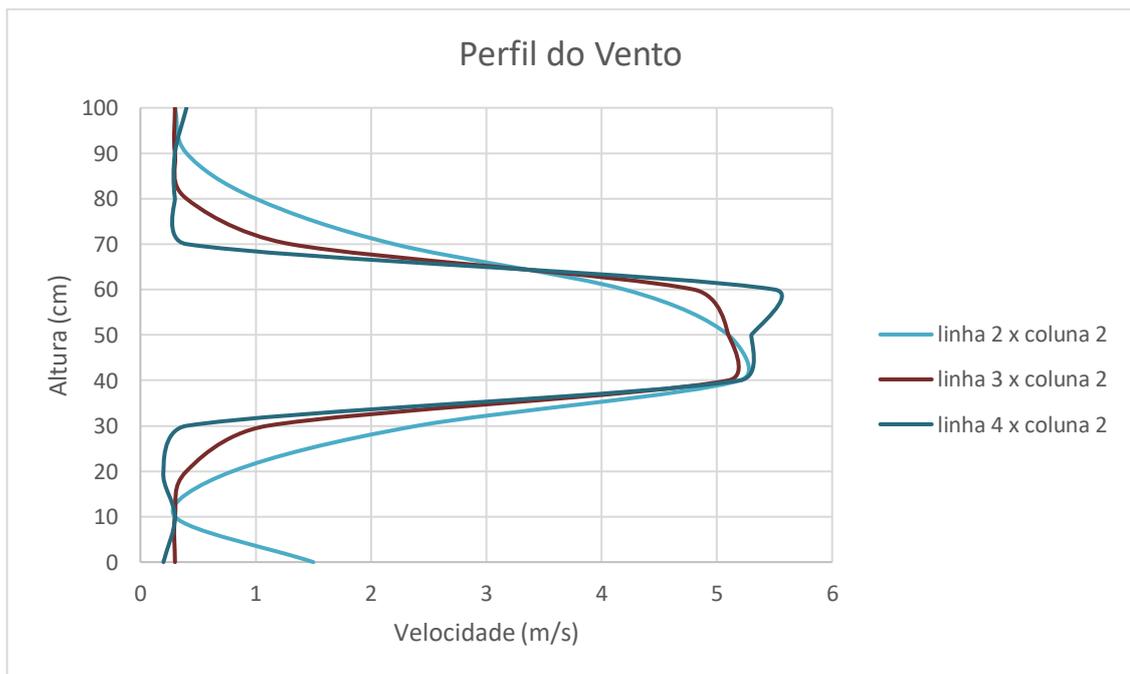


Figura 3.12 - Perfil do vento para os pontos escolhidos no túnel do vento, do chão ao topo da câmara. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Após determinar os pontos onde seriam feitas as medições, foi colocado um fundo falso de aproximadamente 35 cm de altura (Figura 3.13: Câmara com o fundo falso). Novamente para os três pontos selecionados, foram feitas medições a cada 1cm, começando a partir do fundo falso até a altura de 50cm da câmara, totalizando 18 medições realizadas. Com os dados medidos foi *plotado* o perfil do vento (Figura 3.14: Perfil do vento nos pontos escolhidos, entre a altura 35 e 51 cm, no túnel de vento com fundo falso).

O gráfico apresentado na Figura 3.14 ilustra um perfil de vento experimental que foi extraído a partir das medições realizadas no laboratório de instrumentação meteorológica da UNIFEI. Ele se assemelha ao comportamento do vento na vertical que é descrito na literatura e que está ilustrado na Figura 2.5. Portanto, podemos inferir que dentro das limitações que o túnel de vento possui, ele consegue apresentar uma boa resposta para representar o perfil logaritmo do vento que ocorre na superfície terrestre. Após essa breve análise, a maquete foi colocada sobre o fundo falso e assim, foram iniciados os ensaios para avaliar o comportamento do vento sobre o Observatório do Pico dos Dias, cujos os resultados serão apresentados e discutidos.



Figura 3.13 - Câmara com o fundo falso. Fonte: DO AUTOR, 2017.

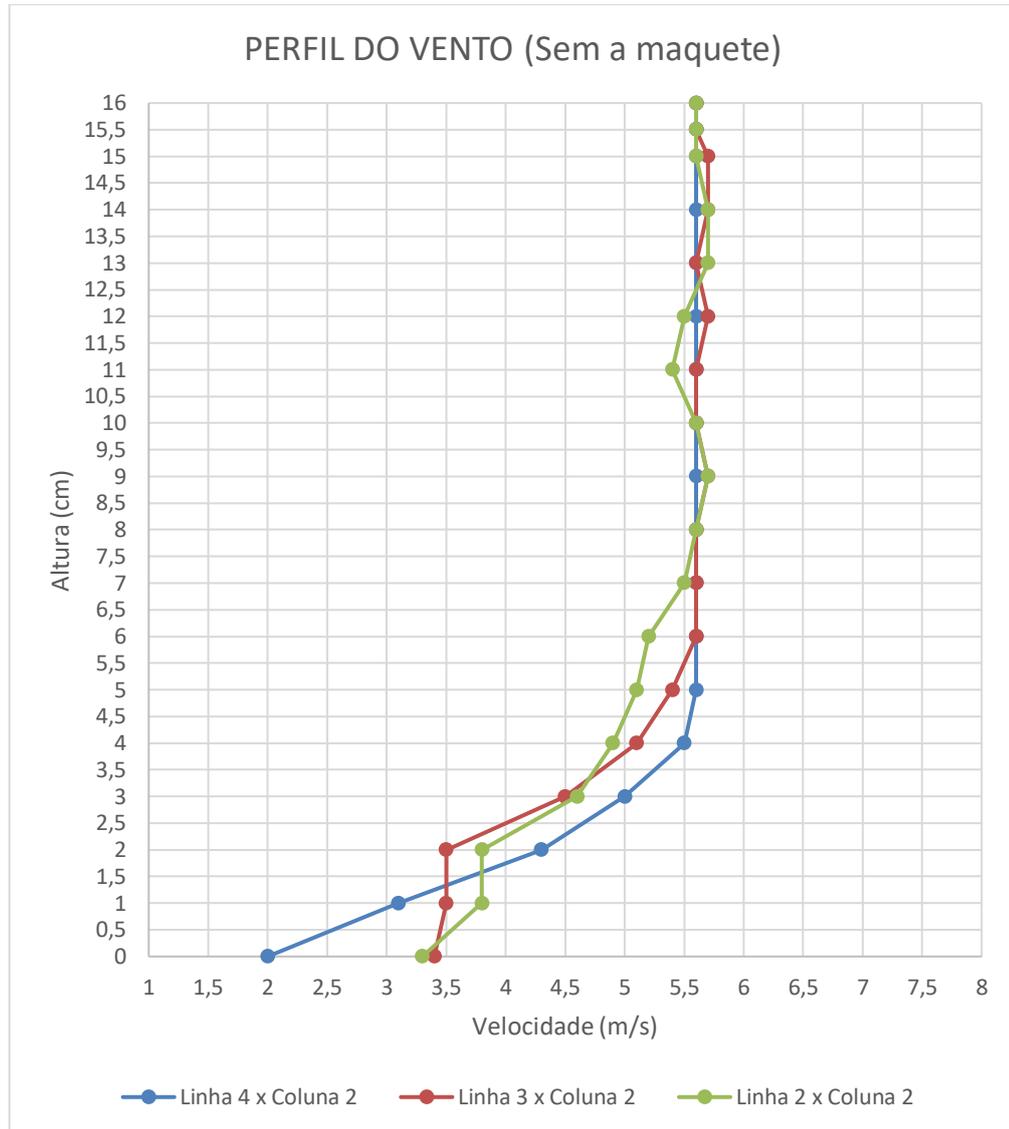


Figura 3.14 - Perfil do vento nos pontos escolhidos, entre a altura 35 e 51 cm, no túnel de vento com fundo falso. Fonte: DO AUTOR, 2017.

ocorrência de ventos considerando todo o período de dados se aproxima da velocidade de 5m/s.

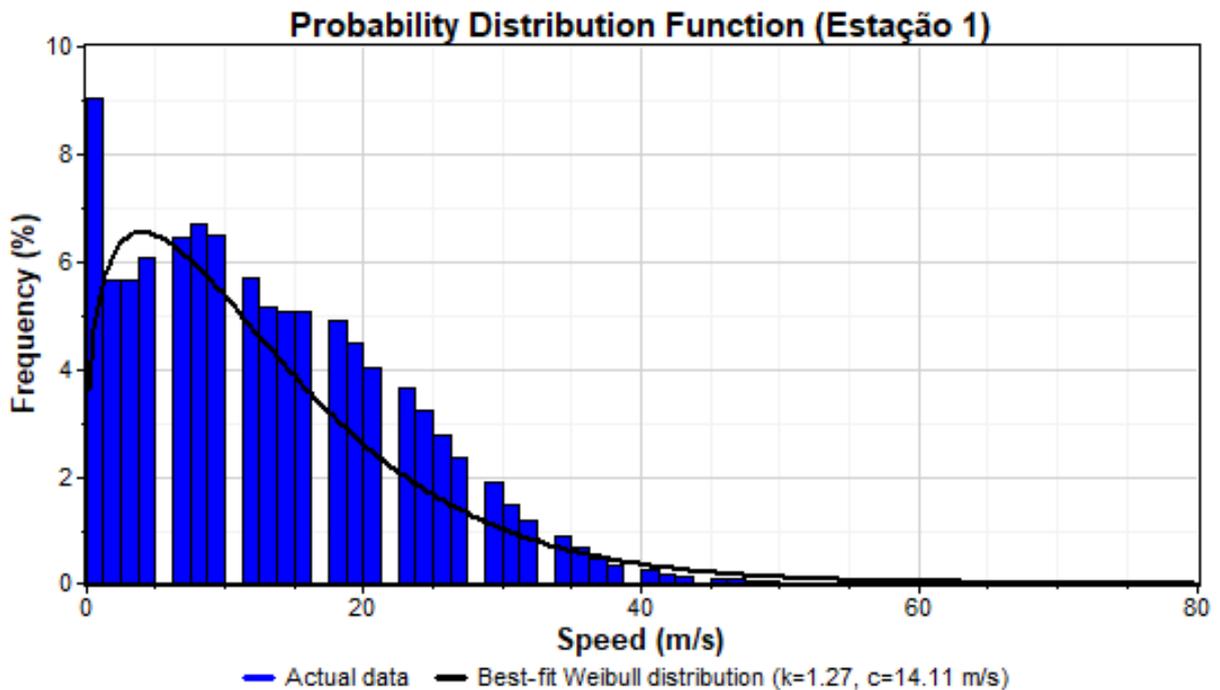


Figura 4.2 - Histograma com a frequência de velocidade do vento para todo o período estudado, construído com base nos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

A variação dos ventos diurno, mensal e anual está representada respectivamente nas Figuras 4.3, 4.4 (mensal ao longo do ano), 4.5 (em cada mês) e 4.6. Pelo perfil da variação do vento diurno pode-se identificar que durante todo o período do dia o vento possui velocidade superior a 10m/s. Os horários do dia onde o vento tem as maiores velocidades estão no intervalo entre 0h às 6h e entre 18h às 24h, ou seja, na madrugada e durante a noite.

