

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCEDIMENTO DE  
NUMERICAL SITE CALIBRATION PARA UM  
PARQUE EÓLICO USANDO DINÂMICA DE FLUIDOS  
COMPUTACIONAL

Tiago Teixeira

Dissertação submetida para a obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Mecânica  
Área de Especialização em Energia

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



Julho de 2014

Relatório da Unidade Curricular Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do  
Mestrado em Engenharia Mecânica – Área de Especialização em Energia.

Candidato: Tiago Teixeira, Nº 1111618, 1111618@isep.ipp.pt  
Orientação Científica: Doutor Carlos Silva Santos, carlos.santos@megajoule.pt  
Co-orientação Científica: Eng. Rui Pereira, rui.pereira@megajoule.pt

Empresa: Megajoule Inovação Lda., Rua Eng. Frederico Ulrich, 2650  
4470-605 Moreira da Maia, Portugal



Mestrado em Engenharia Mecânica  
Área de Especialização em Energia  
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



Julho de 2014

*“Não cruze os braços diante de uma dificuldade, pois o maior homem do mundo morreu de braços abertos!” - Bob Marley*

Este trabalho é dedicado à memória do meu eterno amigo, Carlos Pinheiro, que combateu contra o cancro, durante seis anos, com o seu enorme sorriso. Considero-o um grande exemplo de crença e bravura para qualquer que seja a adversidade.



# Agradecimentos

A todos os meus companheiros e professores de curso que ao longo do mestrado me ajudaram e apoiaram por forma a atingir os meus objetivos e a concluir mais uma etapa da minha formação académica. O meu sincero obrigado por todo o apoio demonstrado.

Ao orientador e coorientador desta tese, Professor Doutor Carlos Santos e Eng<sup>o</sup> Rui Pereira, agradeço a oportunidade, disponibilidade e o privilégio que me concederam ao desenvolver um estudo no ramo da Mecânica dos Fluidos Computacional - Energia Eólica. A toda equipa MEGAJOULE, pelo bom acolhimento e por toda a disponibilidade, o que me possibilitou a conceção deste estudo.

À minha família, em especial, aos meus pais e irmã, um profundo agradecimento por acreditarem sempre em mim e apostarem na minha formação académica ao longo destes anos. Espero, desta forma, terminar esta etapa da minha vida da melhor maneira e retribuir-lhes com todo o carinho, apoio e dedicação que sempre me demonstraram.

À minha namorada, Daniela Barreira, pelo amor, apoio e dedicação que diariamente me oferece para que eu consiga atingir sempre os meus objetivos. Por ultimo, agradeço também aos autores do L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X e T<sub>E</sub>X, que disponibilizam, gratuitamente estes excelentes programas de processamento de texto que utilizei na escrita deste documento.



# Resumo

Esta dissertação descreve o desenvolvimento e avaliação de um procedimento de “Numerical Site Calibration” (NSC) para um Parque Eólico, situado a sul de Portugal, usando Dinâmica de Fluídos Computacional (CFD).

O NSC encontra-se baseado no “Site Calibration” (SC), sendo este um método de medição padronizado pela Comissão Eletrónica Internacional através da norma IEC 61400. Este método tem a finalidade de quantificar e reduzir os efeitos provocados pelo terreno e por possíveis obstáculos, na medição do desempenho energético das turbinas eólicas. Assim, no SC são realizadas medições em dois pontos, no mastro referência e no local da turbina (mastro temporário). No entanto, em Parques Eólicos já construídos, este método não é aplicável visto ser necessária a instalação de um mastro de medição no local da turbina e, por conseguinte, o procedimento adequado para estas circunstâncias é o NSC.

O desenvolvimento deste método é feito por um código CFD, desenvolvido por uma equipa de investigação do Instituto Superior de Engenharia do Porto, designado de WINDIE<sup>TM</sup>, usado extensivamente pela empresa Megajoule Inovação, Lda em aplicações de energia eólica em todo mundo. Este código é uma ferramenta para simulação de escoamentos tridimensionais em terrenos complexos.

As simulações do escoamento são realizadas no regime transiente utilizando as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds com aproximação de Bussinesq e o modelo de turbulência TKE 1.5. As condições fronteira são provenientes dos resultados de uma simulação realizada com Weather Research and Forecasting, WRF. Estas simulações dividem-se em dois grupos, um dos conjuntos de simulações utiliza o esquema convectivo Upwind e o outro utiliza o esquema convectivo de 4ª ordem.

A análise deste método é realizada a partir da comparação dos dados obtidos nas simulações realizadas no código WINDIE<sup>TM</sup> e a coleta de dados medidos

durante o processo SC.

Em suma, conclui-se que o WINDIE<sup>TM</sup> e as suas configurações reproduzem bons resultados de calibração, já que produzem erros globais na ordem de dois pontos percentuais em relação ao SC realizado para o mesmo local em estudo.

**Palavras-chave** : Energia Eólica; WINDIE<sup>TM</sup>; Calibração Numérica do Local; Calibração Local; Turbina; Factores de Corecção de Fluxo (FCF'S); Weather Research and Forecasting (WRF) ...

# Abstract

This thesis describes the development and evaluation of a procedure for “Numerical Site Calibration” ( NSC ) for a wind farm, located at south of Portugal, using Computational Fluid Dynamics (CFD). The NSC lies “based on Site Calibration” (SC), which is a standardized method of measuring by the International Electronics Commission through IEC 61400. This method aims to quantify and reduce the effects caused by terrain and potential obstacles in measuring energy performance of wind turbines. Thus, the SC measurements are performed at two points on the mast and point of reference turbine (temporary mast). However, on wind farms already constructed, this method is not applicable because the installation of the mast on site measurement of the turbine and therefore the appropriate procedure for these conditions is required to be NSC. The development of this method is done by a CFD code, developed by a research team from the Instituto Superior de Engenharia do Porto, designated WINDIE<sup>TM</sup>, extensively used by the company Megajoule Inovação Lda in wind energy applications around world. This code is a tool for simulation of three-dimensional flows in complex terrain. The flow simulations are conducted in the transient regime using the Navier-Stokes equations with Reynolds Averaged approach Bussinesq turbulence model and the TKE 1.5. The boundary conditions are from the results of a simulation performed using Weather Research and Forecasting, WRF. These simulations are divided into two groups, one of the sets of simulations using the convective scheme and other uses Upwind scheme convective 4th order. The analysis of this method is performed starting from the comparison of the data obtained in the simulations WINDIE<sup>TM</sup> code and collect data measured during SC . In sum, we conclude that the WINDIE<sup>TM</sup> and their settings reproduce good calibration results, since they produce global errors on the order of two percentage points over the SC held to the same place studied.

**Keywords:** Wind Energy; WINDIE<sup>TM</sup>; Numerical Site Calibration; Site Calibration; Turbine; Flow Correction Factor (FCF'S); Weather Research and Forecasting (WRF)...

# Resumé

Cette thèse décrit le développement et l'évaluation d'une procédure de "Numerical Site Calibration" (NSC) pour un parc éolien, situé au sud du Portugal, en utilisant la dynamique des fluides computationnelle (CFD).

Le NSC est basée sur "Site Calibration" (SC), qui est une méthode normalisée de mesure par la Commission électrotechnique internationale IEC 61400 par. Cette méthode vise à quantifier et à réduire les effets causés par le terrain et les obstacles potentiels à mesurer la performance énergétique des éoliennes. Ainsi, les mesures de SC sont effectuées à deux points sur le mât et le point de turbine de référence (mât temporaire). Toutefois, les parcs éoliens déjà construits, cette méthode n'est pas applicable parce que l'installation du mât sur mesure du site de la turbine et donc la procédure appropriée pour ces conditions sont nécessaires pour être NSC.

Le développement de cette méthode se fait par un code CFD, développé par une équipe de chercheurs de l'Instituto Superior de Engenharia do Porto, désigné WINDIE<sup>TM</sup>, largement utilisé par les entreprises Megajoule Inovação Lda dans les applications de l'énergie éolienne à travers monde. Ce code est un outil de simulation de flux en trois dimensions en terrain complexe.

Les simulations d'écoulement sont effectuées dans le régime transitoire en utilisant les équations de Navier-Stokes avec une moyenne par Reynolds approche Bussinesq 1.5 TKE et modèle de turbulence. Les conditions aux limites sont des résultats d'une simulation réalisée à l'aide Weather Research and Forecasting, WRF. Ces simulations sont divisés en deux groupes, un ensemble de simulations en utilisant le schéma de convection au près et l'autre utilise le schéma de convection de 4ème ordre . L'analyse de cette méthode est réalisée à partir de la comparaison des données obtenues dans les simulations WINDIE<sup>TM</sup> de code de dollars et de recueillir des données mesurées au cours de SC. En somme, nous concluons que la WINDIE<sup>TM</sup> et leurs paramètres reproduire de bons résultats d'étalonnage, car ils produisent des

erreurs globales de l'ordre de deux points de pourcentage au cours de la SC qui s'est tenue au même endroit étudié.

**Mots-clés:** énergie éolienne; WINDIE<sup>TM</sup>; Numerical site Calibration; calibration du site; turbine; facteur de correction de débit (FCF'S); Weather Research and Forecasting (WRF)...

# Prefácio

Este trabalho foi desenvolvido na Megajoule Inovação Lda. em parceria com o Instituto Superior de Engenharia do Porto, no âmbito da unidade curricular Dissertação/Projeto do Mestrado em Engenharia Mecânica, ramo Energia, do Departamento de Engenharia Mecânica.



# Conteúdo

|  |           |
|--|-----------|
| Resumo . . . . .   | i         |
| Abstract . . . . .   | iii       |
| Resumé . . . . .   | v         |
| Prefácio . . . . .   | vii       |
| Nomenclatura . . . . .   | xvii      |
| <b>1 Introdução</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivação e objectivos do presente trabalho . . . . .                      | 1         |
| 1.2 Conteúdo da tese . . . . .   | 3         |
| <b>2 Revisão bibliográfica</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1 Norma IEC 61400-12-1 . . . . .   | 5         |
| 2.1.1 IEC 61400-Parte 12- Desempenho energético das turbinas eólicas . . . . . | 5         |
| 2.1.2 Calibração do local . . . . .  | 10        |
| 2.2 Técnicas Numéricas . . . . .   | 18        |
| 2.2.1 Código mesoescala – WRF . . . . .  | 18        |
| 2.2.2 Código microescala-WINDIE <sup>TM</sup> . . . . .                        | 19        |
| <b>3 Escoamento atmosférico sobre terreno complexo</b>                         | <b>21</b> |
| 3.1 Caracterização do Local . . . . .  | 22        |
| 3.2 Caracterização do regime do vento . . . . .                                | 26        |
| 3.3 Resultados calibração do local . . . . .                                   | 36        |
| 3.3.1 Setor de medição . . . . .   | 36        |
| 3.3.2 Factores de correção do fluxo . . . . .                                  | 37        |
| <b>4 Modelação numérica</b>  | <b>41</b> |
| 4.1 Modelo de mesoescala - WRF . . . . .                                       | 41        |
| 4.1.1 Descrição geral do modelo WRF . . . . .                                  | 41        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1.2    | Técnicas utilizadas pelo modelo . . . . .                                  | 43        |
| 4.1.3    | Opções utilizadas na simulação . . . . .                                   | 45        |
| 4.2      | Modelo de microescala - WINDIE <sup>TM</sup> . . . . .                     | 46        |
| 4.2.1    | Modelo matemático . . . . .  | 46        |
| 4.2.2    | Condições de fronteiras . . . . .  | 48        |
| 4.2.3    | Esquemas convectivos . . . . .   | 49        |
| 4.2.4    | Técnica de Paralelização . . . . .   | 51        |
| 4.2.5    | Critérios de estabilidade . . . . .  | 52        |
| 4.2.6    | Metodologias numéricas . . . . .   | 53        |
| <b>5</b> | <b>Resultados e discussão</b> . . . . .                                    | <b>57</b> |
| 5.1      | Análise dos dados medidos . . . . .  | 57        |
| 5.2      | Análise temporal . . . . .   | 60        |
| 5.2.1    | Direção de vento . . . . .   | 61        |
| 5.2.2    | Velocidade do vento . . . . .  | 64        |
| 5.2.3    | Intensidade turbulenta . . . . .   | 66        |
| 5.2.4    | Fatores de correção de fluxo . . . . .                                     | 68        |
| 5.3      | Análise do processo numérico de calibração do local . . . . .              | 72        |
| 5.3.1    | Fatores de correção de fluxo . . . . .                                     | 72        |
| 5.3.2    | Erros . . . . .  | 75        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões e Trabalho Futuro</b> . . . . .                              | <b>79</b> |
| 6.1      | Conclusões . . . . .   | 79        |
| 6.2      | Trabalho futuro . . . . .  | 81        |
|          | <b>Bibliografia</b> . . . . .  | <b>82</b> |
| <b>A</b> | <b>Códigos MATLAB</b> . . . . .  | <b>85</b> |
| A.1      | Apresentação do escoamento . . . . .                                       | 85        |
| A.1.1    | Importar os dados para análise . . . . .                                   | 85        |
| A.1.2    | Análise dos dados em função da direção do vento . . . . .                  | 86        |
| A.1.3    | Análise dos dados em função da hora . . . . .                              | 96        |
| A.1.4    | Análise dos dados de cada mês . . . . .                                    | 98        |
| A.1.5    | Análise dos dados em função da velocidade . . . . .                        | 102       |
| A.2      | Apresentação dos resultados SC . . . . .                                   | 104       |
| A.2.1    | Importar os dados para análise . . . . .                                   | 104       |
| A.2.2    | Filtrar dados pela velocidade do vento no mastro re-<br>ferência . . . . . | 104       |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| A.2.3    | Fatores de correção de fluxo . . . . .  | 104        |
| A.2.4    | Análise dos FCF's para as direcções de vento no mastro<br>referência dentro do setor de medição . . . . . | 105        |
| A.3      | Análise temporal . . . . .  | 110        |
| A.3.1    | Intervalo de tempo analisado . . . . .  | 110        |
| A.3.2    | Importar os dados para análise . . . . .  | 110        |
| A.3.3    | Cálculos . . . . .  | 112        |
| A.3.4    | Gráficos dos dados medidos . . . . .  | 114        |
| A.3.5    | Gráficos dos dados medidos, WINDIE <sup>TM</sup> e WRF . . . . .  | 117        |
| A.4      | Análise FCF's do NSC . . . . .  | 124        |
| A.4.1    | Intervalo de tempo analisado . . . . .  | 124        |
| A.4.2    | Importar os dados para análise . . . . .  | 124        |
| A.4.3    | Filtrar dados pela velocidade e direcção no mastro re-<br>ferência . . . . .                              | 126        |
| A.4.4    | Cálculos . . . . .  | 126        |
| A.4.5    | Folha de cálculo dos resultados . . . . .   | 131        |
| <b>B</b> | <b>Configuração WRF</b>   | <b>133</b> |
| B.1      | Ficheiro de pré-processamento : namelist.wps . . . . .  | 133        |
| B.2      | Ficheiro de processamento : namelist.input . . . . .  | 135        |
| <b>C</b> | <b>Configuração WINDIE<sup>TM</sup></b>   | <b>139</b> |
| C.1      | Ficheiro de pré-processamento : preproc.cfg . . . . .   | 139        |
| C.2      | Ficheiro de processamento : windie.cfg . . . . .  | 141        |



# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Requisitos orográficos-IEC 61400 12.1 . . . . .  | 8  |
| 3.1 | Setor de medição . . . . .   | 36 |
| 3.2 | Análise dos FCF's . . . . .  | 38 |
| 3.3 | FCF's médios de cada subsetor por gama de velocidade . . . . .                         | 39 |
| 4.1 | Configurações das simulações . . . . .   | 54 |
| 5.1 | Coefficientes das regressões - Calibração do local . . . . .                           | 70 |
| 5.2 | Dados estatísticos dos FCF's - Calibração do local . . . . .                           | 73 |
| 5.3 | Dados estatísticos dos FCF's - Calibração numérica do local<br>(simulação 3) . . . . . | 74 |
| 5.4 | Dados estatísticos dos FCF's - Calibração numérica do local<br>(simulação 6) . . . . . | 74 |
| 5.5 | Erros absolutos e relativos dos FCF's . . . . .  | 76 |
| 5.6 | Erros globais . . . . .  | 77 |



# Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Ilustração da área a ser avaliada-IEC 61400 12.1 . . . . .  | 9  |
| 2.2  | Tipos de terreno-IEC 61400 12.1 . . . . .   | 12 |
| 2.3  | Espectro da velocidades do vento . . . . .  | 16 |
| 2.4  | Esquema de utilização WINDIE <sup>TM</sup> , com acoplamento de mesoescala (azul); usando condições de fronteira idealizadas (vermelho) . . . . . | 20 |
| 3.1  | Terreno analisado e posições dos mastros - google earth . . . . .   | 21 |
| 3.2  | Mapa topográfico - SRTM . . . . .   | 23 |
| 3.3  | Mapa da rugosidade - SRTM . . . . .   | 24 |
| 3.4  | Mapa do declive - SRTM . . . . .  | 25 |
| 3.5  | Frequência da direção do vento para os setores de 30 ° (cinzento) e de 10 ° (amarelo) . . . . .   | 27 |
| 3.6  | Direção média do vento por hora . . . . .   | 27 |
| 3.7  | Direção média do vento por hora de cada mês . . . . .   | 28 |
| 3.8  | Velocidade média do vento por subsetor . . . . .  | 29 |
| 3.9  | Velocidade média do vento por hora . . . . .  | 29 |
| 3.10 | Velocidade média do vento por hora de cada mês . . . . .  | 30 |
| 3.11 | Intensidade turbulenta média . . . . .  | 31 |
| 3.12 | Intensidade turbulenta média do vento por hora de cada mês . . . . .  | 32 |
| 3.13 | Intensidade turbulenta média por gama de velocidade . . . . .   | 33 |
| 3.14 | Fluxo potência médio do vento por hora de cada mês . . . . .  | 34 |
| 3.15 | Porcentagem da contribuição energética . . . . .  | 35 |
| 3.16 | Rosa dos fatores de correção do fluxo . . . . .   | 37 |
| 4.1  | Representação esquemática da modelação do sistema . . . . .   | 42 |
| 4.2  | Malha de cálculo - ARW (2013) . . . . .   | 43 |
| 4.3  | Níveis verticais da malha - ARW (2013) . . . . .  | 43 |
| 4.4  | “Nesting” - ARW (2013) . . . . .  | 44 |

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.5  | Volume de Controlo 2D . . . . .   | 50 |
| 4.6  | Representação dos subdomínios sobrepostos . . . . .                           | 52 |
| 4.7  | Malha WINDIE <sup>TM</sup> - simulação 3 . . . . .                            | 55 |
| 5.1  | Direções medidas . . . . .  | 58 |
| 5.2  | Frequência das direções medidas . . . . .                                     | 58 |
| 5.3  | Velocidades medidas . . . . .   | 59 |
| 5.4  | Intensidades turbulentas medidas . . . . .                                    | 60 |
| 5.5  | Direções Simulação 3 WINDIE <sup>TM</sup> , WRF e medidas . . . . .           | 61 |
| 5.6  | Direções Simulação 6 WINDIE <sup>TM</sup> , WRF e medidas . . . . .           | 61 |
| 5.7  | Frequência das Direções - simulação WRF . . . . .                             | 62 |
| 5.8  | Frequência das Direções - simulação 3 WINDIE <sup>TM</sup> . . . . .          | 63 |
| 5.9  | Frequência das Direções - simulação 6 WINDIE <sup>TM</sup> . . . . .          | 63 |
| 5.10 | Velocidades Simulação 3 WINDIE <sup>TM</sup> , WRF e medidas . . . . .        | 65 |
| 5.11 | Velocidades Simulação 6 WINDIE <sup>TM</sup> , WRF e medidas . . . . .        | 65 |
| 5.12 | Intensidades turbulentas Simulação 3 WINDIE <sup>TM</sup> e medidas . . . . . | 67 |
| 5.13 | Intensidades turbulentas Simulação 6 WINDIE <sup>TM</sup> e medidas . . . . . | 67 |
| 5.14 | FCF's Simulação 3 WINDIE <sup>TM</sup> e medidas . . . . .                    | 68 |
| 5.15 | FCF's Simulação 6 WINDIE <sup>TM</sup> e medidas . . . . .                    | 69 |
| 5.16 | FCF <sub>windie</sub> vs FCF <sub>medidos</sub> - Simulação 3 . . . . .       | 71 |
| 5.17 | FCF <sub>windie</sub> vs FCF <sub>medidos</sub> - Simulação 6 . . . . .       | 71 |

# Nomenclatura

## Caracteres Romanos

|              |  |
|--------------|--|
| $CE$         | Contribuição Energética  |
| $C_k$        | constante do modelo TKE 1.5  |
| $Co$         | numéro de Courant  |
| $d_{std}$    | Desvio entre a velocidade prevista e medida                          |
| $f$          | número de graus liberdade da calibração local, parâmetro de Coriolis |
| $F$          | correção da calibração local   |
| $FP$         | Fluxo Potência   |
| $g$          | módulo do vector aceleração da gravidade                             |
| $IT, I_t$    | Intensidade turbulenta   |
| $J$          | Jacobiano da transformação de coordenadas                            |
| $K$          | número de incógnitas   |
| $k$          | energia cinética da turbulência                                      |
| $l$          | comprimento característico   |
| $L$          | comprimento de Monin-Obukov  |
| $n$          | número de conjunto de dados incluídos na análise da calibração local |
| $N$          | frequência de Brunt-Väisälä  |
| $NI, NJ, NK$ | números de nós nas três direcção do domínio computacional            |
| $P, p$       | pressão  |
| $P_k$        | produção de energia cinética da turbulência                          |
| $Pr$         | número Prandtl   |
| $Re$         | número de Reynolds   |
| $s$          | incerteza estatística  |
| $S_k$        | destruição de energia cinética turbulenta                            |
| $T$          | temperatura  |
| $t$          | tempo  |
| $\Delta t$   | intervalo de tempo   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| $U, u$             | componente segundo $x$ do vector velocidade             |
| $U_i, u_i$         | campo de velocidade, componente segundo $x, y$ ou $z$   |
| $U_{RM}$           | velocidade no mastro referência                         |
| $U_{TM}$           | velocidade no mastro temporário                         |
| $U_{med.turbina}$  | velocidade medida na turbina                            |
| $U_{prev.turbina}$ | velocidade prevista na turbina                          |
| $U_0$              | velocidade de referência                                |
| $u^*$              | velocidade de fricção                                   |
| $V, v$             | componente segundo $y$ do vector velocidade             |
| $V_h$              | módulo das componentes horizontais do vector velocidade |
| $W, w$             | componente segundo $z$ do vector velocidade             |
| $x_i$              | componente do sistema de coordenadas cartesiano         |
| $x^i$              | coordenadas de um sistema de coordenadas cartesiano     |
| $y$                | componente do sistema de coordenadas cartesiano         |
| $z$                | componente do sistema de coordenadas cartesiano         |
| $z_0$              | escala de comprimento dos elementos rugosos             |

### Caracteres Gregos

|               |   |
|---------------|---|
| $\beta_i^j$   | componentes do tensor de transformação de coordenadas     |
| $\Gamma$      | coeficiente de difusão                                    |
| $\delta_{ij}$ | tensor de Kronecker                                       |
| $\varepsilon$ | destruição da energia cinética da turbulência             |
| $\theta$      | temperatura potencial                                     |
| $\kappa$      | constante de von Kármán                                   |
| $\lambda_z$   | comprimento de onda vertical                              |
| $\mu$         | viscosidade dinâmica                                      |
| $\mu_t$       | viscosidade turbulenta                                    |
| $\nu$         | viscosidade cinemática                                    |
| $\xi^i$       | coordenadas de um sistema de coordenadas genéricas        |
| $\rho$        | massa volúmica  |
| $\sigma_k$    | constante do modelo TKE 1.5                               |
| $\sigma_{ij}$ | tensor das tensões de Reynolds                            |
| $\tau_{ij}$   | tensor das tensões viscosas                               |
| $\tau_{wall}$ | tensão de corte de Reynolds no limite inferior do domínio |
| $\Phi, \phi$  | direcção do vento   |

**Operadores**

|                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| $\overline{(\ )}$   | valor médio        |
| $\partial/\partial$ | derivada parcial   |
| $\Delta$            | diferença          |
| $\nabla$            | operador gradiente |
| $\nabla^2$          | Laplaciano         |

**Abreviaturas**

|          |                                 |
|----------|---------------------------------|
| CFL      | Courant-Friedrichs-Lewy         |
| FCF      | Factor de Correção de Fluxo     |
| Max, max | Máximo                          |
| Min, min | Mínimo                          |
| NSC      | Numerical Site Calibration      |
| PAC      | Parâmetro de AutoConsistência   |
| RaNS     | Reynolds-averaged Navier-Stokes |
| SC       | Site Calibration                |
| VQM      | Valor Quadrático Médio          |

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação e objectivos do presente trabalho

Os inúmeros parques eólicos já construídos e a crescente necessidade dos países recorrerem às energias limpas, por forma a aumentarem a sua independência energética, teve como consequência maior a ocupação generalizada dos terrenos ditos ideais (planos de baixa cobertura vegetal e sem obstáculos) para implementação de novos parques eólicos. Desta forma, urge olhar para outros tipos de terrenos (complexos e por vezes com vegetação) como futuros locais para implementação de novos parques. Torna-se fulcral o estudo dos fenómenos produzidos na camada limite atmosférica das topografias complexas, com o objetivo de obter boas avaliações dos escoamentos proporcionando uma melhor previsão do desempenho das turbinas eólicas.

Com o aumento da complexidade orográfica, também a complexidade dos modelos numéricos tende a crescer, de forma a capturar os fenómenos físicos que o escoamento desenvolve devido a essa complexidade, o que justifica o uso crescente de modelos de dinâmica dos fluidos computacional.

Todo este desenvolvimento em torno da Energia Eólica foi acompanhado pelo aparecimento de normas que regem as regras de projecto dos aerogeradores e dos parques eólicos. Estas normas através da descrição de procedimentos de medição da velocidade do vento na turbina, permitem aos promotores/construtores dos parques adquirir conhecimento sobre o desempenho dos equipamentos a instalar (ou já instalados), por forma estabelecer uma comparação com a curva potência estimada pelo fornecedor dos equipamen-

tos, viabilizando a revisão de eventuais questões contratuais, entre outras. Posto isto, destaca-se a norma IEC 61400 parte 12.1 onde se encontra descrito um método de calibração do local que foi desenvolvido para quantificar e minimizar os efeitos provocados nos escoamentos por este tipo de terrenos e por possíveis obstáculos na medição do desempenho energético (curva de potência) das turbinas. Neste procedimento para além da instalação do mastro meteorológico (local onde se monitoriza aproximadamente as velocidades na turbina durante o seu funcionamento) é necessária a instalação de um mastro temporário (local onde será instalada a turbina) de modo a recolher durante um determinado período de tempo as velocidades nos dois mastros para cada direção do vento e estudar a distorção e aceleração/desaceleração do fluxo entre esses dois pontos. Durante o período de calibração do local a turbina não poderá estar instalada, de forma a que os seus efeitos não influenciem os resultados.

Um processo SC pode arrastar-se por 3-6 meses de forma a se recolherem dados suficientes para cada direção do vento de acordo com a norma IEC 61400-12.1. Por forma a reduzir substancialmente o tempo do procedimento de calibração, este trabalho surge com o objetivo de desenvolver uma metodologia numérica de calibração do local aplicável a terrenos complexos; para além disso, este método numérico poderá vir a ser utilizado em estudos de parques eólicos construídos com o propósito de conferir o desempenho das turbinas já instaladas. Este método numérico será desenvolvido através da realização de simulações num código CFD, mais especificamente, o WINDIE<sup>TM</sup>. Assim, esta ferramenta possui a capacidade de simular escoamentos em topografias complexas utilizando um modelo não linear, equações médias de Reynolds (RANS) e vários modelos de turbulência. Independentemente dos resultados que este estudo poderá transmitir, o desenvolvimento de um modelo numérico de calibração do local não possui qualquer tipo de normativa pelo que este trabalho serve sobretudo para avaliar os procedimentos NSC que produzem os melhores resultados.

## 1.2 Conteúdo da tese

Esta tese divide-se em 6 capítulos, incluindo a presente introdução, na qual se faz uma breve alusão ao tema e aos objetivos deste trabalho. No capítulo 2 estará apresentada a norma IEC 61400-12.1 assim como as técnicas numéricas (modelos mesoescala-WRF e microescala-WINDIE<sup>TM</sup>) fundamentais para a realização deste trabalho.

No capítulo 3, estará apresentado o regime de vento medido durante o processo de calibração do local e seus resultados.

No capítulo 4, estarão descritas as opções utilizadas no modelo de mesoescala assim como o modelo matemático utilizado e as metodologias numéricas utilizadas no modelo de microescala.

No capítulo 5, estarão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos processos numéricos de calibração do local.

Como capítulo final, o capítulo 6, apresentará as principais conclusões deste trabalho assim como as possibilidades para um trabalho futuro.



# Capítulo 2

## Revisão bibliográfica

### 2.1 Norma IEC 61400-12-1

Tal como as mais variadas subdivisões da engenharia, o ramo da energia eólica, apesar de ser recente comparativamente com as demais, encontra-se sustentado por normas que auxiliam nos seus processos, por exemplo, desde a produção de turbinas eólicas até à sua implementação.

Assim, a Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC)<sup>1</sup> é a principal organização mundial que publica normas internacionais baseadas sob consenso e gerencia sistemas de avaliação da conformidade para produtos elétricos e eletrónicos, sistemas e serviços, conhecidos coletivamente como eletrotécnica. Posto isto, esta concebeu a norma 61400 que abrange os requisitos e procedimentos técnicos para o desenvolvimento de parques eólicos.

#### 2.1.1 IEC 61400-Parte 12- Desempenho energético das turbinas eólicas

Relativamente à parte 12.1 da norma supracitada (alvo fulcral deste estudo), esta proporciona orientação, medição e análise do desempenho dos aerogeradores. Em suma, esta refere que a implementação estará presente em todos os processos desde o fabrico, a compra, a futura utilização do produto e na legislação. Portanto, para os fabricantes, esta norma auxilia-os na elaboração de um sistema de desempenho de energia gerada; para os compradores permite a que estes entendam os requisitos de desempenho do equipamento;

---

<sup>1</sup>[www.iec.ch](http://www.iec.ch)

para os operadores ajuda a que estes saibam trabalhar com o equipamento e possam adquirir capacidade de entender o seu desempenho, e em termos de legislação esta permite que o perito possa verificar as características de desempenho da turbina, em resposta à regulamentação vigente e assim permitir possíveis alterações no equipamento. IEC (2011)

Torna-se necessário salientar que esta norma apresenta as características de uma única turbina eólica e posteriormente aplicar-se-á ao teste de turbinas eólicas de todos os tipos. Pode também ser usada para avaliações de desempenho em locais específicos, quando estas se encontram conectadas a uma rede elétrica ou um banco de baterias. No entanto, permite realizar comparações entre diferentes modelos ou configurações de turbinas, quando colocadas em condições específicas e quando a filtragem de dados for tida em conta. Os resultados e procedimentos padrão podem ser replicados noutros relatórios, no entanto, o utilizador deve estar ciente de que existem fatores externos que podem perturbar as medições como a turbulência, o fator de corte e as condições ambientais. A chave do teste de desempenho é a medição da velocidade do vento que é realizada através do uso de anemómetros de copo, que deverão ser calibrados em túneis de vento específicos, respeitando as condições do fluxo associadas à flutuação, ao vetor vento, à magnitude e à direção. Assim, as características de desempenho estão determinadas pela curva de potência medida e a produção de energia anual estimada (AEP). A norma descreve a metodologia de medição que a curva de potência exige e, assim sendo, os números de energia produzida devem ser complementados por uma avaliação de incerteza e os seus efeitos combinados. A curva de potência (CP) define-se como inúmeras medições de velocidade do vento e da potência no local de teste, por um período de tempo suficiente para fornecer uma base de dados estatisticamente significativa sobre as diferentes condições atmosféricas. A produção anual de energia estimada é calculada mediante a aplicação da curva de potência medida, tendo como referência a distribuição da velocidade do vento admitindo 100 por cento disponibilidade.

#### Local de teste

No local de teste a medição da velocidade do vento deve ser feita na proximidade da turbina eólica. Este local pode ter uma influência significativa no futuro desempenho do aerogerador. No caso de existirem efeitos de distorção de fluxo, estes podem fazer com que a velocidade do vento na posição de medição seja diferente da velocidade do vento na posição da turbina. Desta forma, torna-se premente avaliar o terreno de ensaio afim de:

- Escolher a posição do mastro de referência;
- Definir o setor de medição adequado;
- Estimar os fatores de correção do fluxo (FCF);
- Avaliar a incerteza devido à distorção do fluxo;

Os seguintes fatores devem ter em especial atenção variações topográficas, outras turbinas já instaladas, a rugosidade do terreno (vegetação) e outro tipo de obstáculos (edifícios, etc.).

- Localização da medição da velocidade do vento (mastro de referência)  
- Os instrumentos de medição da velocidade do vento não devem estar muito perto da turbina, uma vez que a velocidade do vento será influenciada na frente desta uma vez já instalada. Além disso, o mastro de referência não deve estar muito distante da turbina, uma vez que a correção da velocidade do vento e a conseqüente produção de energia elétrica será reduzida. A instrumentação de medição deve estar entre 2 a 4 vezes o diâmetro do rotor da turbina, sendo que o recomendado é de 2,5 vezes. Antes da realização do teste de desempenho, e por forma a selecionar a posição do mastro de referência, deve ser tomada em consideração a necessidade de se excluírem as medições de todos os setores que estão sujeitos a perturbações no fluxo, tanto no mastro como na turbina, sendo que, na maioria dos casos a melhor localização para o mastro de referência será a barlavento da turbina, isto é, onde a quantidade expectável de vento será maior durante o ensaio; contudo, noutros casos pode ser mais conveniente colocar o mastro de referência ao lado da turbina, por exemplo, quando a turbina está situada num cume.
- Setor de medição - O setor de medição deve excluir as direções com obstáculos significativos e outras turbinas eólicas. Os setores a serem excluídos devem-se maioritariamente à distância do mastro meteorológico em relação a turbina teste; condições topográficas especiais e dados de medição inesperados obtidos a partir de direções com estruturas complicadas.
- Fatores de correção e incerteza, devido à distorção do fluxo proveniente da topografia - O terreno de ensaio deve ser avaliado quanto às origens

das variações topográficas que provocam distorções do fluxo do vento. A avaliação deve identificar se a CP pode ser medida com ou sem calibração do local. Para testar este procedimento sem calibração do local, a orografia no local de teste só pode mostrar pequenas variações do plano, que se verificam tanto na base da turbina como no terreno dentro do setor de medição. A avaliação do terreno deve ser feita utilizando um modelo digital, com uma resolução de malha de 30 metros ou mais fino. Pode-se dispensar uma calibração do local caso o terreno se encontre de acordo com os requisitos da tabela seguinte. No entanto, outros aspetos tal como a rugosidade e a distância da costa podem exigir uma calibração do local. Se as características orográficas se encontram 50 por cento acima dos limites máximos estipulados na tabela, então, um modelo de fluxo pode ser usado para determinar se uma calibração do local pode ser evitada. Este modelo deve ser validado de acordo com o tipo de terreno existente e as condições atmosféricas mais expectáveis. Se este apresentar uma diferença na velocidade do vento entre a posição do anemómetro e a posição do cubo da turbina, menor que 1 por cento a 10m/s para os setores de medição, então não se procede à calibração do local. Na tabela 2.1, a designação H representa a altura do cubo do rotor e a designação D representa o seu diâmetro, o L é distância entre a turbina eólica e o mastro meteorológico. Na figura seguinte está representada a área analisada.

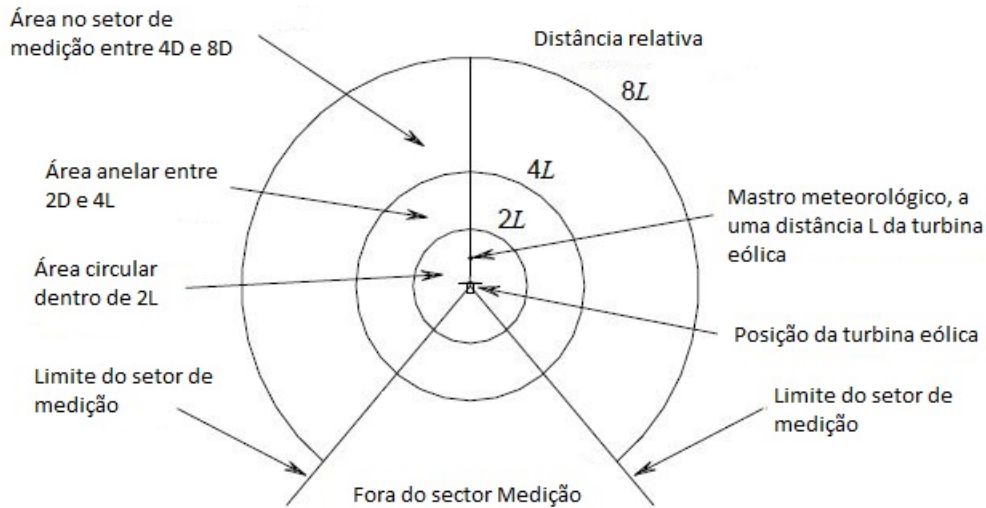
Tabela 2.1: Requisitos orográficos-IEC 61400 12.1

| Distância           | Setor                    | Declive máximo (%) | Varição máxima do terreno a partir da referência do plano |
|---------------------|--------------------------|--------------------|---|
| $< 2L$              | $360^\circ$              | $< 3^*$            | $< 0,04(H + D)$   |
| $\geq 2L$ e $< 4L$  | Setor de medição         | $< 5^*$            | $< 0,08(H + D)$   |
| $\geq 2L$ e $< 4L$  | Fora do setor de medição | $< 10^{**}$        | Não aplicável   |
| $\geq 4L$ e $< 8L$  | Setor de medição         | $< 10^*$           | $< 0,13(H + D)$   |
| $\geq 8L$ e $< 16L$ | Setor de medição         | $< 10^{**}$        | Não aplicável   |

\* O declive máximo do plano, que proporciona o melhor ajuste para o setor do terreno e atravessa a base da torre.

\*\* A linha de inclinação mais acentuada que liga a base da torre para pontos individuais dentro do setor.

Figura 2.1: Ilustração da área a ser avaliada-IEC 61400 12.1



- Avaliar a incerteza devido à distorção do fluxo - Se não for necessária uma calibração do local, a incerteza aplicada devido ao fluxo de distorção da zona de ensaio será no mínimo de 2 por cento da velocidade do vento medida isto se o mastro meteorológico está posicionado a uma distância entre 2 a 3 vezes o diâmetro do rotor da turbina. A incerteza deverá ser de 3 por cento ou mais, se a distância representar 3 a 4 vezes, a menos que haja uma evidência objetiva e, assim, poderá ser proporcionada uma margem de incerteza diferente.

Se todos os critérios acima referidos não forem atendidos ou se a incerteza for menor devido à uma distorção de fluxo no local de teste, então uma calibração do local experimental será realizada. Note-se que em Portugal, devido a complexidade da maioria dos locais onde os parques Eólicos são instalados existe quase sempre uma necessidade de um processo de calibração do local.

### 2.1.2 Calibração do local

A calibração do local quantifica e potencialmente reduz os efeitos do terreno e dos obstáculos na medição de desempenho de energia. [IEC \(2011\)](#)

#### Configuração de teste

Por forma a realizar uma calibração do local é necessário que previamente à instalação da turbina (ou após a remoção da mesma, se já existente) dois mastros meteorológicos sejam erguidos. Um mastro será a posição de referência para o teste de desempenho de energia e o segundo mastro será aquele que se encontra temporariamente na posição da turbina. Este procedimento pretende determinar a correlação das velocidades do vento entre as duas posições.

De modo a que os efeitos do terreno e as condições atmosféricas sejam bem capturadas devem ser seguidas as seguintes recomendações para posteriormente se selecionar as posições dos mastros:

- O mastro de referência utilizado no processo de SC, deve ser o mesmo ou ter as mesmas características que o utilizado para a medição da curva de potência;
- O mastro temporário deve estar localizado tão próximo quanto possível da posição em que a turbina de teste será ou foi localizada e a distância não deve ser superior a  $0,2 H$  a partir da linha de centro, onde  $H$  é a altura do eixo da turbina;
- Os mastros temporários e os de referência recomendam-se que sejam do mesmo tipo e que tenham a mesma geometria de barra, pois os efeitos serão semelhantes sobre a montagem dos sensores.

Para além dos fatores acima referidos, existem outros que podem afetar a calibração do local, tais como o tipo de terreno e as condições atmosféricas que deles advêm, incluindo o corte, a turbulência e a estabilidade. A norma utilizada para o desenvolvimento deste estudo descreve de uma forma informativa os 3 tipos de terrenos, fornecendo assim uma visão sobre o que é

esperado aquando da realização das medições. Os tipos de terrenos apresentados pela norma intitulam-se por A, B e C.

- Tipo A

O terreno tipo A é o terreno menos complexo. Apresenta-se como um local que normalmente não possui declives abruptos ao longo de grandes distâncias nem alterações significativas na elevação em relação à altura do eixo da turbina. Habitualmente atendem aos requisitos acima referidos (requisitos para que não se proceda à calibração do local), já que apresentam colinas suaves e, possivelmente, as turbinas serão localizadas numa cumeeira de frente para uma planície. Este tipo de terreno por norma goza de uma atmosfera estável, mas ao realizar-se a calibração do local as condições de corte no mastro de referência podem ser diferentes das condições de corte no mastro temporário. Se este for o caso, então os resultados da calibração do local vão ser dependentes do corte e da direção do vento.

- Tipo B

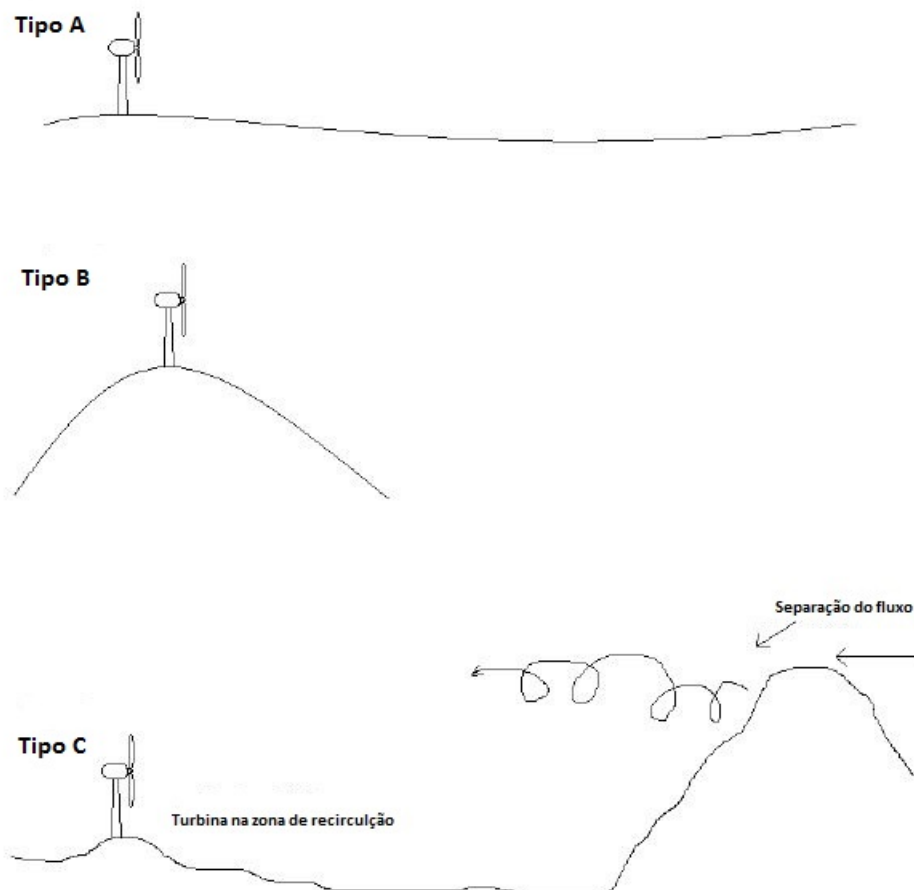
O terreno tipo B surge com um grau de complexidade moderado pois inclui montanhas, grandes colinas e locais montanhosos com moderada a forte inclinação do terreno e com alterações significativas na elevação em relação à altura do eixo da turbina. Normalmente, a tensão de corte em locais do tipo B é baixa e relativamente consistente, embora possa ocorrer corte negativo. No entanto, em locais do tipo B os resultados de calibração do local, muitas vezes dependem da velocidade e direção do vento, especialmente se a diferença de altitude entre o mastro de referência e o mastro temporário é mais do que 10 m. Deste modo, uma correção de regressão linear é muitas vezes apropriada para um sítio de tipo B. O fluxo ascendente/componente de velocidade vertical do vento induzida pelo terreno em locais do tipo B pode ter um impacto significativo sobre a incerteza, dependendo da resposta dos anemómetros ao fluxo ascendente.

- Tipo C

O terreno tipo C é o terreno que apresenta um maior grau de complexidade, pois trata-se de um local íngreme, como uma montanha ou desfiladeiro que pode causar separação do fluxo a montante da turbina de teste e criar uma zona de recirculação no local. A escala da separação do fluxo é definida pela característica do terreno e pode pertur-

bar a correlação entre as velocidades do vento no mastro temporário e de referência, mesmo se o desfiladeiro ou montanha estiver localizado num intervalo de  $8L-16L$  ( $L$ -distância entre a turbina eólica e o mastro meteorológico), longe da turbina de teste. Por sua vez, neste tipo de terrenos as correlações entre as velocidades nos dois mastros podem ser pobres e podem diferir significativamente entre dois intervalos de direções do vento adjacentes.

Figura 2.2: Tipos de terreno-IEC 61400 12.1



Em suma, de modo a minimizar influências, o mastro de referência deve estar localizado de tal forma que tenha uma altura próxima e condições de fluxo como as da turbina de teste. Outras considerações para além das referidas anteriormente a ter na campanha de calibração são as características e localização da instrumentação de medição. A configuração de teste exige que as medidas da velocidade do vento estejam à altura do cubo do rotor da turbina e a direção do vento seja próxima. Os anemómetros devem ser do mesmo tipo, com as mesmas características operacionais e devem ser calibrados no mesmo túnel de vento tanto no processo de calibração como na medição da curva potência. Dependendo das características do local, algumas medições adicionais são aconselhadas, de modo a fornecer mais informações sobre as condições do local, com o intuito de melhorar a qualidade da calibração na medição da curva potência. Posto isto, é possível identificar condições atmosféricas invulgares que se correlacionam com valores anormais e/ou podem ser utilizados para quantificar a incerteza do anemómetro específico do local operacional. Nos pontos seguintes estão apresentadas algumas medições recomendadas pela norma [IEC \(2011\)](#):

- A medição da velocidade do vento vertical (por exemplo, usando um anemómetro sónico 3D ou por um anemómetro hélice) é recomendada a 10 por cento da altura do cubo. Esta medição pode ser usada em conjunto com o relatório de classificação do instrumento para quantificar a incerteza devida às características de funcionamento.
- A medição da viragem do vento é recomendada a 10 m da altura da ponta mais baixa da medição da velocidade do vento.
- Se são esperadas condições de gelo, durante a campanha de calibração do local, um sensor de temperatura ou outros meios para a deteção de gelo são recomendados perto da altura do cubo do rotor.
- De modo a evitar o erro sistemático na medição da direção do vento, devido à incerteza da instalação do cata-vento, o mastro de referência e seu cata-vento(s) não devem ser retirados entre o local de calibração e medição da curva de potência. Se o cata-vento primário é removido ou substituído, uma componente de incerteza adicional deve ser acrescentada.