Pelo perfil mensal da velocidade do vento Figuras 4.4 e 4.5, é possível identificar os meses de junho e julho, onde o vento se encontra com as maiores velocidades. O mês de setembro também possui um índice elevado de valores de velocidade do vento. Porém o mês de janeiro pode ser considerado como o pior período, pois nesse mês encontram-se as menores médias de velocidades registradas.

Com a variação média do vento anualmente de 2006 até 2012, é possível observar um crescente aumento da velocidade do vento entre os anos de 2009 e 2010. Nesse período onde foi observado as maiores velocidades do vento, o Sudeste brasileiro, assim como grande parte do país, passou por uma época de seca (DALAGNOL et al., 2017).

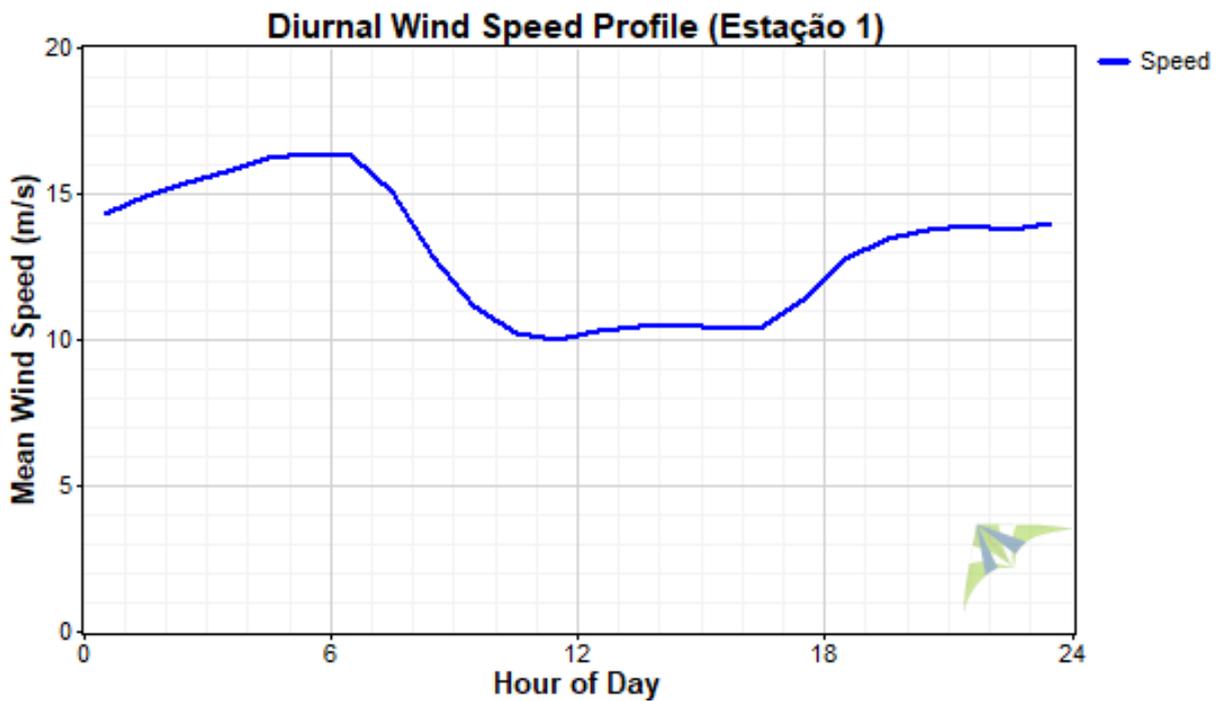


Figura 4.3 - Perfil da velocidade do vento diurno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA.
Fonte: DO AUTOR, 2017.

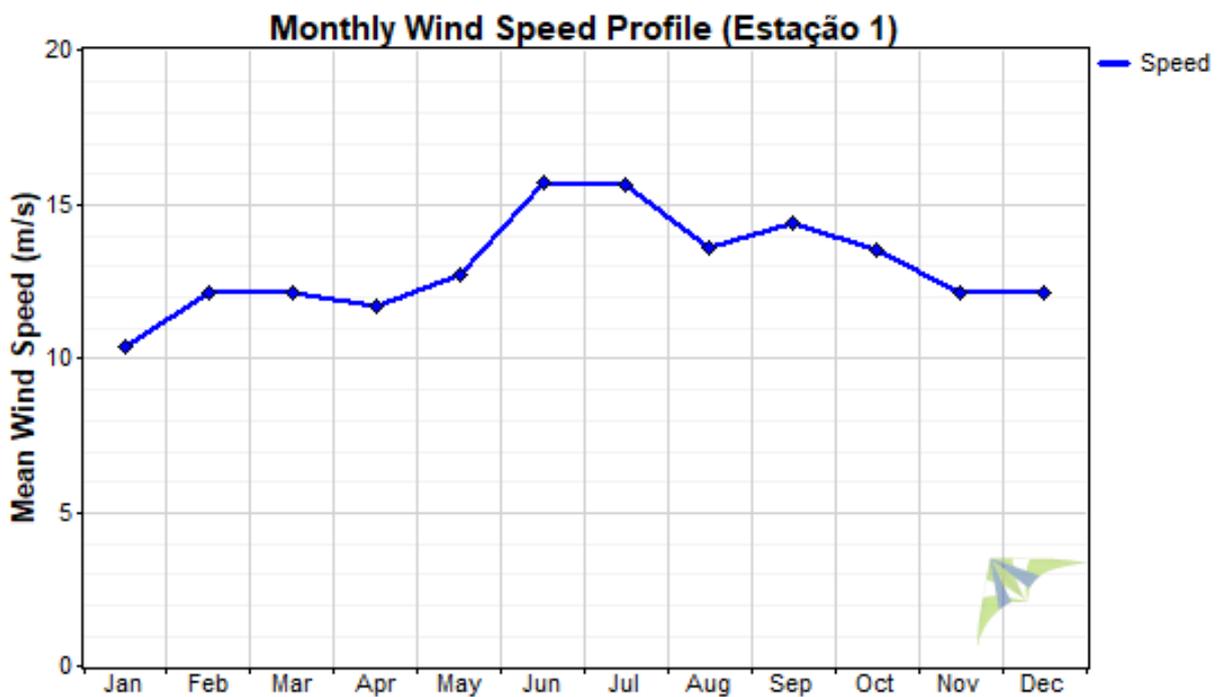


Figura 4.4 - Perfil da velocidade do vento mensal construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA.
Fonte: DO AUTOR, 2017.

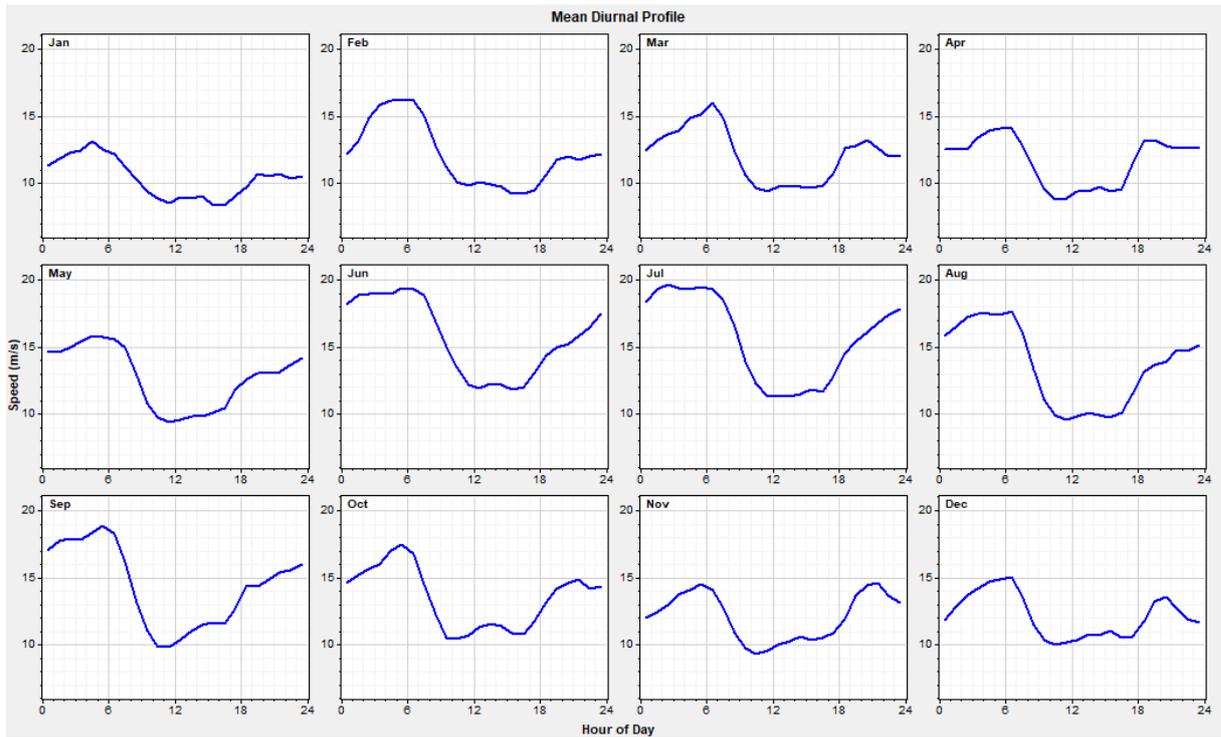


Figura 4.5 - Perfil da velocidade do vento mensal em cada mês construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

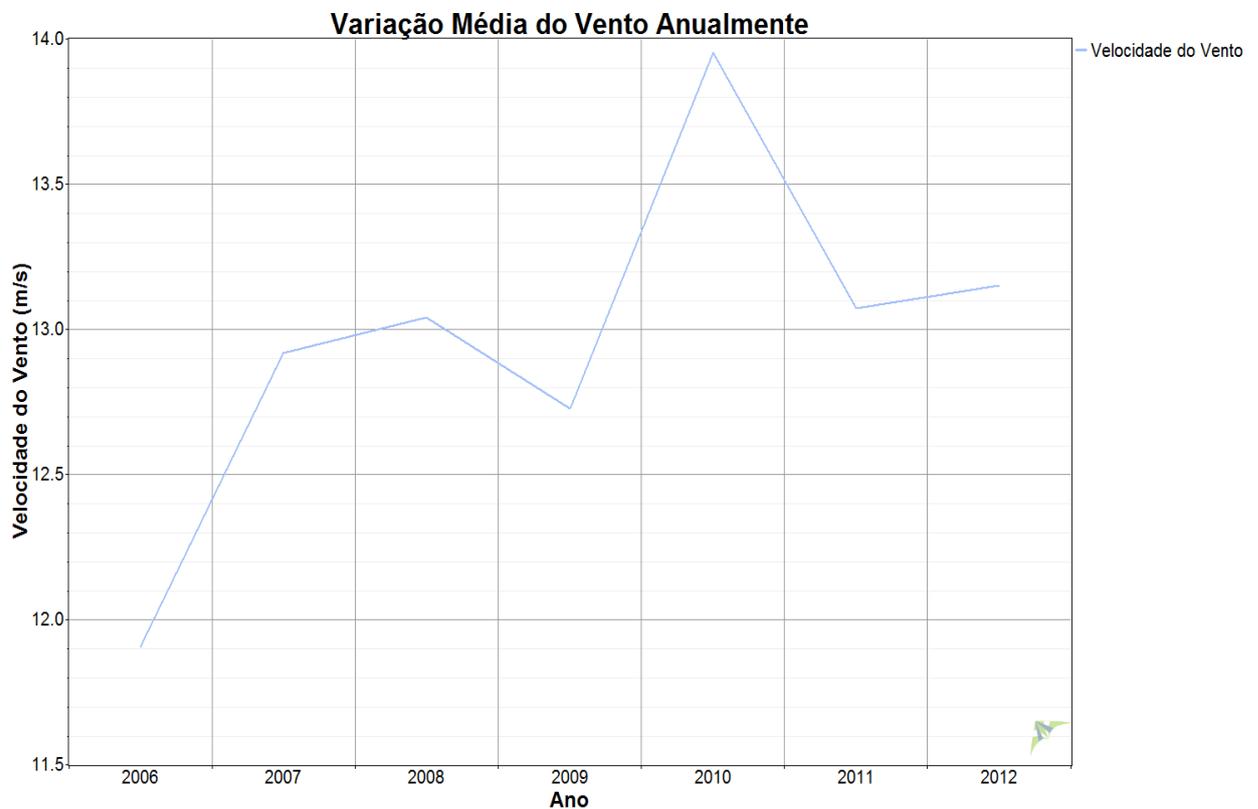


Figura 4.6 - Perfil da velocidade do vento anual construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

As próximas Figuras apresentam uma análise sazonal da variabilidade do vento no Pico dos Dias. Para o verão, o parâmetro “c” da distribuição de Weibull determina uma velocidade média da série igual a 12,63m/s, onde as maiores frequências de velocidade do vento são menores que 5m/s (Figura 4.7: Histograma com frequência de velocidade do vento no verão construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA). Com o perfil da variação do vento (Figura 4.8: Perfil da velocidade do vento no verão construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA) é possível identificar que durante alguns momentos do dia os ventos apresentam velocidade abaixo de 16m/s. Próximo das 6h e das 20h são os momentos do dia onde a velocidade do vento apresenta a sua maior velocidade no verão, acima de 13m/s.

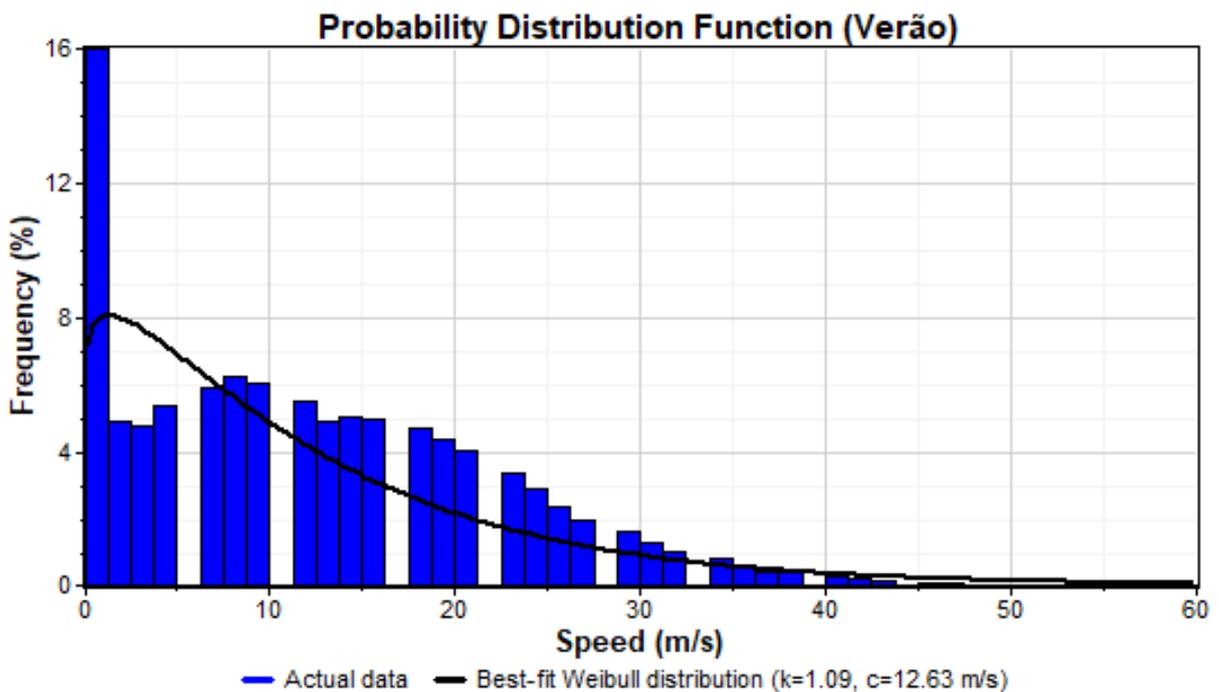


Figura 4.7 - Histograma com frequência de velocidade do vento no verão construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

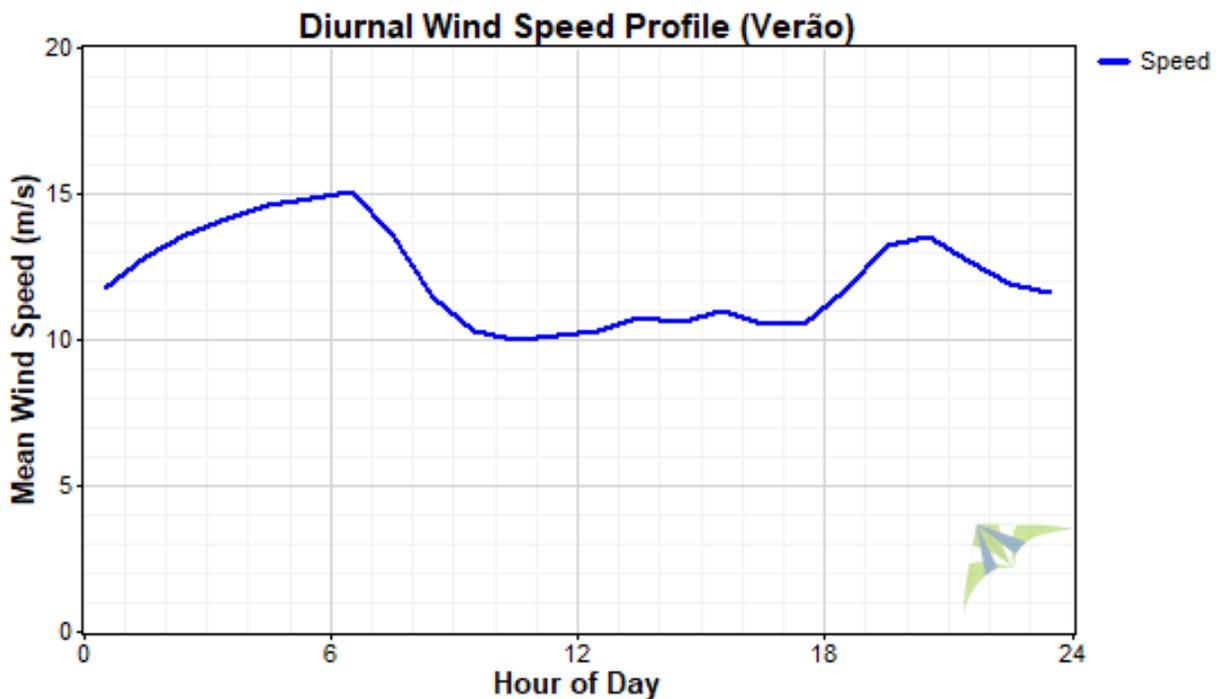


Figura 4.8 - Perfil da velocidade do vento no verão construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Analisando o histograma do vento no outono (Figura 4.9: Histograma com frequência de velocidade do vento no outono construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA), o parâmetro “c” da distribuição de Weibull apresentou uma velocidade média de 13,30m/s. O parâmetro $k=1,30$ define a forma da distribuição (linha preta). A partir desta linha é possível inferir que as maiores frequências para velocidade do vento estão concentradas entre o intervalo de 0 a 10m/s, onde o pico dessa frequência apresenta-se próximo a velocidade de 4m/s.

Pelo perfil do vento no outono (Figura 4.10: Perfil da velocidade do vento no outono construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA), nota-se que durante todo o dia vento possui velocidade superior a 9m/s. No intervalo das 0h às 10h e das 18h às 24h, os ventos tendem a apresentar as maiores velocidades durante o dia, acima de 10m/s.