- Se o mastro de referência é removido e é instalado entre a calibração do local e a medição da curva de potência, os instrumentos devem ser montados com a mesma configuração e com os mesmos ângulos de crescimento durante os dois períodos, de modo a produzir efeitos de montagem semelhantes.

Deve acrescentar-se que está há algum tempo a ser realizada uma revisão na norma IEC 61400-12-1 com intuito de aumentar o grau de exigência na medição no SC. Nomeadamente, os dois mastros deverão estar mais equipados com variados níveis de medição da velocidade e temperatura, de forma a melhorar as avaliações aos efeitos de estabilidade nos FCF's.

#### Aquisição de dados e os critérios de rejeição

De modo a realizar uma boa análise da calibração, os dados devem ser recolhidos de forma contínua e com a mesma taxa de amostragem para o teste de desempenho de energia. Os conjuntos de dados devem basear-se em períodos de 10 minutos, extraídos a partir de dados medidos contíguos e devem ser calculados os valores da média, desvio padrão e o mínimo e máximo da velocidade do vento para cada período. Além da aplicação destes critérios de aquisição de dados devem-se aplicar critérios de rejeição. Os conjuntos de dados serão rejeitados a partir das seguintes circunstâncias:

- Falha ou degradação de equipamento de teste;
- A direção do vento encontrar-se fora do setor de medição;
- A velocidade do vento no mastro de referência ser menor que 4 m/s e superior a 16 m/s;
- Condições atmosféricas especiais que influenciem o resultado da calibração do local ou as que são utilizadas como critério de rejeição durante o teste de desempenho. Qualquer condição atmosférica especial filtrada durante a calibração do local também deve ser filtrada durante o teste de curva de potência.

Resumidamente, pode-se afirmar que as condições de medição no processo SC devem ser identificadas e devem ser, preferencialmente, iguais às do processo de medição da curva de potência.

### Análise

Após a recolha dos dados medidos e os critérios de rejeição aplicados, os dados são analisados para cada período de 10 minutos. Estes períodos são uma convenção universal da Energia Eólica pois justificam-se através do diagrama espectral do vento<sup>2</sup>, Figura 2.3, onde se verifica que a quase totalidade da turbulência afigere períodos inferiores a 10 minutos.

A análise é feita através do cálculo do rácio entre a velocidade do vento no mastro temporário pela velocidade do vento no mastro de referência. Os conjuntos de dados devem ser classificados em intervalos das direções do vento (setor de medição), que não devem ser maiores que 10 graus e não devem ser menores que a incerteza do sensor. Para cada intervalo da direção vento deve ser realizada uma regressão linear (Mínimos Quadrados Ordinários), com a velocidade do vento no mastro de referência como variável dependente e a velocidade do vento no mastro temporário como variável independente. Cada intervalo de direção do vento deve ter pelo menos 24 horas de dados no total e no mínimo 6 horas de dados onde os ventos estão abaixo de 8 m/s e 6 horas de dados onde os ventos estão acima de 8 m/s. Nestes intervalos deve existir uma ampla distribuição de velocidades, por forma a obter uma boa correlação, portanto recomenda-se que nos dados estejam presentes pelo menos velocidades até 11 m/s. De referir que os valores discrepantes da velocidade, tanto nos valores muito altos como nos valores muito baixos são altamente ponderados pelo método de regressão de Mínimos Quadrados, já que estes valores podem ter um impacto significativo sobre a regressão e devem ser investigados. Para ilustrar a correlação entre as velocidades dos dois mastros, os seguintes gráficos devem ser gerados para cada intervalo da direção vento dentro do setor de medição:

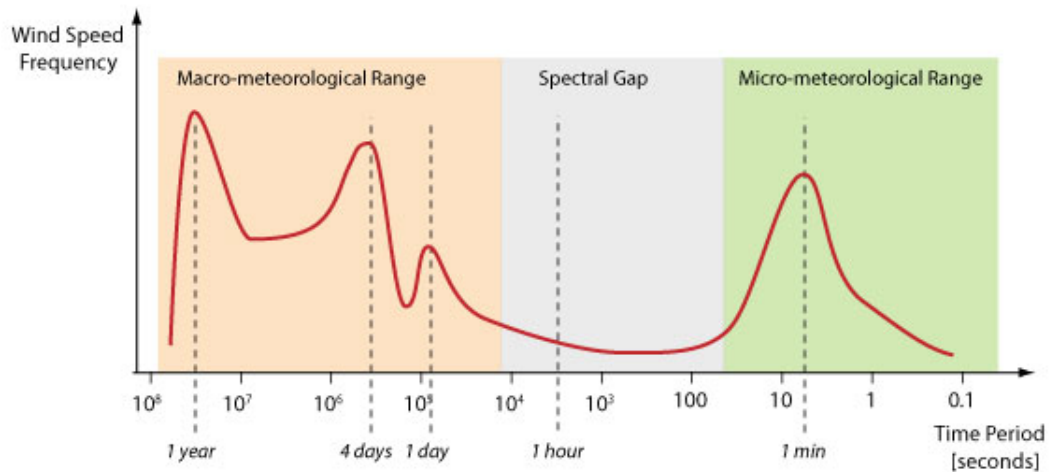
- Um gráfico com a velocidade do mastro de referência versus velocidade do mastro temporário, incluindo uma indicação da regressão linear e coeficientes de correlação;
- Num único gráfico, esboçar:
  - O rácio das velocidades dos mastros versus velocidade do vento no mastro de referência;

---

<sup>2</sup>Disponível em: [www.greenrhinoenergy.com](http://www.greenrhinoenergy.com)

- As médias dos rácios das velocidades nos mastros para intervalos de 0,5 m/s da velocidade do vento o mastro de referência;
- Uma linha  $y = b + mx$ , onde  $m$  é o declive da regressão linear,  $b$  é a interceção da linha de regressão com o eixo vertical e  $x$  é a velocidade do vento de referência;
- Uma linha horizontal indicando a média dos rácios das velocidades nos mastros para o intervalo da direção vento analisado.

Figura 2.3: Espectro da velocidades do vento



Em suma, esta análise é filtrada em torno de dois parâmetros, velocidade e direção do vento, como fora acima aludido, no entanto a presente norma está desenvolver uma análise da calibração do local na qual se inclui mais um critério de filtragem, a tensão de corte. Posto isto, não está aprofundada esta metodologia de análise, visto que na campanha de calibração do local efetuada não se realizaram análises à tensão de corte até porque a instrumentação do mastro não o permitia. As correções da calibração do local são aplicadas aos dados do mastro de referência para calcular a velocidade estimada na turbina eólica para cada ponto de dados durante o subsequente processo de medição da curva de potência. Isso deve ser feito usando a base de dados filtrada.

$$U_{prev.turbina} = f(U_{RM}, \phi) \quad (2.1)$$

Depois do cálculo da velocidade prevista, os resíduos da calibração do local devem ser calculados para cada 10 min com a diferença entre a velocidade prevista na turbina e a velocidade medida na posição da turbina.

$$Resíduos = U_{prev.turbina} - U_{med.turbina} \quad (2.2)$$

Além dos resíduos outro critério deve ser calculado, que se denomina por parâmetro de auto consistência.

$$PAC = \frac{U_{prev.turbina}}{U_{med.turbina}} \quad (2.3)$$

Os desvios entre a velocidade do vento prevista e a velocidade vento medida na turbina são calculados para cada período de 10 minutos, e o seu desvio padrão é calculado como segue:

$$d_{std} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (d_k - \bar{d}_k)^2}{n - 1}} \quad (2.4)$$

Por forma a obter uma avaliação do algoritmo de calibração do local, a incerteza estatística,  $s$ , deve ser calculada da seguinte forma:

$$s = d_{std} \cdot \frac{\sqrt{n - 1}}{f \cdot n} \quad (2.5)$$

em que  $f$  é o número de períodos de 10 minutos incluídos na calibração menos o número total de parâmetros do algoritmo de calibração.

Posto isto, há que ressaltar duas situações. No caso de se aplicarem fatores de calibração agrupados em intervalos de velocidades do mastro de referência (0,5 m/s), o número de parâmetros do algoritmo é de 1 por cada subsetor de medição. Finalmente, nos casos em que as velocidades da turbina são previstas através de regressões lineares, para cada intervalo de direção do vento o número de parâmetros é de 2 por cada subsetor de medição.

Como referido anteriormente existem outros tipos de incertezas que são independentes desta mas devem ser combinadas com o intuito de encontrar uma incerteza global da calibração do local.

## 2.2 Técnicas Numéricas

Nesta secção serão apresentadas as técnicas para produzir um modelo numérico de calibração do local. Serão usadas simulações do WRF-ARW mesoescala (previsão numérica do tempo) acoplado ao código de microescala WINDIE<sup>TM</sup> (código CFD) com o objetivo de produzir resultados com maior exatidão do que os resultados produzidos utilizando apenas a primeira técnica.

### 2.2.1 Código mesoescala – WRF

O modelo Weather Research and Forecasting (WRF) segundo [Skamarock et al. \(2005\)](#) é um sistema de previsão numérica do tempo e de simulação atmosférica concebido para aplicações operacionais e de pesquisa. Este modelo serve uma vasta gama de aplicações meteorológicas através de escalas que vão de metros a quilómetros. Este sistema foi desenvolvido na década de noventa numa parceria de colaboração, principalmente entre o Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (NCAR) <sup>3</sup>, a Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (representado pelos Centros Nacionais de Previsão Ambiental (NCEP)<sup>4</sup>, a Forecast Systems Laboratory (FSL)<sup>5</sup>, a Agência de Meteorologia da Força Aérea (AFWA)<sup>6</sup>, o Laboratório de Pesquisa Naval da Universidade de Oklahoma (OU)<sup>7</sup> e a Administração Federal de Aviação (FAA)<sup>8</sup>.

O WRF permite aos utilizadores a possibilidade de produzir simulações mediante dados reais (observações e análises) ou condições atmosféricas idealizadas. Este sistema de previsão fornece uma plataforma flexível e computacionalmente eficiente em ambientes que vão desde um cluster a um computador portátil, oferecendo avanços físicos, numéricos e de assimilação de dados.

---

<sup>3</sup>[ncar.ucar.edu](http://ncar.ucar.edu)

<sup>4</sup>[www.ncep.noaa.gov](http://www.ncep.noaa.gov)

<sup>5</sup>[www-frd.fsl.noaa.gov](http://www-frd.fsl.noaa.gov)

<sup>6</sup>[www.afweather.af.mil](http://www.afweather.af.mil)

<sup>7</sup>[www.ou.edu](http://www.ou.edu)

<sup>8</sup>[www.faa.gov](http://www.faa.gov)

### 2.2.2 Código microescala-WINDIE<sup>TM</sup>

O WINDIE<sup>TM</sup> (Castro (1997)) é um código de CFD para a engenharia do vento que foi desenvolvido por uma equipa de investigação do Instituto Politécnico do Porto, sendo utilizado extensivamente pela Megajoule Inovação, Lda para a realização de simulações estacionárias ou transientes de escoamentos sobre terrenos complexos. É um modelo não linear, que utiliza as equações de Navier-Stokes médias no tempo (RANS) e vários modelos de turbulência. O código permite uma avançada modelação da cobertura da floresta; acoplamento com modelos de mesoescala que permitem retirar condições mais representativas das fronteiras; captura efeitos térmicos através de uma equação da temperatura potencial entre outras características.

O modelo WINDIE<sup>TM</sup> tem sido utilizado em inúmeros projetos de energia eólica para análise do recurso, da turbulência e outras características do escoamento. Pretende-se aqui averiguar a sua adequabilidade ao NSC.

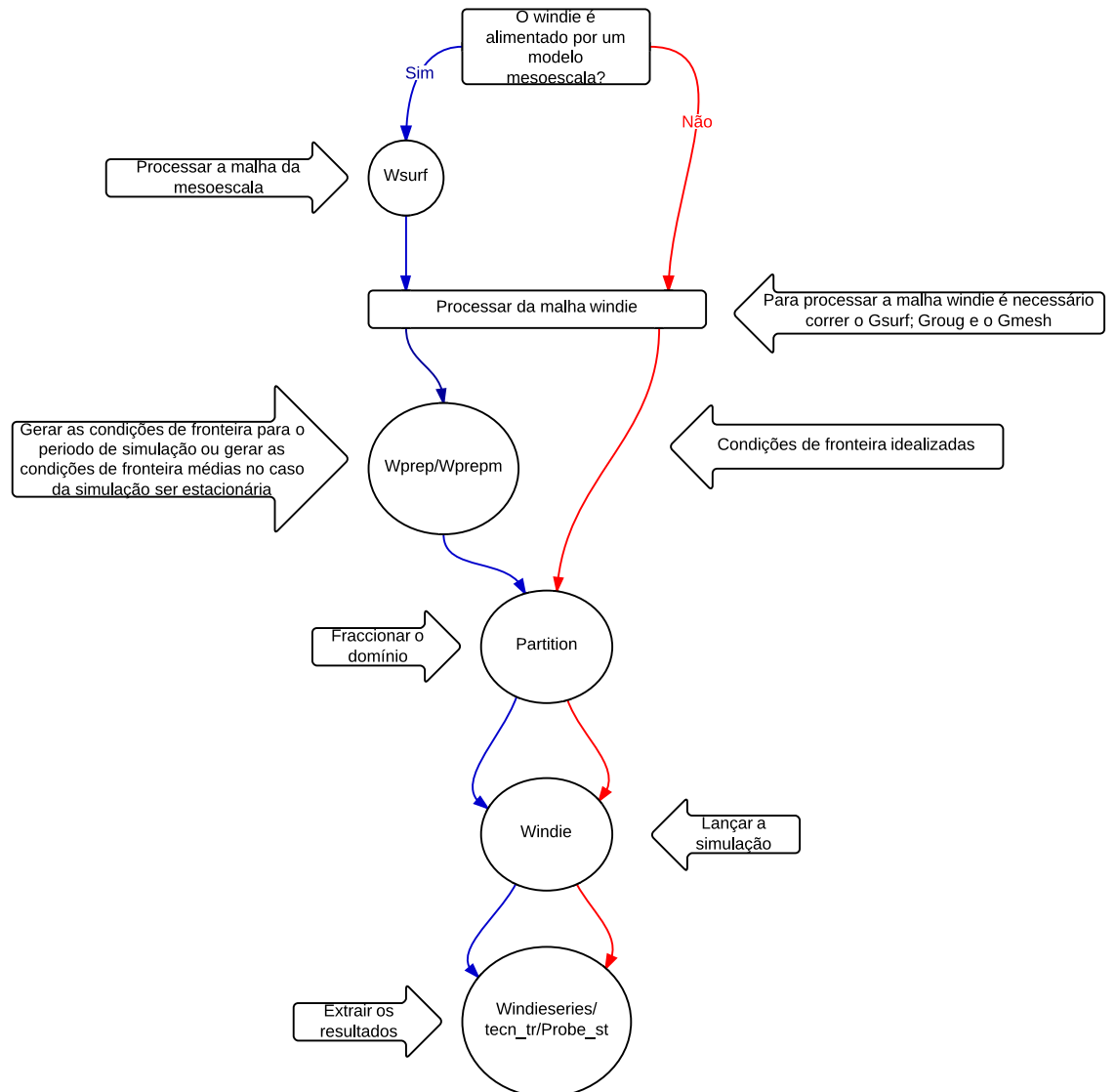
Na seguinte figura está representado um esquema de utilização do WINDIE<sup>TM</sup>, tanto para a realização de simulações em regime transiente como em regime estacionário, nele constam as três fases que o constituem: pré-processamento; processamento e o pós-processamento.

Neste estudo as simulações serão acopladas a um modelo de mesoescala e realizadas no regime transiente. Na fase de pré-processamento deste tipo de simulações é necessário gerar a malha WINDIE<sup>TM</sup>, sendo que para isso se preconizam os seguintes passos:

- **Wsurf**: extrai a informação topográfica da malha da simulação mesoescala e gera uma malha mesoescala em formato WINDIE<sup>TM</sup>;
- **Gsurf**: gera a malha em 2D;
- **Groug**: concebe a malha de rugosidade;
- **Gmesh**: cria a malha em 3D;

Seguidamente é executado o programa **WPrep**, que gera as condições de fronteira em tempos pré-estabelecidos através da extração dos resultados da mesoescala. Formada a malha para a simulação WINDIE<sup>TM</sup> e as suas condições de fronteira, o domínio é partido num número de subdomínios definidos pelo utilizador, por forma a melhorar a eficiência de cálculo do modelo. Posteriormente é lançada a simulação através do **Windie**, finalizado este processo são extraídos os resultados para um ou mais pontos do domínio analisado por intermédio do **windieseries**.

Figura 2.4: Esquema de utilização WINDIE<sup>TM</sup>, com acoplamento de mesoescala (azul); usando condições de fronteira idealizadas (vermelho)

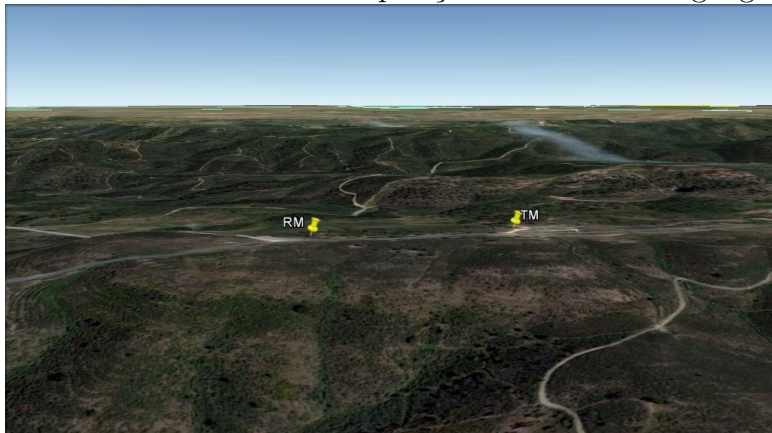


## Capítulo 3

# Escoamento atmosférico sobre terreno complexo

Neste capítulo está caracterizado o local assim como descrita a análise dos resultados das medições realizadas durante o processo de calibração do local conforme a [IEC \(2011\)](#). De forma a clarificar o regime de ventos durante o período de medição, serão representadas graficamente as características do vento tal como as direções médias; as velocidades médias; as intensidades turbulentas médias e as contribuições energéticas médias. As medições foram realizadas durante o ano 2008, nomeadamente entre o dia 20 de junho até ao dia 13 de novembro, no sul de Portugal Continental.

Figura 3.1: Terreno analisado e posições dos mastros - google earth



### 3.1 Caracterização do Local

Primordialmente, salienta-se que as informações do terreno foram fornecidas pelo cliente e estendidas com o “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM)<sup>1</sup>. Dos mastros meteorológicos instalados no local distam entre si aproximadamente 200 metros e a sua altura é de 85 metros.

Posto isto, como abordado anteriormente (confrontar Capítulo 2), pode-se verificar que o terreno analisado se classifica entre a tipologia A e B; de acordo com a norma IEC (2011), dado que este terreno não detém grande complexidade, pois apresenta colinas e locais montanhosos com inclinações moderadas e com alterações não muito significativas na elevação em relação a altura do eixo da turbina, como se verifica na figura 3.2.

Sumariamente, o terreno supracitado possui vegetação moderada (verificada por visita ao local da equipa Megajoule) conferindo, assim, um índice de rugosidade moderado. Na figura 3.3 está apresentado o mapa da rugosidade do local.

Relativamente aos declives, verifica-se que o máximo atingido é de aproximadamente 30 % e nas proximidades dos mastros meteorológicos instalados, os declives rondam 5 e 14 %, conforme a figura 3.4.

---

<sup>1</sup>srtm.usgs.gov

Figura 3.2: Mapa topográfico - SRTM

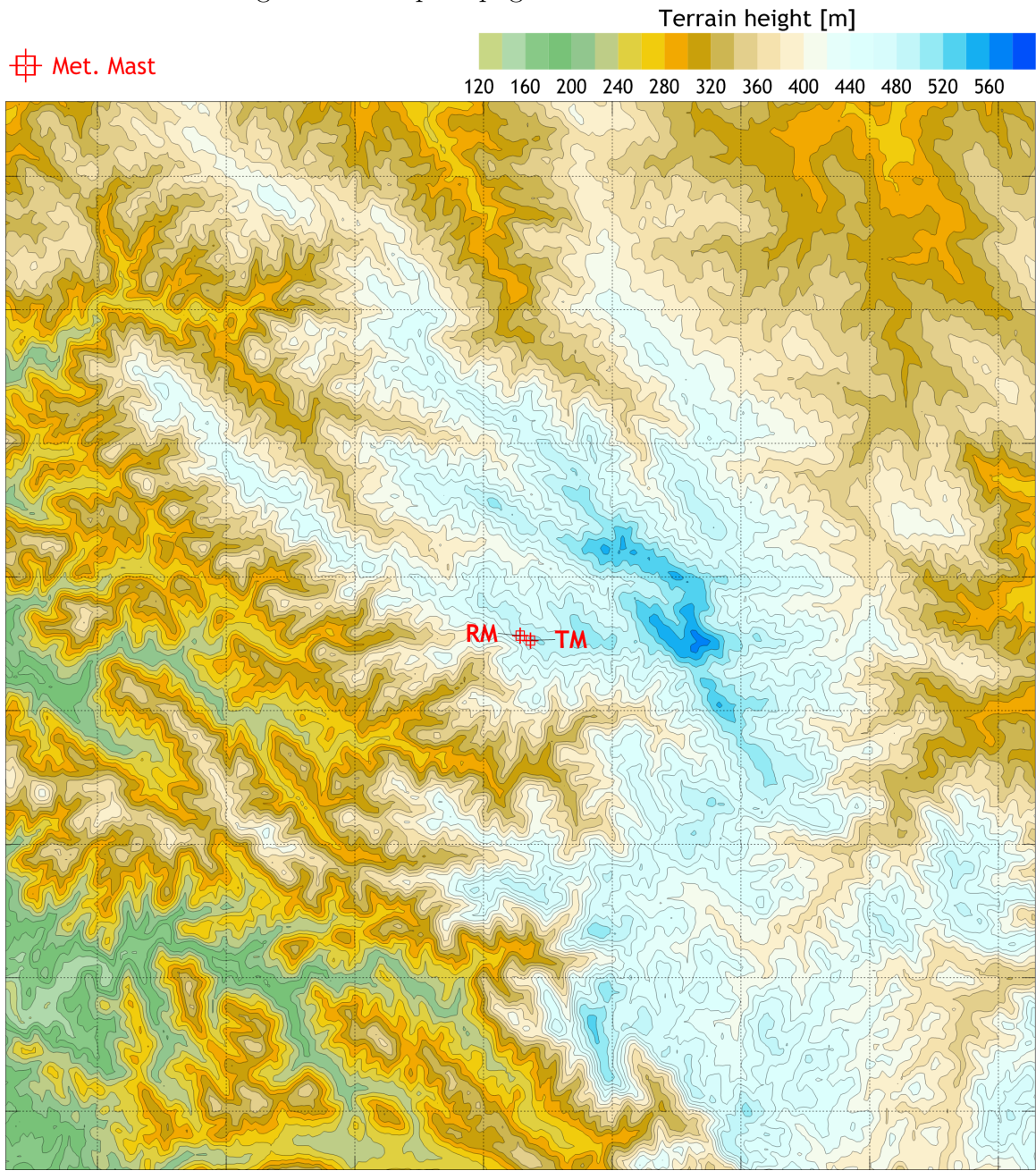


Figura 3.3: Mapa da rugosidade - SRTM

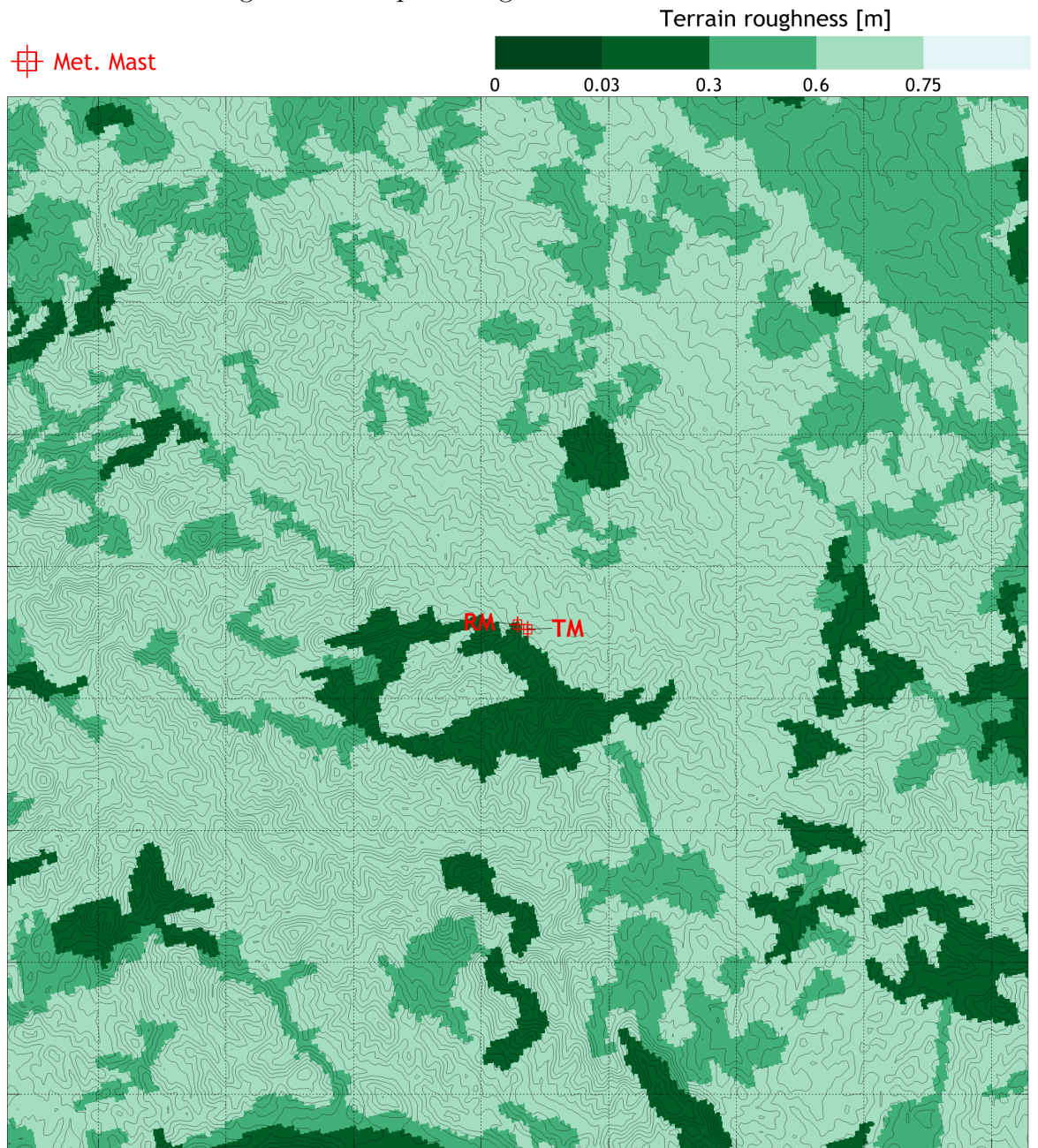
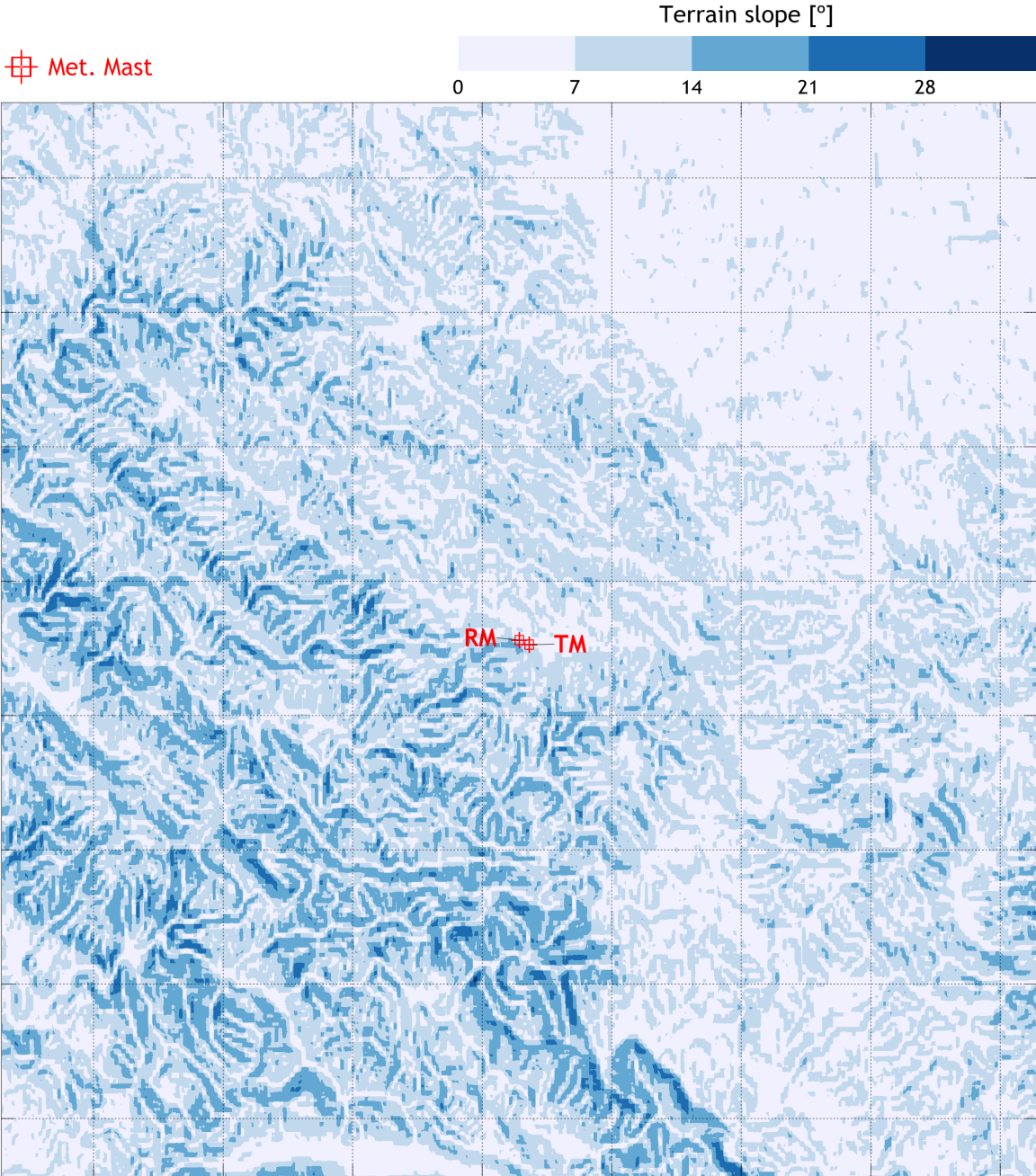


Figura 3.4: Mapa do declive - SRTM



## 3.2 Caracterização do regime do vento

Com o intuito de medir a direção e velocidade do vento foram usados cata-ventos e anemômetros de copos conforme a norma utilizada.

Será pertinente iniciar a análise do regime de vento através da apresentação das medidas das direções do vento. Para isso foram desenvolvidos um conjunto de programas<sup>2</sup> para análise de dados do vento. As figuras deste documento foram produzidas a partir dessas ferramentas desenvolvidas.

Nas seguintes figuras estarão representadas as frequências das direções do vento (figura 3.5); as direções médias de cada hora do período de medição total (figura 3.6) e as direções médias de cada hora para cada mês de medição (figura 3.7).