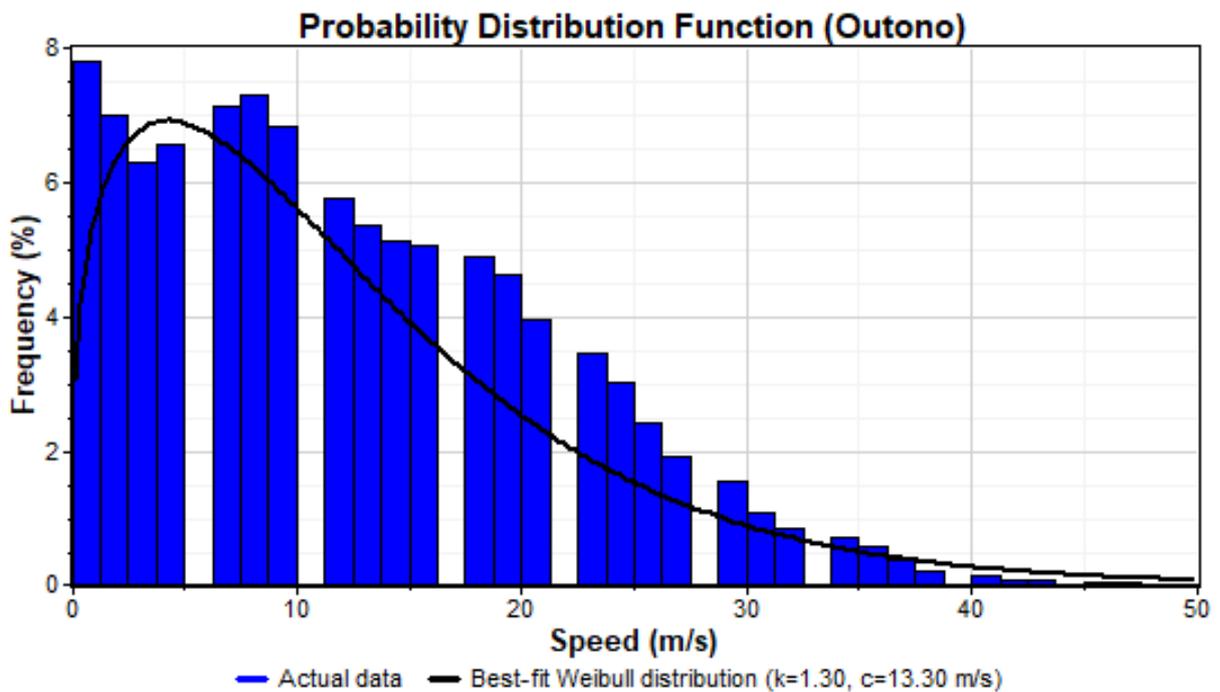


Figura 4.9 - Histograma com frequência de velocidade do vento no outono construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

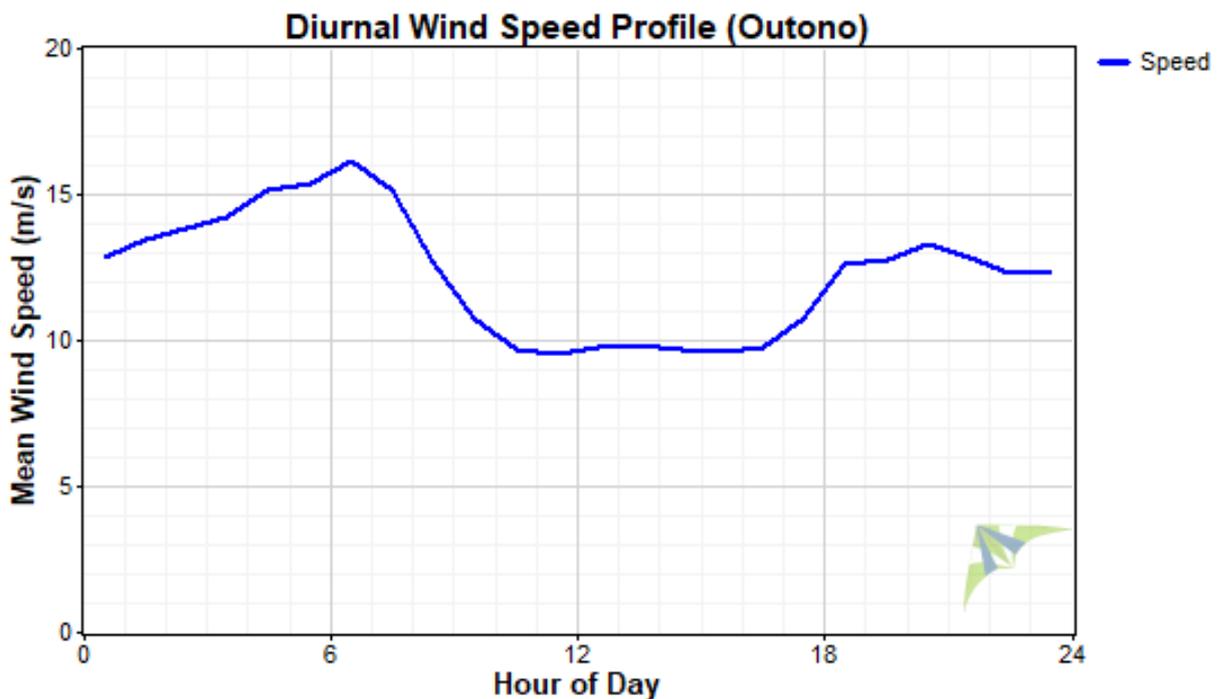


Figura 4.10 - Perfil da velocidade do vento no outono construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

A função de distribuição de probabilidade no inverno (Figura 4.11: Histograma com frequência de velocidade do vento no inverno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA) tem parâmetro “c” da distribuição de Weibull igual a 17,31m/s,

sendo o maior valor de velocidade média registrado quando comparado com os outros valores apresentados como resultados nas outras estações do ano. O parâmetro $k=1,43$ modela o comportamento da distribuição (linha preta). Através dela, identifica-se que a maior frequência da ocorrência de ventos tem velocidade de aproximadamente 9m/s.

Pelo perfil de vento (Figura 4.12: Perfil da velocidade do vento no inverno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA), destaca-se o período da madrugada (0h às 8h), pois durante esse intervalo de tempo os ventos apresentam as maiores velocidades registradas. Contudo, durante todo período analisado dessa estação as velocidades do vento foram superiores a 12m/s.

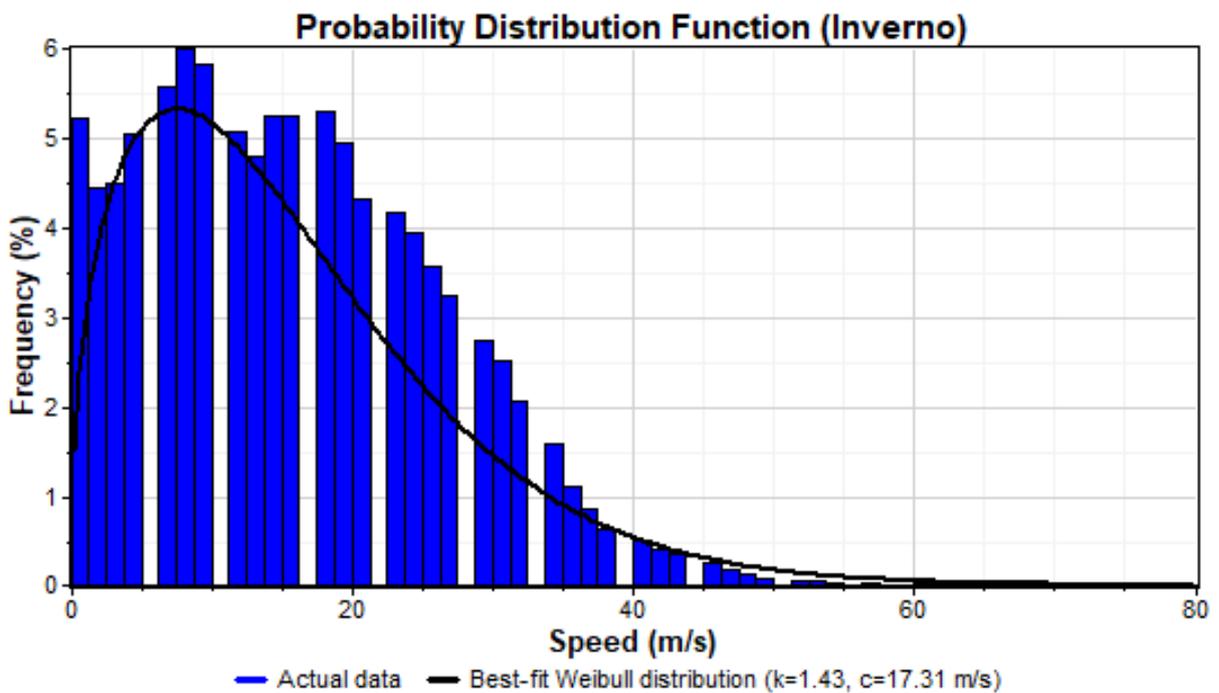


Figura 4.11 - Histograma com frequência de velocidade do vento no inverno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

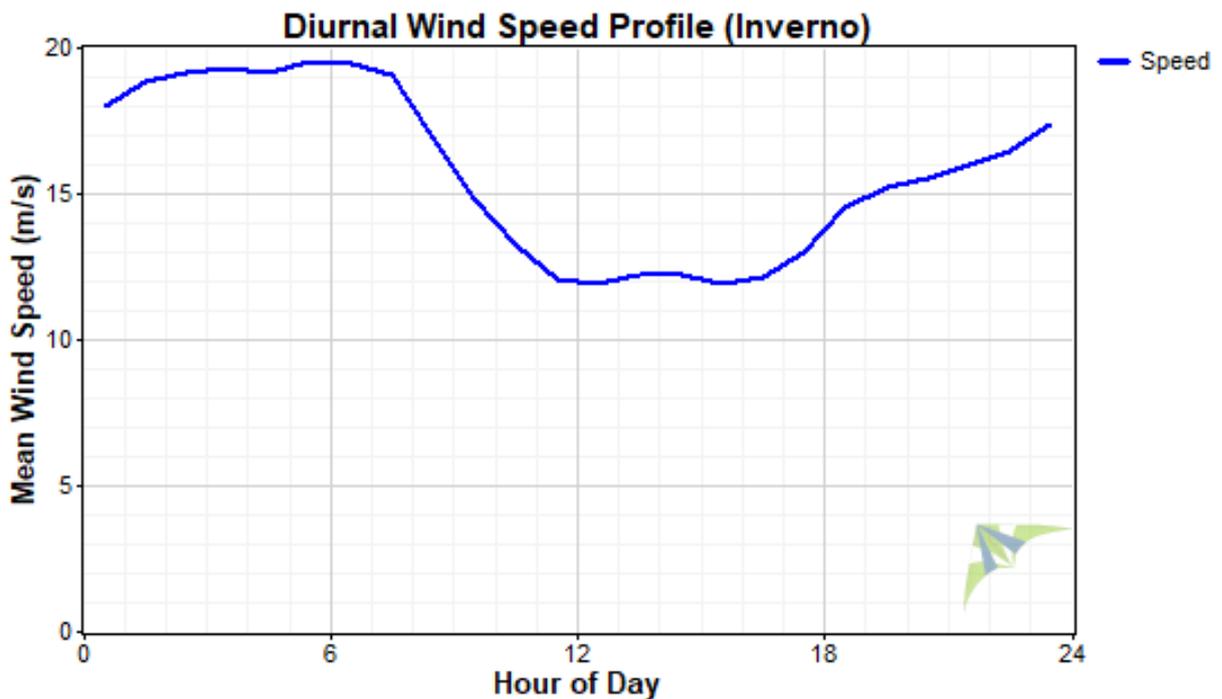


Figura 4.12 - Perfil da velocidade do vento no inverno construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Na primavera o histograma (Figura 4.13: Histograma com frequência de velocidade do vento na primavera construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA) apresenta a distribuição de Weibull modelada pelo parâmetro $k=1,44$ (linha preta). Com esse parâmetro, identifica-se que a maior frequência de velocidade está ocorrendo próximo a 6m/s. Pelo parâmetro “c”, obtém-se o valor da velocidade média do vento, que foi igual a 15,52m/s.

Analisando o perfil do vento (Figura 4.14: Perfil da velocidade do vento na primavera construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA), observa-se que em qualquer horário do dia a velocidade é superior a 9m/s. Os períodos do dia onde se obtém as maiores velocidades do vento são entre 0h às 8h e depois das 18h até 24h.

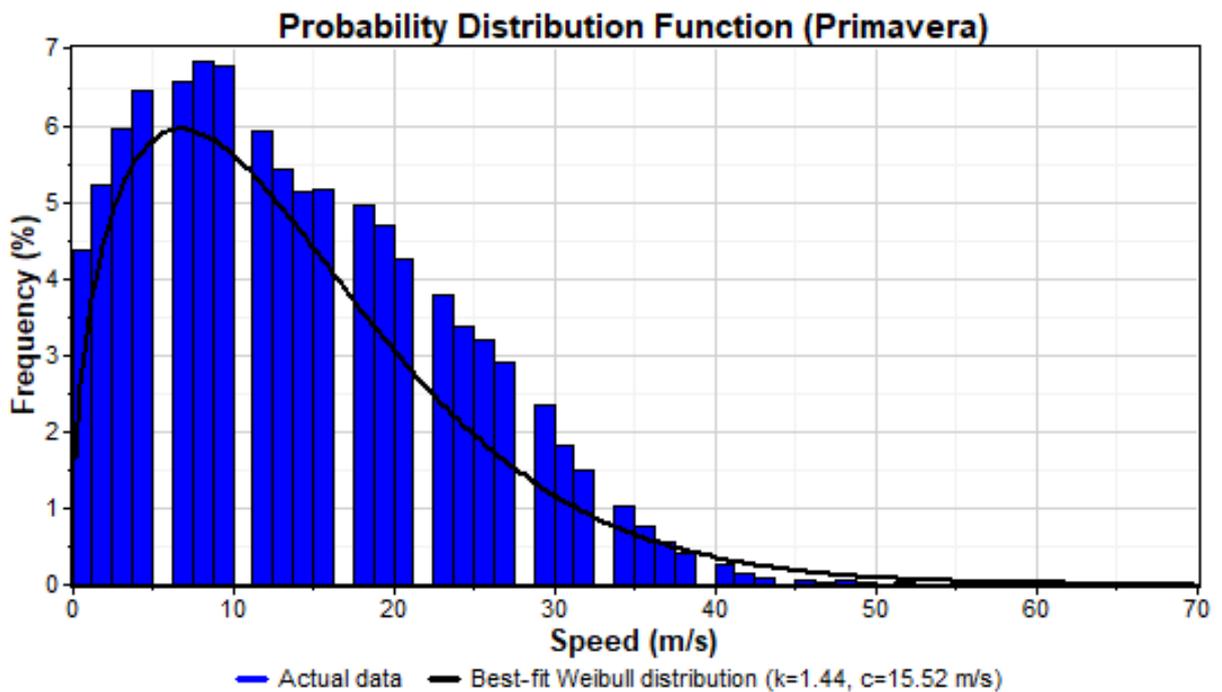


Figura 4.13 - Histograma com frequência de velocidade do vento na primavera construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

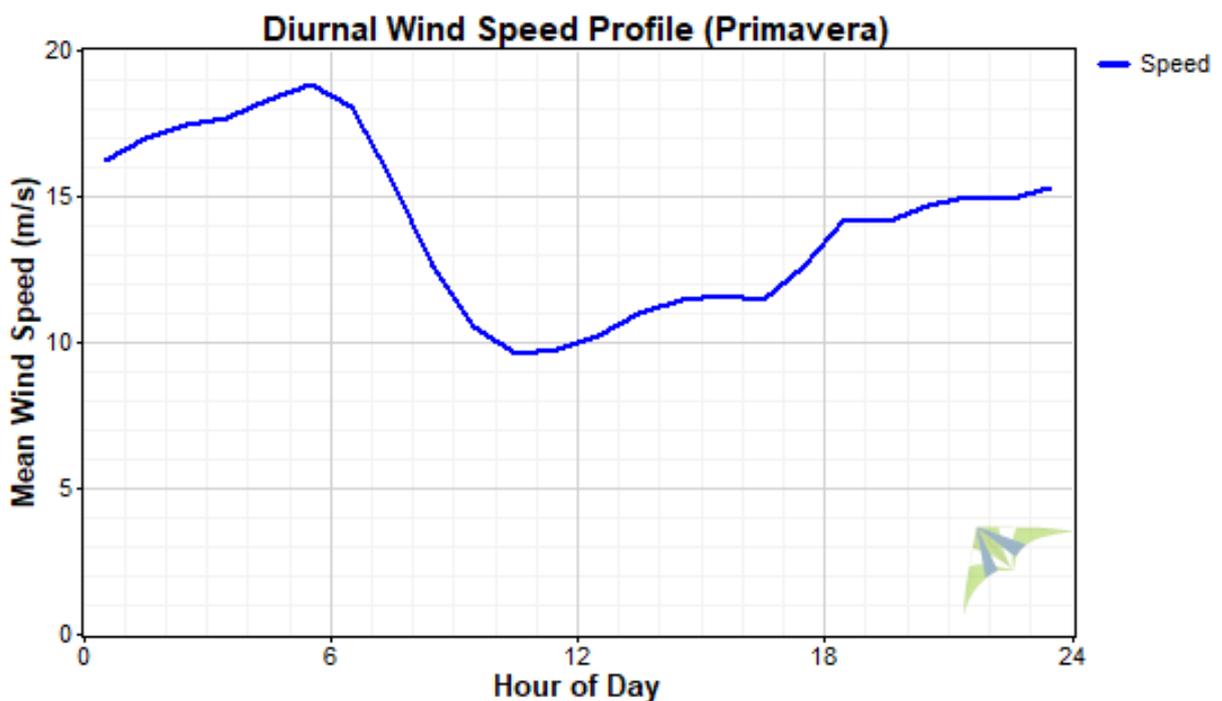


Figura 4.14 - Perfil da velocidade do vento na primavera construído a partir dos dados fornecidos pelo LNA. Fonte: DO AUTOR, 2017.

Após serem apresentadas os resultados preliminares, foram realizados os ensaios no túnel de vento. A Figura 4.15 mostra a localização do Pico dos Dias na

maquete e no MDE. O OPD está localizado na parte mais alta da região, que está representado com uma altura de aproximadamente 15cm na maquete. As medições de velocidade do vento foram coletadas de centímetro a centímetro até chegar na altura do topo da maquete, onde a velocidade do vento também era medida nas alturas de 15,5cm e 16cm. O motivo para medir esses dois pontos está relacionado com o tamanho de uma torre eólica que atualmente possui entre 60 a 100m de altura. Então, para este estudo, foi determinado que cada centímetro representava 120 metros em tamanho real. Assim, esses dois pontos conseguem representar a velocidade do vento próximo a altura real de uma torre, caso elas fossem instaladas no topo do Pico dos Dias.



Figura 4.15 - Localização do Observatório do Pico dos Dias no modelo digital (esquerda) e na maquete (direita). Fonte: DO AUTOR, 2017.

Pelas análises anteriores, o vento no Pico dos Dias é predominante de norte-noroeste. A maquete foi posicionada dessa forma para que se pudesse observar o comportamento do fluido nessa direção (Figura 4.16: Perfil de velocidade do vento vindo de noroeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: GEJIMA JUNIOR, 2017). O primeiro ponto escolhido foi na frente da maquete (a barlavento), foi observado um perfil logaritmo do vento. Já no segundo ponto (no topo), onde se localiza o Observatório do Pico dos Dias, o gráfico apresenta uma intensificação dos ventos próximo a superfície do topo, que é o resultado de um aumento da velocidade do vento em relação ao outro ponto medido (a barlavento). Esse fato se deve a convergências dos ventos que são forçados a ter esse comportamento, devido a orografia da maquete.

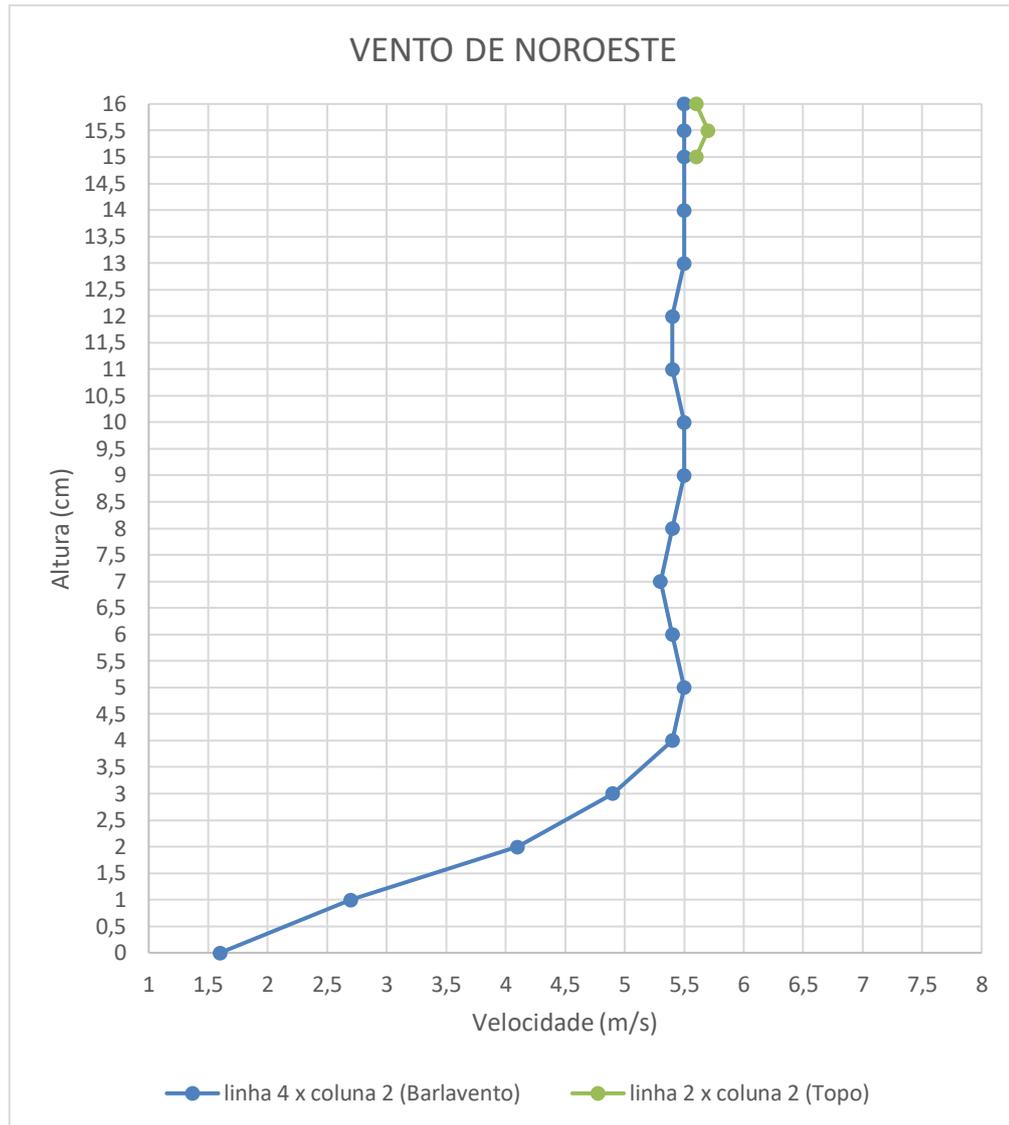


Figura 4.16 – Perfil de velocidade do vento vindo de noroeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