---

<sup>2</sup>Códigos MATLAB - apêndice A

Figura 3.5: Frequência da direção do vento para os setores de 30 ° (cinzento) e de 10 ° (amarelo)

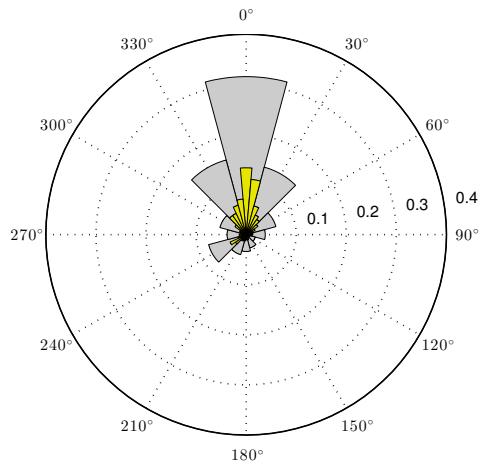


Figura 3.6: Direção média do vento por hora

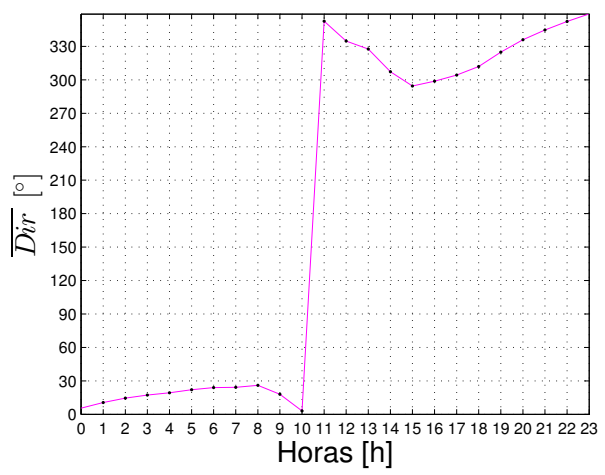
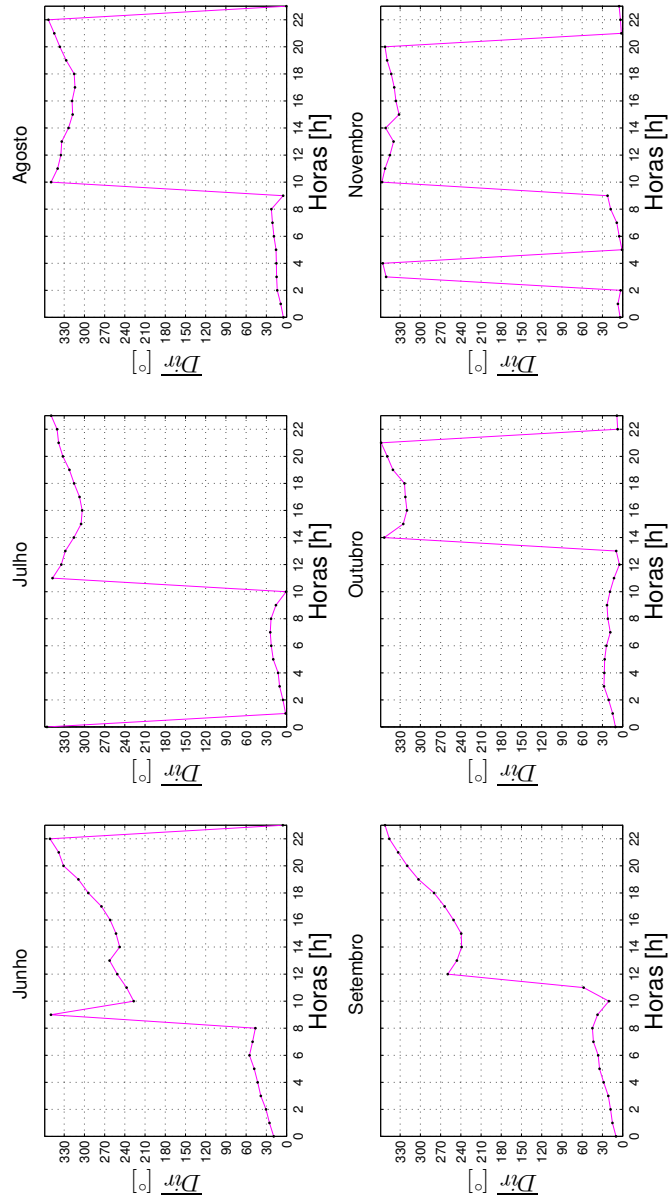


Figura 3.7: Direção média do vento por hora de cada mês



Não é só importante conhecer de onde é que o vento sopra mas também identificar a magnitude da velocidade do vento, pois a energia disponível varia com o cubo da velocidade do vento. Nas figuras que se seguem estão representadas as magnitudes médias das velocidades medidas por setor, velocidades médias por hora e velocidades médias por hora de cada mês.

Figura 3.8: Velocidade média do vento por subsector

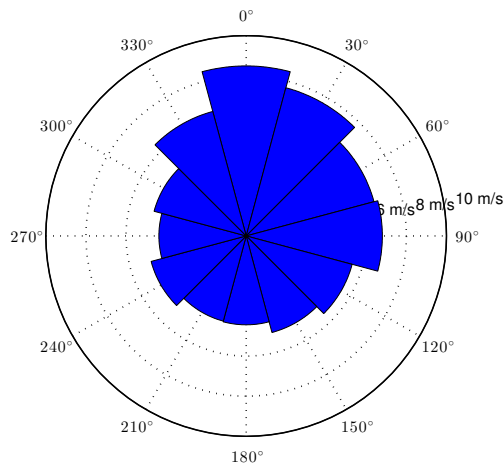


Figura 3.9: Velocidade média do vento por hora

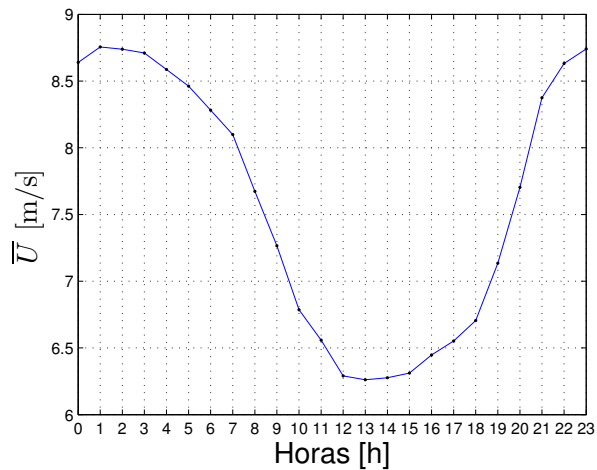
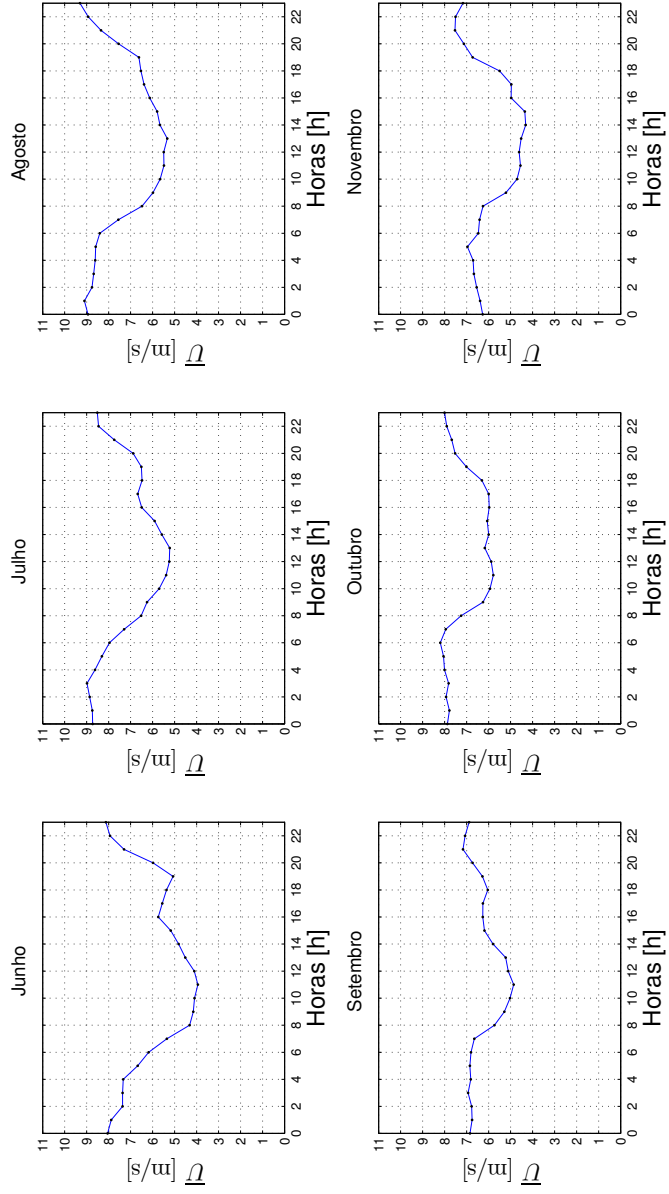


Figura 3.10: Velocidade média do vento por hora de cada mês



Para as velocidades do vento recolhidas será efetuada uma média para cada 10 minutos de medição, realizada continuamente e com uma determinada frequência. Posto isto, à velocidade estarão associadas flutuações da sua magnitude durante esses períodos. De uma forma generalista, a intensidade turbulenta traduz-se nas variações de velocidade durante um determinado período de medição e calcula-se através da razão entre o desvio padrão da velocidade do período de medição e a velocidade média desse mesmo período,

$$IT_{10min} = \frac{\sigma(U_{10min})}{\bar{U}_{10min}} . \quad (3.1)$$

Nas seguintes figuras estão representadas graficamente as intensidades turbulentas médias por subsetor; por gama de velocidades e por hora de cada mês.

Figura 3.11: Intensidade turbulenta média

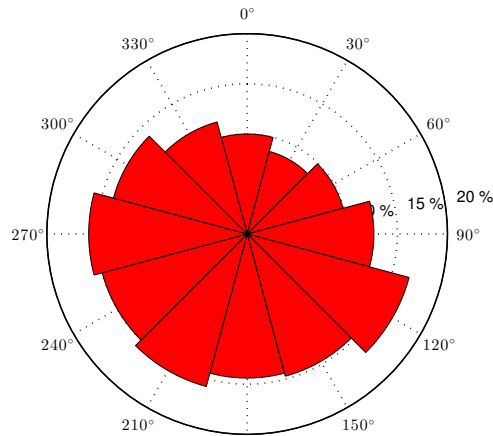


Figura 3.12: Intensidade turbulenta média do vento por hora de cada mês

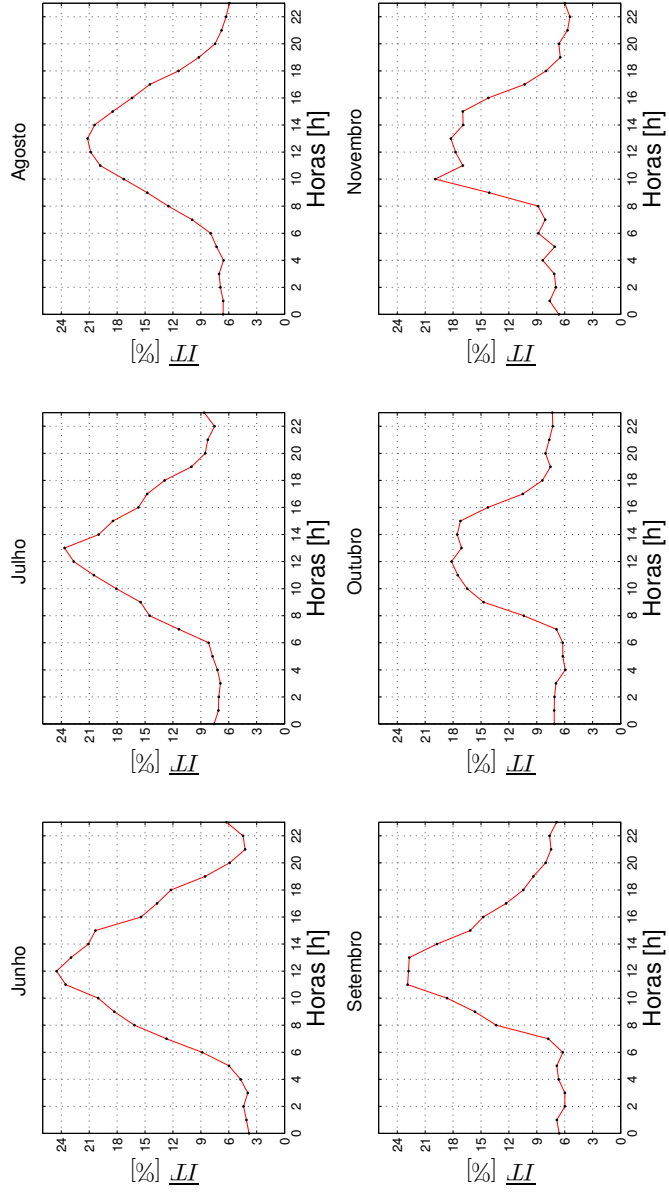
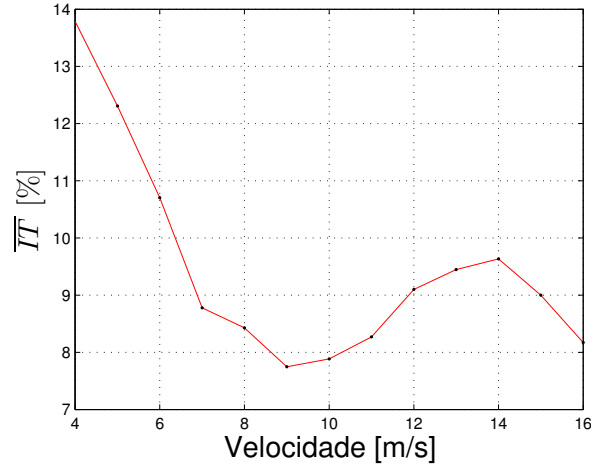


Figura 3.13: Intensidade turbulenta média por gama de velocidade



Depois da apresentação geral das magnitudes das velocidades do escoamento torna-se importante analisar a densidade energética deste. Desta forma, a energia proveniente do vento caracteriza-se através do fluxo potência,

$$FP = \frac{1}{2}\rho U^3 . \quad (3.2)$$

Caracterizando energeticamente o escoamento durante o período de medição, nas seguintes figuras estão representadas graficamente as contribuições energéticas por setor e os fluxos de potência médios por hora de cada mês. A contribuição energética é definida através da seguinte expressão,

$$CE(\%) = \frac{FP_\phi}{FP_{total}} \times 100 , \quad (3.3)$$

em que o fluxo potência de cada subsector de direção do vento é calculado,

$$FP_\phi = \frac{1}{2}\rho \sum U_\phi^3 , \quad (3.4)$$

assumindo que a massa volúmica do ar é constante.