O gráfico da Figura 4.17 se obteve a partir dos resultados com a maquete posicionada a receber vento de norte dentro da câmara de experimento do túnel de vento. No primeiro ponto (a barlavento) que antecede a maquete, o perfil do vento foi logarítmico. Já no segundo ponto (no topo), que é a região de maior altura do modelo reduzido, encontram-se as maiores velocidades do vento. Isso ocorre devido a sua intensificação no topo da maquete, que é influenciada pela própria convergência dos ventos próximo a superfície, forçados pela orografia da maquete.

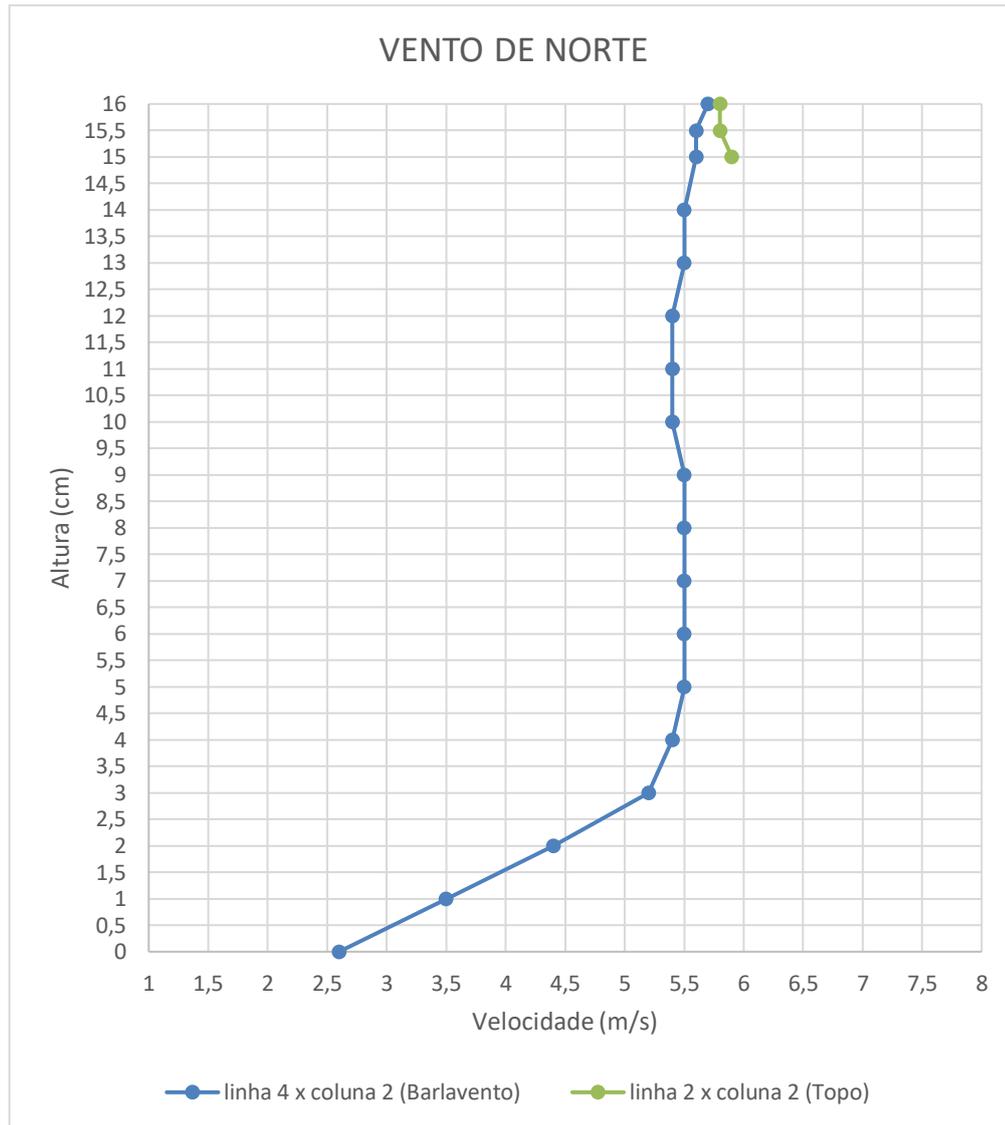


Figura 4.17 - Perfil de velocidade do vento vindo de norte nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

O experimento considerando o vento vindo de nordeste foi o terceiro experimento realizado. No gráfico da Figura 4.18 o primeiro ponto (a barlavento) à frente da maquete também apresentou um perfil logaritmo de velocidade do vento. O segundo ponto medido (no topo), o perfil de velocidade do vento apresentou uma intensificação nos valores medidos de velocidade do vento em relação ao ponto anterior. A maior velocidade nesse ponto, foi medida entre 15,5cm de altura. Novamente são levadas em consideração as mesmas justificativas que foram levantadas para os casos anteriores, onde se considerava a existência de uma intensificação dos ventos próximo ao topo da maquete.

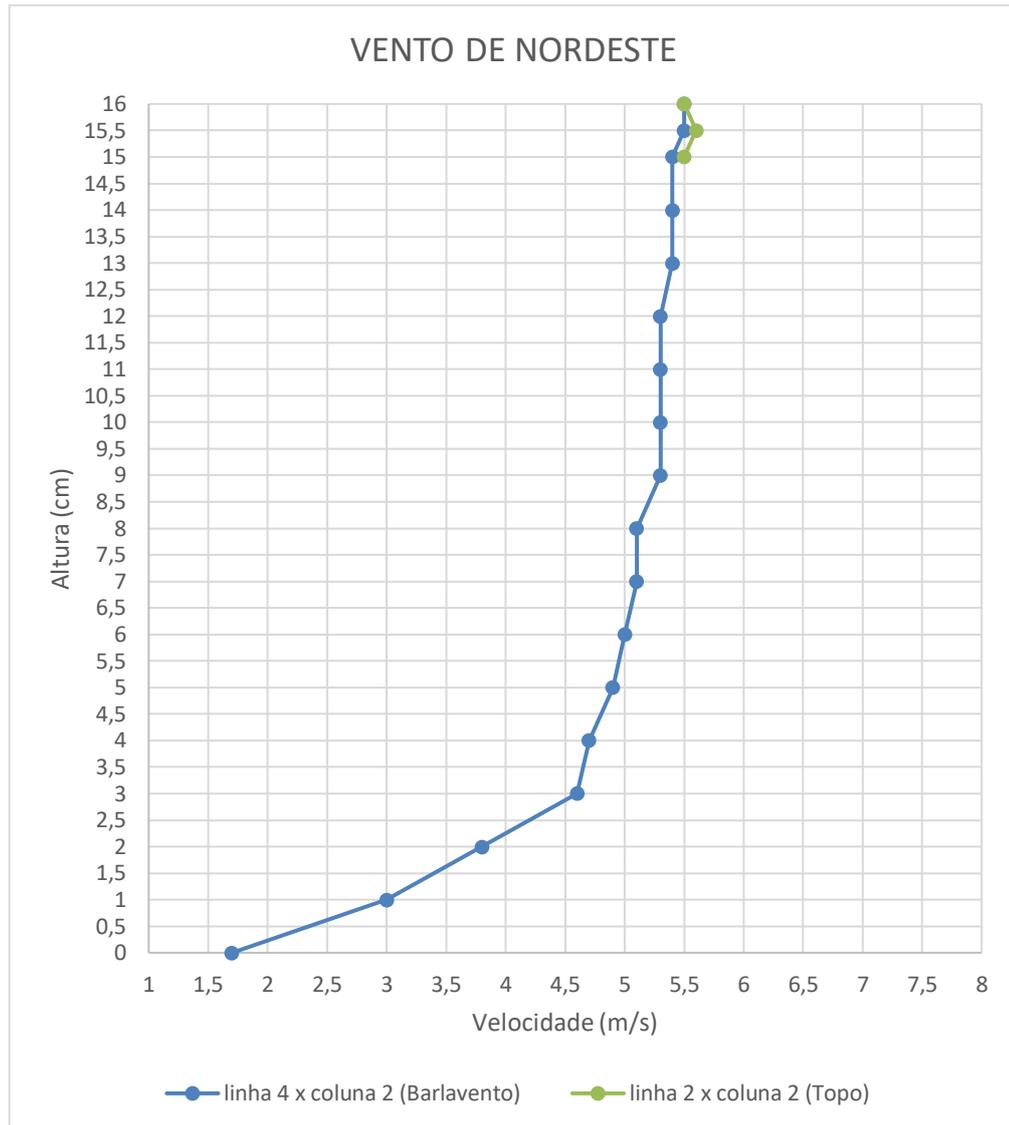


Figura 4.18 - Perfil de velocidade do vento vindo de nordeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

A Figura 4.19 mostra o resultado obtido no túnel de vento quando a maquete foi posicionada no sentido a receber o vento de leste. No primeiro ponto (a barlavento) o vento apresentou um perfil de velocidade logarítmico. Contudo, ocorreram pequenas diferenças na forma do gráfico em comparação com os gráficos anteriores. Podemos assumir que essas variações estão relacionadas com a turbulência causada pelas aletas semiabertas do túnel do vento. O ponto 2 (no topo) representa o local mais alto da maquete onde foram feitas as medições. Novamente, o perfil de vento próximo ao local mais alto da maquete obteve os maiores valores de velocidades.