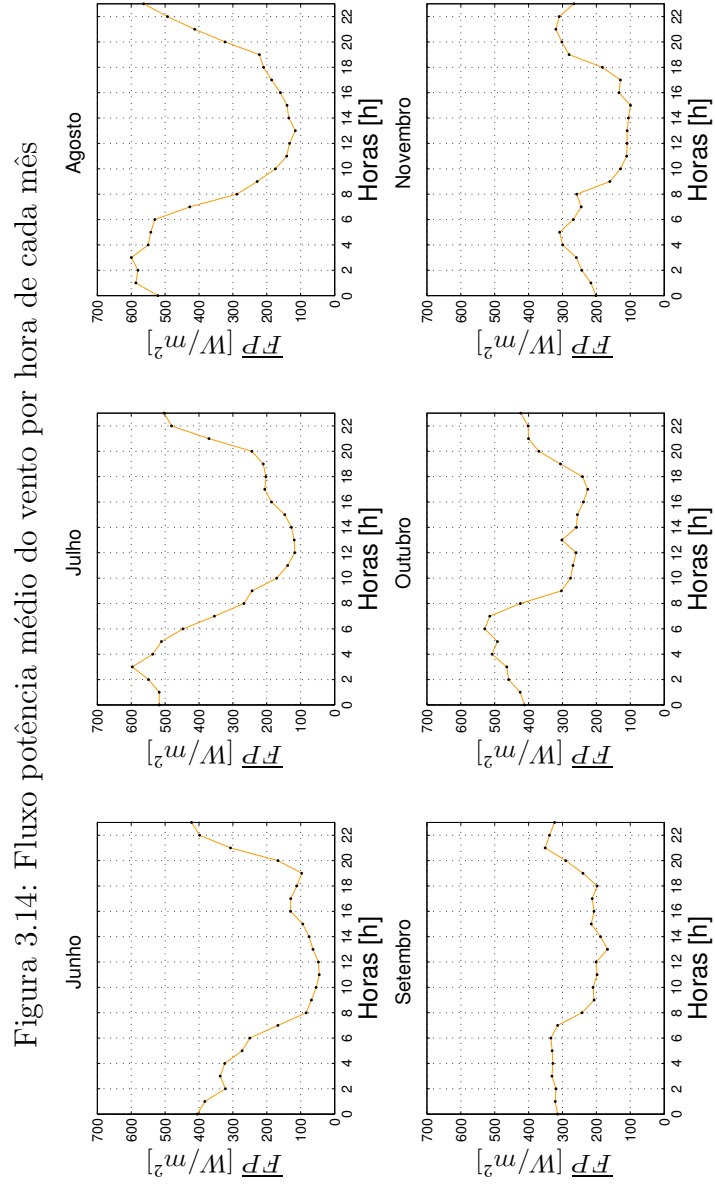
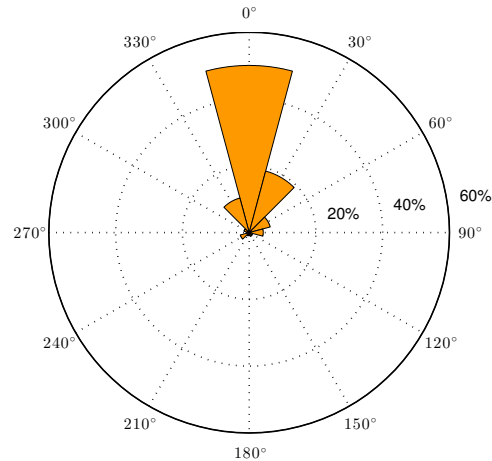


Figura 3.15: Percentagem da contribuição energética



Em suma, o vento norte  $[345^\circ - 15^\circ]$  foi o vento mais predominante durante o período de calibração, representando assim quase 40 % dos dados recolhidos, seguindo-se dos ventos de nor-noroeste  $[315^\circ - 345^\circ]$  e nor-nordeste  $[15^\circ - 45^\circ]$  representando 30 % das medições. As restantes direções representam os remanescentes 30 %.

As magnitudes da velocidade têm um comportamento constante e típico da sua sazonalidade, já que durante os meses de verão, no período diurno (horas em que o local está mais exposto ao sol e a altas temperaturas do ar) as magnitudes apresentam-se menores do que no período noturno. Efetivamente, nas horas de maior exposição ao sol poderão existir movimentos de fluxo verticais (visíveis através de medições de tensão de corte) que justificariam o aumento da intensidade turbulenta durante o período diurno (figura 3.12) associada a um regime mais instável do que à noite.

Neste procedimento não foram efetuadas medições da velocidade vertical do vento e, por consequência, a premissa anterior pode não ser verificada. Por outro lado, as diferenças de temperatura no verão podem aumentar de facto as brisas marítimas e terrestres, o que justifica as figuras 3.10 e 3.14.

### 3.3 Resultados calibração do local

Resumidamente, podemos referir que após o regime de vento das medições realizadas no mastro de referência, será necessário apresentar a quantificação dos efeitos provocados pelo terreno e/ou obstáculos no fluxo entre a posição do mastro de referência e a posição do mastro temporário (turbina de teste).

#### 3.3.1 Setor de medição

Durante a análise dos dados no processo calibração do local, o setor de medição foi definido. Este deve excluir os subsetores nos quais as direções incluam obstáculos significativos; condições topográficas especiais; direções excluídas devido à distância entre os dois mastros, dados anómalos e outros fatores.

Salienta-se que a amplitude de cada subsetor é de  $10^\circ$  exceto no intervalo compreendido entre  $[230^\circ-240^\circ]$ . Confrontando a norma verifica-se que se deve dividir este intervalo em 2 subsetores de  $5^\circ$ , sendo que os FCF's para intervalos  $[220^\circ-230^\circ]$  e  $[230^\circ-240^\circ]$  apresentam diferenças maiores que 2%. Na seguinte tabela estão identificados os intervalos das direções que constituem o setor de medição de acordo com a [IEC \(2011\)](#).

Tabela 3.1: Setor de medição

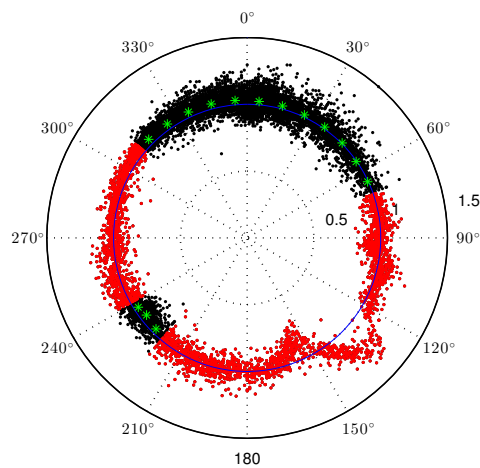
| De [°] | Até [°] | De [°] | Até [°] |
|--------|---------|--------|---------|
| [0     | 10[     | [220   | 230[    |
| [10    | 20[     | [230   | 235[    |
| [20    | 30[     | [235   | 240[    |
| [30    | 40[     | [310   | 320[    |
| [40    | 50[     | [320   | 330[    |
| [50    | 60[     | [330   | 340[    |
| [60    | 70[     | [340   | 350[    |
|        |         | [350   | 360[    |

### 3.3.2 Factores de correção do fluxo

Após a aquisição dos dados das medições das velocidades no mastro de referência e no mastro temporário e aplicados os critérios de rejeição, os dados foram analisados para cada 10 minutos de medição, através do cálculo do rácio entre a velocidade do vento no mastro temporário e a velocidade do vento no mastro de referência.

Na figura 3.16 estão representados os factores de correção de fluxo entre os dois mastros por a direção do vento medida no mastro referência: a preto estão representados os factores de correção de fluxo do setor de medição; a vermelho os factores de correção de fluxo fora do setor de medição e a verde as médias dos factores de correção de fluxo de cada subsetor de medição.

Figura 3.16: Rosa dos factores de correção do fluxo



Os rácios entre as velocidades nos mastros (FCF's) devem ser classificados e analisados para cada subsetor de medição. Na tabela 3.2 está representada a análise dos factores de correção de fluxo calculados para cada subsetor de medição e o grau de correlação entre as velocidades nos mastros.

Tabela 3.2: Análise dos FCF's

| Setor (°)   | FCF médio | FCF mínimo | FCF máximo | Desvio padrão | VQM    | Correlação de Pearson | n° de registos |
|-------------|-----------|------------|------------|---------------|--------|-----------------------|----------------|
| [0 – 10[    | 1.0254    | 0.8133     | 1.2955     | 0.0511        | 1.0267 | 0.9622                | 2985           |
| [10 – 20[   | 1.0219    | 0.8438     | 1.3333     | 0.0518        | 1.0232 | 0.9697                | 1540           |
| [20 – 30[   | 1.0154    | 0.7872     | 1.2712     | 0.0521        | 1.0167 | 0.9742                | 858            |
| [30 – 40[   | 1.0130    | 0.8077     | 1.3415     | 0.0543        | 1.0144 | 0.9815                | 744            |
| [40 – 50[   | 1.0055    | 0.7313     | 1.5000     | 0.0540        | 1.0069 | 0.9792                | 590            |
| [50 – 60[   | 0.9960    | 0.8026     | 1.2273     | 0.0506        | 0.9972 | 0.9826                | 378            |
| [60 – 70[   | 0.9955    | 0.8587     | 1.2195     | 0.0435        | 0.9964 | 0.9906                | 219            |
| [220 – 230[ | 0.9648    | 0.6889     | 1.1364     | 0.0645        | 0.9669 | 0.9511                | 235            |
| [230 – 235[ | 0.9494    | 0.7755     | 1.1042     | 0.0575        | 0.9511 | 0.9559                | 229            |
| [235 – 240[ | 0.9660    | 0.7969     | 1.1463     | 0.0503        | 0.9673 | 0.9670                | 350            |
| [310 – 320[ | 1.0428    | 0.8864     | 1.1750     | 0.0346        | 1.0434 | 0.9773                | 724            |
| [320 – 330[ | 1.0410    | 0.8333     | 1.2439     | 0.0423        | 1.0419 | 0.9680                | 789            |
| [330 – 340[ | 1.0398    | 0.8372     | 1.2222     | 0.0479        | 1.0409 | 0.9662                | 970            |
| [340 – 350[ | 1.0378    | 0.6585     | 1.2449     | 0.0470        | 1.0389 | 0.9752                | 1257           |
| [350 – 360[ | 1.0323    | 0.8429     | 1.2558     | 0.0517        | 1.0336 | 0.9679                | 1696           |

Por forma a detalhar ainda mais os resultados da calibração do local, na seguinte tabela estão identificados os valores médios dos fatores de correção de fluxo de cada subsetor de medição, para intervalos compreendidos de 0,5  $[m/s]$  da velocidade do vento no mastro de referência. Se o conjunto de dados de um determinado subsetor de medição para um certo intervalo de velocidades no mastro de referência for menor que uma hora de medição, então o valor médio dos fatores de correção de fluxo desse conjunto será o valor médio dos fatores de correção de fluxo do subsetor de medição.

Tabela 3.3: FCF's médios de cada subsetor por gama de velocidade

| Velocidade (m/s) | Subsetor de medição [°] |           |           |           |           |           |           |             |
|------------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
|                  | [0 – 10[                | [10 – 20[ | [20 – 30[ | [30 – 40[ | [40 – 50[ | [50 – 60[ | [60 – 70[ | [220 – 230[ |
| [4 – 4.5[        | 1.0266                  | 1.0170    | 1.0123    | 0.9968    | 1.0095    | 0.9868    | 1.0029    | 0.9918      |
| [4.5 – 5[        | 1.0325                  | 1.0332    | 1.0214    | 1.0149    | 1.0010    | 0.9820    | 0.9848    | 0.9507      |
| [5 – 5.5[        | 1.0374                  | 1.0295    | 1.0070    | 1.0087    | 1.0050    | 0.9960    | 0.9850    | 0.9814      |
| [5.5 – 6[        | 1.0307                  | 1.0217    | 1.0215    | 1.0023    | 1.0053    | 1.0064    | 0.9947    | 0.9621      |
| [6 – 6.5[        | 1.0245                  | 1.0265    | 1.0232    | 1.0170    | 1.0033    | 1.0088    | 0.9985    | 0.9450      |
| [6.5 – 7[        | 1.0270                  | 1.0202    | 1.0152    | 1.0079    | 0.9940    | 1.0035    | 0.9803    | 0.9640      |
| [7 – 7.5[        | 1.0257                  | 1.0150    | 1.0100    | 1.0167    | 0.9948    | 0.9848    | 1.0090    | 0.9648      |
| [7.5 – 8[        | 1.0338                  | 1.0186    | 1.0152    | 1.0148    | 1.0123    | 0.9886    | 1.0038    | 0.9568      |
| [8 – 8.5[        | 1.0333                  | 1.0318    | 1.0195    | 1.0181    | 0.9962    | 0.9938    | 0.9955    | 0.9425      |
| [8.5 – 9[        | 1.0308                  | 1.0165    | 1.0100    | 1.0089    | 1.0195    | 1.0017    | 0.9955    | 0.9648      |
| [9 – 9.5[        | 1.0272                  | 1.0244    | 1.0121    | 1.0221    | 1.0162    | 1.0063    | 0.9920    | 0.9643      |
| [9.5 – 10[       | 1.0306                  | 1.0177    | 1.0149    | 1.0129    | 1.0059    | 1.0062    | 0.9955    | 0.9648      |
| [10 – 10.5[      | 1.0307                  | 1.0232    | 1.0133    | 1.0238    | 0.9927    | 1.0005    | 0.9955    | 0.9481      |
| [10.5 – 11[      | 1.0230                  | 1.0203    | 1.0204    | 1.0201    | 0.9960    | 0.9892    | 0.9955    | 0.9283      |
| [11 – 11.5[      | 1.0212                  | 1.0260    | 1.0223    | 1.0168    | 1.0079    | 0.9993    | 0.9955    | 0.9648      |
| [11.5 – 12[      | 1.0069                  | 1.0298    | 1.0104    | 1.0168    | 1.0127    | 0.9973    | 1.0172    | 0.9648      |
| [12 – 12.5[      | 1.0201                  | 1.0156    | 0.9939    | 0.9995    | 1.0222    | 1.0071    | 0.9955    | 0.9648      |
| [12.5 – 13[      | 1.0085                  | 1.0202    | 1.0221    | 0.9983    | 1.0183    | 0.9960    | 0.9955    | 0.9648      |
| [13 – 13.5[      | 1.0045                  | 1.0228    | 1.0291    | 1.0179    | 1.0163    | 0.9978    | 0.9955    | 0.9648      |
| [13.5 – 14[      | 1.0118                  | 0.9871    | 1.0348    | 1.0101    | 1.0105    | 0.9960    | 0.9955    | 0.9648      |
| [14 – 14.5[      | 1.0021                  | 1.0052    | 1.0154    | 1.0130    | 1.0055    | 0.9960    | 1.0000    | 0.9648      |
| [14.5 – 15[      | 0.9987                  | 1.0219    | 1.0154    | 1.0130    | 1.0055    | 0.9960    | 0.9955    | 0.9648      |
| [15 – 15.5[      | 0.9880                  | 1.0219    | 1.0154    | 1.0396    | 1.0055    | 0.9960    | 0.9955    | 0.9648      |
| [15.5 – 16[      | 0.9906                  | 1.0219    | 1.0154    | 1.0453    | 1.0055    | 0.9960    | 0.9955    | 0.9648      |
| 16               | 1.0254                  | 1.0219    | 1.0154    | 1.0130    | 1.0055    | 0.9960    | 0.9955    | 0.9648      |

| Velocidade (m/s) | Subsetor de medição [°] |             |             |             |             |             |             |  |
|------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|                  | [230 – 235[             | [235 – 240[ | [310 – 320[ | [320 – 330[ | [330 – 340[ | [340 – 350[ | [350 – 360[ |  |
| [4 – 4.5[        | 0.9794                  | 0.9967      | 1.0386      | 1.0123      | 1.0429      | 1.0347      | 1.0346      |  |
| [4.5 – 5[        | 0.9702                  | 0.9766      | 1.0441      | 1.0435      | 1.0381      | 1.0397      | 1.0367      |  |
| [5 – 5.5[        | 0.9520                  | 0.9727      | 1.0438      | 1.0439      | 1.0422      | 1.0352      | 1.0362      |  |
| [5.5 – 6[        | 0.9562                  | 0.9740      | 1.0347      | 1.0370      | 1.0345      | 1.0373      | 1.0470      |  |
| [6 – 6.5[        | 0.9385                  | 0.9521      | 1.0492      | 1.0420      | 1.0421      | 1.0486      | 1.0565      |  |
| [6.5 – 7[        | 0.9318                  | 0.9428      | 1.0377      | 1.0453      | 1.0455      | 1.0543      | 1.0460      |  |
| [7 – 7.5[        | 0.9254                  | 0.9591      | 1.0486      | 1.0482      | 1.0400      | 1.0360      | 1.0379      |  |
| [7.5 – 8[        | 0.9494                  | 0.9391      | 1.0408      | 1.0431      | 1.0419      | 1.0422      | 1.0392      |  |
| [8 – 8.5[        | 0.9295                  | 0.9712      | 1.0434      | 1.0398      | 1.0319      | 1.0347      | 1.0332      |  |
| [8.5 – 9[        | 0.9037                  | 0.9660      | 1.0434      | 1.0483      | 1.0384      | 1.0380      | 1.0338      |  |
| [9 – 9.5[        | 0.9545                  | 0.9462      | 1.0428      | 1.0308      | 1.0374      | 1.0301      | 1.0317      |  |
| [9.5 – 10[       | 0.9213                  | 0.9260      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0376      | 1.0307      | 1.0221      |  |
| [10 – 10.5[      | 0.9494                  | 0.9280      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0289      | 1.0353      | 1.0267      |  |
| [10.5 – 11[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0295      | 1.0180      |  |
| [11 – 11.5[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0199      | 1.0211      |  |
| [11.5 – 12[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0313      | 1.0181      |  |
| [12 – 12.5[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0367      | 1.0040      |  |
| [12.5 – 13[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0135      |  |
| [13 – 13.5[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0179      |  |
| [13.5 – 14[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0389      |  |
| [14 – 14.5[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0060      |  |
| [14.5 – 15[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0323      |  |
| [15 – 15.5[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0323      |  |
| [15.5 – 16[      | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0323      |  |
| 16               | 0.9494                  | 0.9660      | 1.0428      | 1.0410      | 1.0398      | 1.0378      | 1.0323      |  |



# Capítulo 4

## Modelação numérica

Neste capítulo estão descritos, numa visão geral, os modelos de mesoescala e microescala assim com as metodologias numéricas e as opções de maior relevo utilizadas nas simulações (nos apêndices B e C constam todas as opções utilizadas nos dois modelos).