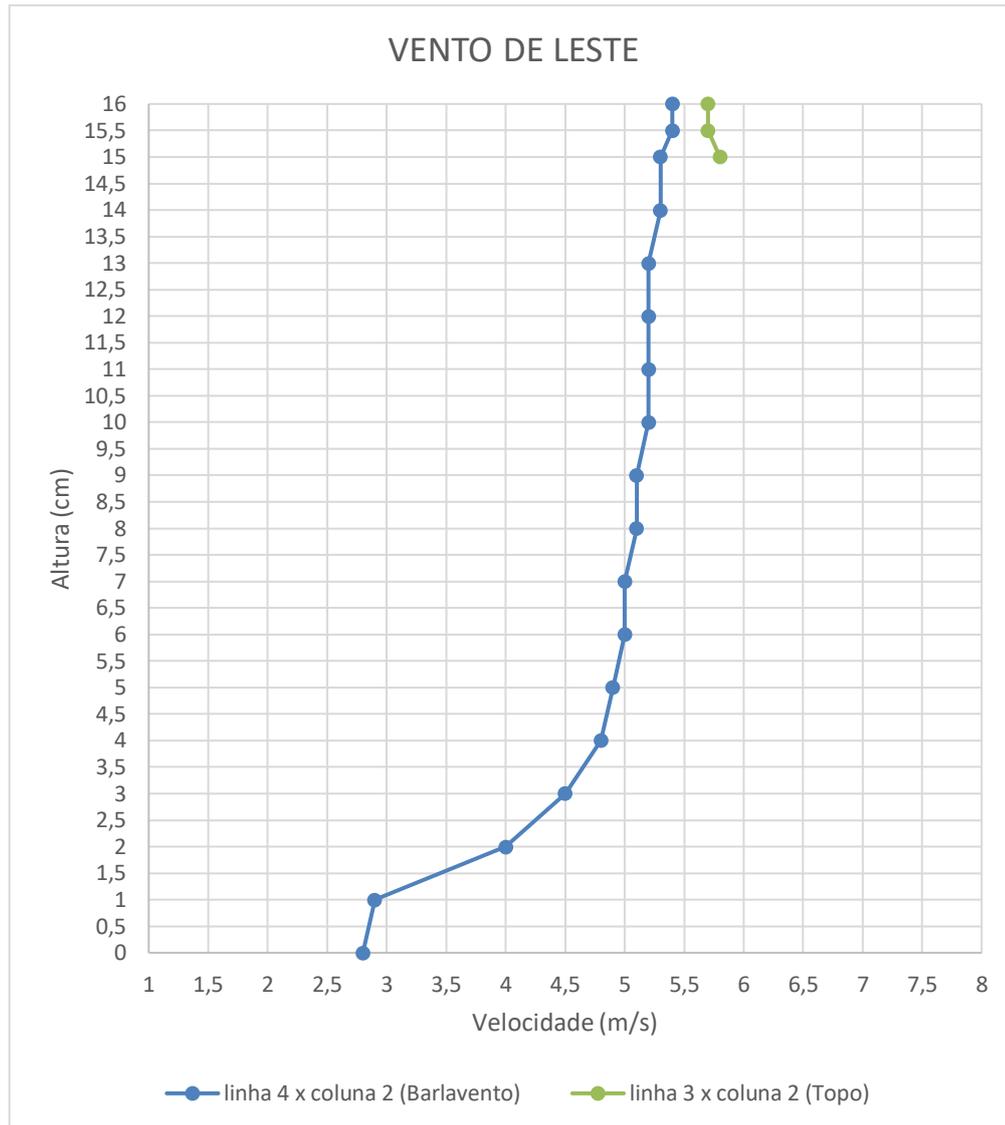


Figura 4.19 - Perfil de velocidade do vento vindo de nordeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

No último ensaio realizado a maquete foi posicionada para receber vento de oeste (Figura 4.20: Perfil de velocidade do vento vindo de oeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias). No ponto 1 (a barlavento), antes que o vento entrasse em contato com a maquete, também foi observado um perfil logaritmo do vento. O segundo ponto medido (no topo) apresentou ventos intensos próximos da superfície do topo da maquete. Novamente podemos inferir que a morfologia do modelo reduzido contribuiu para o aumento da velocidade no segundo ponto.

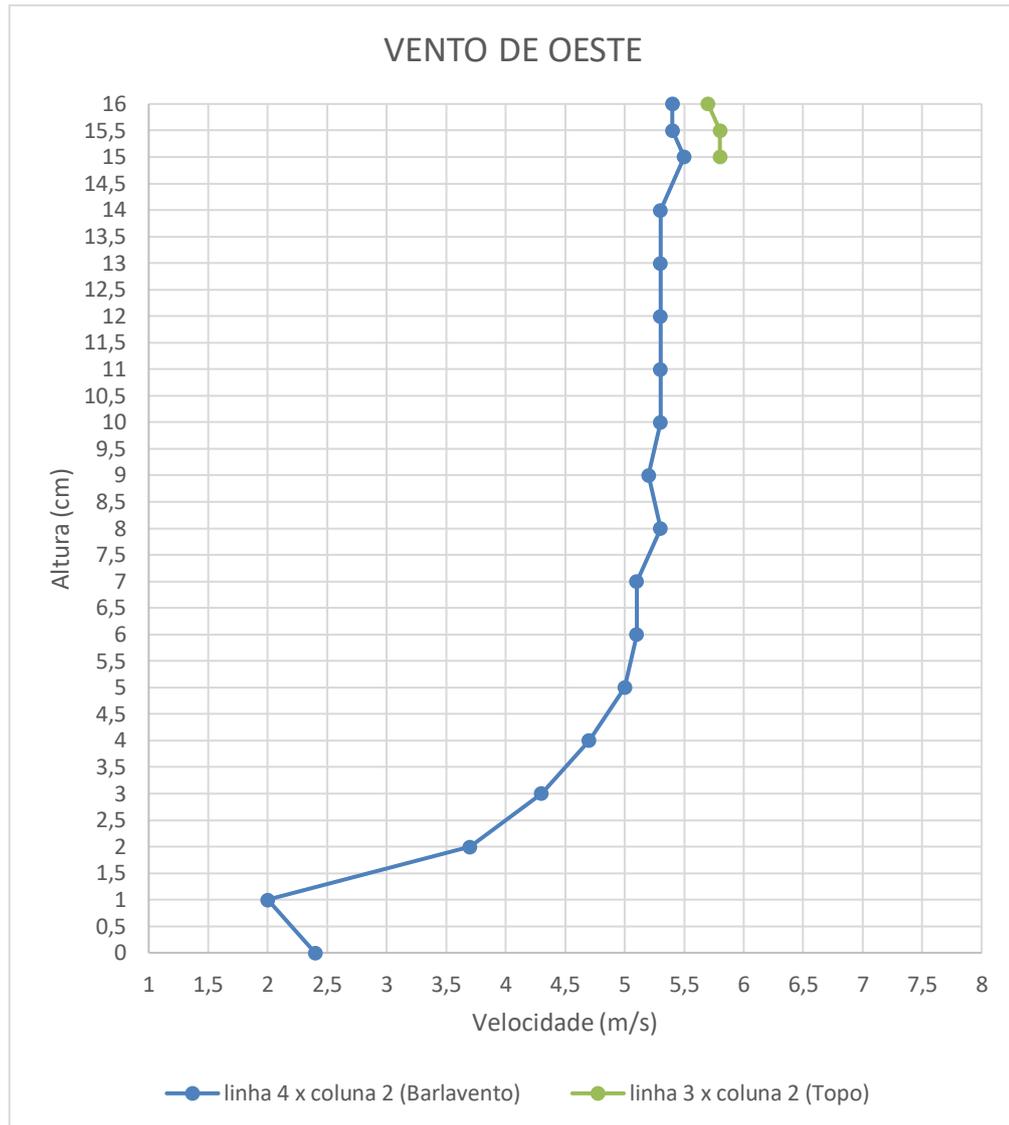


Figura 4.20 - Perfil de velocidade do vento vindo de oeste nos pontos a barlavento e no topo do Pico dos Dias. Fonte: DO AUTOR, 2017.

5 CONCLUSÃO

Através dos dados fornecidos pelo LNA, foi possível identificar que os ventos são predominantes de norte-noroeste. Com essa informação, podemos determinar em qual direção do Pico dos Dias as torres eólicas podem obter uma maior eficiência de acordo com as orientações do vento. Pelo software Windographer® foi gerado um histograma (Figura 4.2: Histograma com a frequência de velocidade do vento para todo o período estudado, construído com base nos dados fornecidos pelo LNA) com a série toda. A partir desse histograma, identificou-se um pico de frequência muito alto quando a velocidade do vento se aproximava do valor de 5m/s próximo a superfície. A princípio podemos considerar que a interação do vento com a superfície diminui a sua velocidade. Portanto, em alturas maiores onde o atrito com o chão tende a um valor desprezível, espera-se que as velocidades do vento sejam maiores. Com o parâmetro “c” da distribuição de Weibull para série toda, obteve-se uma velocidade média do vento de 14,11m/s. Esse valor consideravelmente alto pode estar relacionado a rajadas de vento que esporadicamente podem ocorrer naquela região, tendendo a elevar a média da velocidade do vento. O perfil diurno da variação da velocidade do vento, considerando a série de dados por completo, indica maiores velocidades de vento durante a madrugada e no período da noite. Já o perfil mensal da variação da velocidade do vento, mostra que os meses de junho, julho e setembro são os períodos onde a velocidade do vento é maior para a região do OPD. Pelo perfil da variação do vento ao longo dos anos, o ano de 2010 apresentou as maiores velocidades do vento para a localidade. É importante destacar que no ano de 2010 o país passou por uma grande seca e no sudeste do Brasil não foi diferente. Os regimes de chuvas dessa região também foram afetados. Possivelmente esse seja o motivo que levou o ano de 2010 a apresentar ventos mais intensos. Podemos dizer que para o Pico dos Dias obter um melhor aproveitamento eólico, as turbinas eólicas precisam estar funcionando quando os ventos possuem as maiores velocidades. Portanto, essas informações extraídas dos perfis de variação da velocidade do vento ao longo do tempo são importantes, pois elas indicam os momentos onde pode-se ter as melhores condições para o aproveitamento eólico.

Para a variação sazonal também foram construídos no Windographer® os perfis de variação da velocidade do vento e os histogramas para cada estação do ano. Pelos resultados obtidos, a estação onde os ventos são mais intensos para a região

do OPD é o inverno. O período do dia durante o inverno que registra as maiores velocidades do vento ocorre na madrugada. O outono apresenta a segunda maior média de velocidade do vento. O período do dia onde se encontram esses valores é das 6h. Já a primavera possui a terceira maior média da velocidade do vento. Durante os dias dessa estação, os ventos são mais intensos no amanhecer. Por último, o verão, dentre as outras estações, possui a menor média da velocidade do vento. Os horários do dia onde os ventos têm maior velocidade no verão são próximos das 6h e das 20h.

A partir dos ensaios realizados no túnel de vento foram feitas as seguintes avaliações do resultado. Para todos os casos registrados no primeiro ponto de medição (a Barlavento), o perfil do vento teve um comportamento logarítmico que foi semelhante ao perfil ilustrado na Figura 2.5. De fato, era esperado esse comportamento, pois no primeiro ponto não havia interação entre o vento e o relevo da maquete. A partir desse resultado também podemos inferir que as condições estabelecidas para o vento antes de entrar em contato com a maquete, foram as mesmas para todos os experimentos. Logo, todas as diferenças entre os casos analisados estavam diretamente ligadas a orientação e a morfologia presentes na maquete. Através dos outros pontos de medição (linha 3 x coluna 2 e linha 2 x coluna 2) foi possível identificar uma intensificação dos ventos próximo ao topo da maquete. Para averiguar se realmente houve intensificação dos ventos próximo a maior altura da maquete, comparamos as velocidades registradas próximo ao topo da maquete com as velocidades próximo a base da maquete (Tabela 5.1: Diferença da velocidade do vento medido entre o topo e na base da maquete).

Tabela 5.1 - Diferença da velocidade do vento medido no topo e na base da maquete.

Altura (cm)	Vento de Norte (m/s)			Vento de Noroeste (m/s)			Vento de Oeste (m/s)			Vento de Nordeste (m/s)			Vento de Leste (m/s)		
	Topo	Base	Dif.	Topo	Base	Dif.	Topo	Base	Dif.	Topo	Base	Dif.	Topo	Base	Dif.
0,00	5,90	2,60	3,30	5,60	1,60	4,00	5,10	2,40	2,70	5,50	1,70	3,80	5,80	2,80	3,00
0,50	5,80	3,05	2,75	5,70	2,15	3,55	5,10	2,20	2,90	5,60	2,35	3,25	5,70	2,85	2,85
1,00	5,80	3,50	2,30	5,60	2,70	2,90	5,50	2,00	3,50	5,50	3,00	2,50	5,70	2,90	2,80

Fonte: DO AUTOR (2017).

Pela Tabela 5.1, a diferença representa as variações entre as velocidades do vento próximas do topo e da base da maquete (vel. topo – vel. base = dif.). Por esses resultados, verifica-se que a velocidade do vento no topo é maior em relação a velocidade na base em todos os casos analisados. Logo, concluímos que existe uma

intensificação dos ventos próximo ao topo da maquete para todos os casos. Pois, as velocidades no topo são superiores as velocidades registradas na base.

Seguindo as indicações desse estudo, podemos inferir de acordo com as análises dos resultados do experimento realizado no túnel de vento, que o Pico dos Dias, devido a sua morfologia, contribui para a intensificação da velocidade dos ventos próximo ao seu topo.

Baseado nos resultados obtidos é possível dizer que o Pico dos Dias tem potencial para a geração de energia eólica. Como foi constatado através das análises realizadas, a maioria dos ventos que passam sobre a região próximo ao topo do Pico dos Dias possuem velocidades superiores a 3m/s. Segundo o *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*, tem-se registros de atividade eólica com ventos médios de aproximadamente 4m/s medidos a 10m de altura (AMARANTE et al., 2001). Logo, para o Pico dos Dias, considerando que o vento tende a se intensificar conforme ele se distancia da superfície e associando isso ao fato da própria montanha também intensificar os ventos em seu topo devido a sua orografia que está de acordo com os resultados obtidos em laboratório, nas alturas de 15,5cm e 16cm que representam respectivamente 60m e 120m acima do topo do Pico dos Dias, a velocidade do vento pode gerar energia suficiente para obter-se um aproveitamento eólico nas alturas onde esses geradores costumam ser instalados. Destaca-se a estação do inverno como a estação que possui o maior potencial eólico para a região, pois nessa época tem-se o maior valor de velocidade média e a maior frequência de ventos acima de 4m/s. Relacionado a isso, esse estudo também demonstrou que em períodos secos os ventos são mais intensos. Logo, podemos associar que os valores elevados de velocidade do vento registrados no inverno são decorrentes de um período seco do ano, o que é realmente observado nos estudos de climatologia referentes a essa região. Outro ponto relevante constatado por este estudo, é que a energia eólica para OPD pode servir como complemento da energia fotovoltaica que já está em funcionamento, pois, nos períodos onde os painéis solares possuem a sua menor eficiência (durante o período noturno), os geradores eólicos podem apresentar a sua maior eficiência devido a alta velocidade do vento nesse intervalo de tempo de acordo com os dados apresentados.

Para trabalhos futuros recomenda-se a utilização das outras estações meteorológicas móveis para realizar uma comparação com os dados observados pela estação automática afim de averiguar se existe alguma informação equivocada sendo

medida pelos instrumentos. Realizar novamente os ensaios utilizando um modelo reduzido produzido a partir de uma impressora 3D, a fim de reproduzir detalhadamente a orografia da região, para melhorar a simulação da interação da orografia com o regime de ventos para o OPD. Outro ponto importante é fazer uma análise mais detalhada sobre a turbulência do vento na região para saber se esse fator pode comprometer a geração de energia. Para finalizar, também seria interessante realizar um estudo para avaliar se a turbulência gerada pelas turbinas eólicas pode interferir nas atividades desenvolvidas no Observatório do Pico dos Dias.

6 REFERÊNCIAS

AMARANTE, Odilon A. Camargo et al. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2001). Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf. Acesso em: 01 junho 2017.

AMARANTE, Odilon A. Camargo et al. Atlas Eólico do Espírito Santo (Secretaria do Espírito Santo, Espírito Santo, 2009). Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_ES.pdf. Acesso: 22 de novembro 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEólica), Wind Energy in The Northeast of Brazil. Disponível em: http://www.abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2017/05/424_Boletim_Anual_de_Geracao_Eolica_2016_Alta.pdf. Acessado em: 29 de maio de 2017.

BELTRAN-TELLES, Aurelio et al. Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. CienciaUAT, Ciudad Victoria, v. 11, n. 2, p. 105-117, jun. 2017. Disponível em:

<http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-78582017000100105&lng=es&nrm=iso>. Acesso em: 27 maio 2017.

DALAGNOL, Ricardo et al . Assessment of climate change impacts on water resources of the Purus Basin in the southwestern Amazon. Acta Amaz., Manaus , v. 47, n. 3, p. 213-226, July 2017 . Available from

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0044-59672017000300213&lng=en&nrm=iso>. access on 08 Oct. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201601993>.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Mitigation of climate change 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf. Acesso em: 29 de maio de 2017.

J. Holton, An Introduction to Dynamic Meteorology (Academic Press, San Diego, 1992), 3rd. ed. Disponível em:

http://www.dca.ufcg.edu.br/DCA_download/An%20Introduction%20to%20Dynamic%20Meteorology.pdf. Acesso: 29 de maio 2017.

JUGEND, Daniel; FIGUEIREDO, José. Integrando sustentabilidade ambiental e gestão de portfólio de projetos: estudo de caso em uma empresa de energia. Gest. Prod., São Carlos , v. 24, n. 3, p. 526-537, Sept. 2017 . Available from

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-

530X2017000300526&lng=en&nrm=iso>. access on 22 Nov. 2017. Epub Sep 21, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x3451-16>.

LIMA, L. A. and BEZERRA FILHO, C. R. Wind resource evaluation in São João do Cariri (SJC) – Paraíba, Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* – ELSEVIER. 16, 474-480, 2012.

LIRA, Marcos Antonio Tavares et al. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo , v. 32, n. 1, p. 77-88, Mar. 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010277862017000100077&lng=en&nrm=iso . Access em: 01 junho 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778632120150712>.

LNA, Laboratório Nacional de Astrofísica (2011). Disponível em: <http://www.lna.br/opd/mapa.html>. Acesso em: 31 de abril de 2017.

MARTINS, F.R.; GUARNIERI, R.A.; PEREIRA, E.B.. O aproveitamento da energia eólica. *Rev. Bras. Ensino Fís.*, São Paulo , v. 30, n. 1, p. 1304.1-1304.13, 2008 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172008000100005&lng=en&nrm=iso>. access on 08 Oct. 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172008000100005>.

OLIVEIRA JUNIOR, José Francisco et al . Caracterização do regime de vento no município de Seropédica, Rio de Janeiro (2001-2010). *Floresta Ambient.*, Seropédica , v. 20, n. 4, p. 447-459, Dec. 2013 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-80872013000400003&lng=en&nrm=iso>. access on 06 Oct. 2017. Epub Nov 22, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.040>.

R. Gasch and J. Twele (eds), *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation* (Solarpraxis AG, Alemanha, 2002).

ROBALLO, Suelen Trindade; FISCH, Gilberto; GIRARDI, Roberto da Motta. Escoamento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA): parte II - ensaios no túnel de vento. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo , v. 24, n. 1, p. 87-99, Mar. 2009. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862009000100009&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 01 junho 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862009000100009>.

ROSA, C. A. e TIAGO FILHO, G. L. – *Série Energias Renováveis: Eólica*. 1ª ed. Itajubá: Fapepe, 2007. Disponível em: <https://cerpch.unifei.edu.br/wp->

content/uploads/cartilhas/cartilhas-energias-renovaveis-eolica.pdf. Acesso em: 23 de novembro de 2017.

STATOIL, State oil and gas company (2016). Energy perspectives long-term macro and market Outlook. [En línea]. Disponível em: <https://www.statoil.com/content/dam/statoil/documents/energy-perspectives/energy-perspectives-2016.pdf>. Acesso em: 26 de maio de 2017.

TENELER, G. Wind Flow Analysis on a Complex Terrain - A reliability study of a CFD tool on forested areaincluding effects of forest module. In: TENELER, G. Wind Flow Analysis on a Complex Terrain - A reliability study of a CFD tool on forested areaincluding effects of forest module. Höskolan på Gotland, p. 36, 2011..

WM, Worldometers (2017). World population clock. Disponível em: <http://www.worldometers.info/world-population/>. Acesso em: 27 de maio de 2017.

ANEXO

```
clear all
close all

load OPD_matriz.txt

cont=0

for i=1:10:150
    cont=cont+1
    lin=i
    figure(cont)
    plot (OPD_matriz(lin,1:113))
    title(lin)
    ylim([850 2000])

    figure(cont+100)
    plot (OPD_matriz(lin,113:226))
    title(lin)
    ylim([850 2000])
end

cont=200

for j=1:10:220
    cont=cont+1
    col=j
    figure(cont)
    plot (OPD_matriz(1:70,col))
    title(col)
    ylim([850 2000])

    figure(cont+100)
    plot (OPD_matriz(70:150,col))
    title(col)
    ylim([850 2000])
end
```