### 4.1 Modelo de mesoescala - WRF

#### 4.1.1 Descrição geral do modelo WRF

Como foi abordado anteriormente (confrontar secção 2.2.1), o WRF é um sistema de modelação numérica para a previsão do tempo, sendo que é utilizado tanto para a operacionalidade dos centros meteorológicos como para pesquisas atmosféricas. Este modelo foi concebido para ser uma ferramenta de topo da simulação atmosférica, é flexível, portátil e eficiente nas mais variadas plataformas computacionais sendo ainda um sistema de domínio público e está disponibilizado gratuitamente.

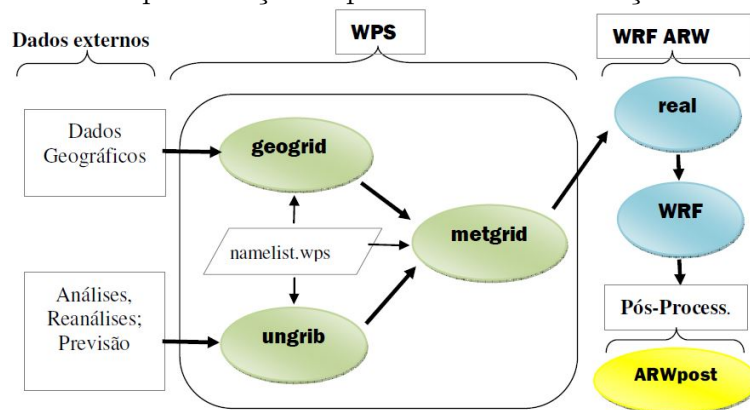
O modelo pode ser utilizado para situações atmosféricas idealizadas ou para situações reais, em escalas horizontais que vão desde metros até dezenas de quilómetros. Desta forma, é um modelo que analisa áreas limitadas, no entanto, em situações atmosféricas reais necessita de condições de fronteira laterais e de topo que representem, dentro do possível, o estado real da atmosfera circundante ao longo do tempo de integração das equações dinâmicas. Estas condições são fornecidas por um modelo de previsão numérica do tempo em escala global. As condições de fronteira do solo (topografia, cobertura

do terreno, etc.) são retiradas de modelos digitais, Corine Land Cover ou USGS e de modelos de elevação do terreno digitais como GTOPO30 e SRTM.

A modelação do sistema do WRF (figura 4.1) está dividida nos seguintes processos:

- Pré-processamento: WRF Preprocessing System (WPS) consiste num conjunto de três subsistemas que preparam os dados de entrada para a simulação através do `geogrid`, `ungrib` e `metgrid`. O `geogrid` define o domínio do modelo e interpola os dados terrestres para as malhas. O `ungrib` extrai os campos meteorológicos para o formato grib, necessários para iniciar o modelo. O `metgrid` interpola horizontalmente os campos meteorológicos e os campos extraídos pelo `ungrib` para as malhas do modelo. Por fim o `real` interpola verticalmente os campos do WRF.
- Processamento: WRF lança a simulação para o tempo pretendido.
- Pós-processamento: o `ARWpost` é usado para converter os resultados obtidos pelo modelo num formato que possa ser visualizado em aplicações gráficas.

Figura 4.1: Representação esquemática da modelação do sistema

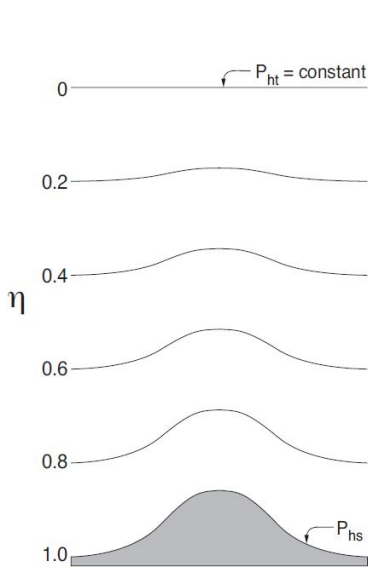
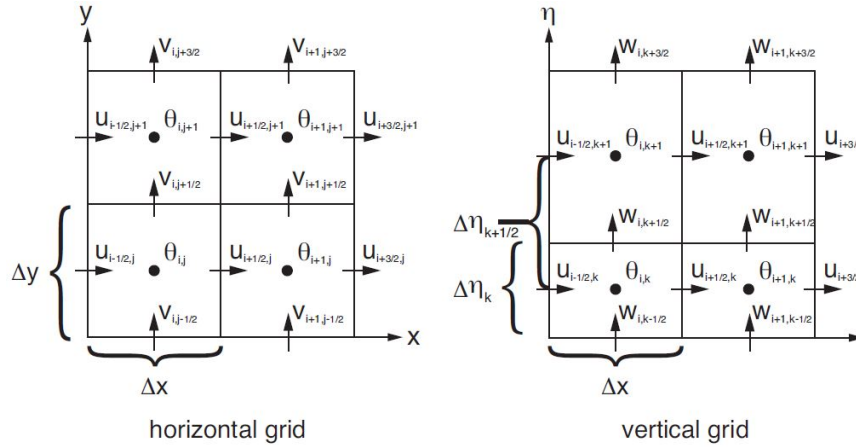


### 4.1.2 Técnicas utilizadas pelo modelo

#### Domínios e malhas de simulação

Segundo [Skamarock \*et al.\* \(2005\)](#), os domínios gerados neste modelo são os espaços físicos representados através de malhas tridimensionais no espaço de cálculo. A discretização espacial é realizada através de malhas desfazadas no espaço do tipo Arakawa C (figura 4.2). As componentes do vento são definidas nas faces dos volumes de controlo e as variáveis de massa são definidas no centro destes. Os espaçamentos horizontais da malha ( $\Delta x = \Delta y$ ) assim como o número de nós são definidos explicitamente pelo utilizador.

Figura 4.2: Malha de cálculo - [ARW \(2013\)](#)



Os níveis verticais da malha de cálculo são valores da coordenada  $\eta$  (figura 4.3) definida em relação à componente hidrostática de pressão. Junto ao solo, as superfícies coordenadas seguem o declive do terreno. As coordenadas são definidas como:

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{P_{hs} - P_{ht}}, \quad (4.1)$$

onde  $P_{hs}$  é a pressão hidrostática na superfície e  $P_{ht}$  é a pressão hidrostática no topo do domínio.

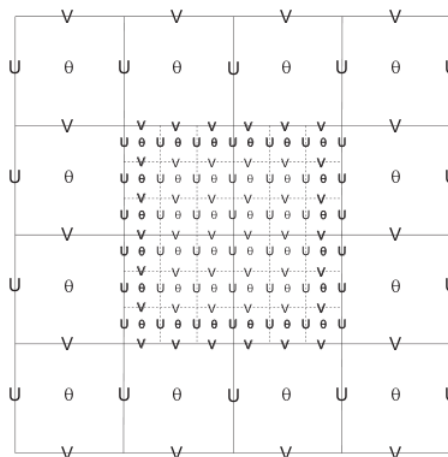
Figura 4.3: Níveis verticais da malha - [ARW \(2013\)](#)

## Nesting

O WRF utiliza uma técnica descrita em [Skamarock \*et al.\* \(2005\)](#) denominada por “Nesting”, sendo que nesta se aninha um domínio mais pequeno com uma malha mais fina no interior de um domínio maior com uma malha mais larga. Assim, o domínio aninhado é controlado nas suas fronteiras laterais pelo domínio “pai”. O incremento temporal de integração é normalmente reduzido pela proporção entre os espaços da malha grossa e da malha fina. Esta técnica, sucintamente, passa a informação meteorológica calculada em malhas provenientes de modelos globais (NCEP’s NAM ou GFS), com aproximadamente 100 quilómetros, para malhas do WRF. Se esta transição ocorresse para uma malha WRF de 3 quilómetros, por exemplo, então a diferença de escalas seria exagerada, logo poderia introduzir erros que o “Nesting” procura minimizar através de um “downscaling” gradual. Então uma simulação realizada apenas com um domínio de alta resolução encostado à malha do modelo global, teria uma definição espacial e temporal das condições de fronteira mais pobre e menos fidedigna. Por último destaca-se que um domínio pode ter mais que um subdomínio.

Na figura 4.4 está ilustrado um possível tipo de “Nesting”.

Figura 4.4: “Nesting” - [ARW \(2013\)](#)



### 4.1.3 Opções utilizadas na simulação

Neste estudo a versão utilizada foi a 3.1.1 do Weather Research and Forecasting Model with Advanced Research WRF solver (WRF-ARW). Os dados utilizados sobre a topografia, cobertura da terra e albedo foram retirados do modelo WRF e foram fornecidos pelos conjuntos de dados GTOPO30, disponibilizados pelo Serviço Geológico dos EUA<sup>1</sup>. O solver WRF-ARW foi definido pela utilização da compilação real, as condições de fronteira que alimentam este código foram retiradas do modelo troposférico de análises globais, NCEP FNL<sup>2</sup>. A malha do WRF utilizada para acoplamento da simulação do WINDIE<sup>TM</sup> tem como configuração 67 pontos em X e Y e 31 pontos em Z e a malha com uma altura máxima para uma pressão de 5000 Pa, os volumes de controlo têm o tamanho de 3000 m em X e Y. A configuração WRF-ARW foi estabelecida na utilização do esquema de microfísica 6ª classe WRF Single Moment, esquema numérico Yonsei University da camada limite planetária e a opção de difusão completa com o modelo de turbulência TKE 1.5.

---

<sup>1</sup>[www.usgs.gov](http://www.usgs.gov)

<sup>2</sup>CISL Research Data Archive - [rda.ucar.edu](http://rda.ucar.edu)

## 4.2 Modelo de microescala - WINDIE<sup>TM</sup>

### 4.2.1 Modelo matemático

De acordo com [Castro \*et al.\* \(2010\)](#), o WINDIE<sup>TM</sup> usa as equações de Navier-Stokes médias de Reynolds com aproximação de Boussinesq para a dinâmica dos fluídos. Encontram-se escritas em notação tensorial para um sistema de coordenadas genéricas as equações de continuidade, de movimento e de energia sendo elas,

$$\frac{\partial(\rho U_j \beta_k^j)}{\partial \xi^i} = 0, \quad (4.2)$$

$$J\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial \xi^j} (U_k U_i \beta_k^j) = -\frac{\partial}{\partial \xi^j} (p' \beta_i^j) + \frac{\partial}{\partial \xi^j} [\sigma_{ki} \beta_k^j] + Jf \epsilon_{ij3} U_j - Jp' g \delta_{i3}, \quad (4.3)$$

$$J\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial \xi_j} (U_k \theta \beta_k^j) = \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left[ \frac{1}{J} \frac{\mu_t}{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial \xi^m} \beta_k^m \beta_k^j \right], \quad (4.4)$$

respectivamente, com,

$$\sigma_{ij} = -\frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} + \frac{\mu_t}{J} \left( \frac{\partial U_i}{\partial \xi^m} \beta_j^m + \frac{\partial U_j}{\partial \xi^m} \beta_i^m \right), \quad (4.5)$$

O modelo de turbulência avaliado foi o TKE 1.5, a equação de transporte para a energia cinética turbulenta ( $\kappa$ ) seguindo o sistema de coordenadas genéricas é,

$$J\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial \xi^j} (U_k \kappa \beta_k^j) = \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left[ \frac{1}{J} \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \kappa}{\partial \xi^m} \beta_k^m \beta_k^j \right] + J(P_k + S_k - \rho \epsilon), \quad (4.6)$$

onde  $\epsilon$  representa a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta,  $\sigma_k$  é uma constante do modelo e

$$P_k = \sigma_{ij} \frac{1}{J} \frac{\partial U_i}{\partial \xi^m} \beta_m^j, S_k = -\frac{1}{J} \frac{g \mu_t}{\theta_0 Pr} \frac{\partial \theta}{\partial \xi^m} \beta_m^3 \quad (4.7)$$

apresenta-se como a produção e destruição de energia cinética turbulenta em termos de fontes mecânicas e térmicas. A temperatura potencial é denotada

por  $\theta_0$ , enquanto o 0 representa um estado de referência termodinâmico. No caso de um modelo de TKE 1.5,  $\epsilon$  estima-se,

$$\epsilon = \frac{Ck^{3/2}}{l} \quad (4.8)$$

onde,

$$C = 1.9C_k + \frac{0.93 - 1.9C_k}{\Delta s} l, \quad (4.9)$$

em que  $C_k$  é uma constante modelo,  $\Delta s = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$  e o comprimento característico é

$$l = \begin{cases} \min[\Delta s, 0.76\sqrt{k}/N], & N^2 > 0 \\ \Delta s, & N^2 < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

onde a frequência de Brunt-Väisälä,  $N$ , é

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}. \quad (4.11)$$

A viscosidade turbulenta é obtida a partir de

$$\mu_t = \rho C_k l \sqrt{k}. \quad (4.12)$$

O acoplamento entre a pressão e a velocidade é resolvido através do algoritmo SIMPLE como descrito em [Ferziger & Perić \(2002\)](#). Este pode ser resumido da seguinte forma:

1. iniciar os cálculos dos campos para o tempo seguinte,  $t^{n+1}$  usando a solução anterior  $u_i^n$  e  $p_i^n$  como estimativas iniciais para  $u_i^{n+1}$  e  $p_i^{n+1}$ ;
2. reunir e resolver o sistema linear de equações algébricas para as componentes das velocidades (equação de quantidade de movimento) para obter o  $u_i^{m*}$ ;
3. reunir e resolver a equação de correção da pressão para obter o  $p'$ ;
4. corrigir as velocidades e pressões para obter o campo de velocidade  $U_i^n$ , que satisfaça a equação da continuidade e a nova pressão  $p^n$ ;
5. voltar ao passo 2 e repetir os procedimentos, usando  $u_i^n$  e  $p^n$  como estimativas melhoradas para  $u_i^n$  e  $p_i^n$  até que os valores das correções sejam menores ou iguais aos valores atribuídos nos critérios de convergência;

6. confirmando-se o critério de convergência, avançar para o próximo tempo de cálculo.

### 4.2.2 Condições de fronteiras

Confrontando [Castro \*et al.\* \(2010\)](#), o primeiro nó da malha acima do limite inferior encontra-se dentro da camada superficial, permitindo a utilização de condições de fronteira que sigam a teoria de Monin-Obukov. As equações de movimento são modificadas para incluir uma tensão de corte de Reynolds do limite inferior do domínio, seguindo a seguinte relação,

$$\frac{\tau_{wall}}{\rho} \equiv u_*^2 = k^{1/2} C_\mu^{1/4} \frac{U_\parallel \kappa}{\ln(1 + z/z_0) + \psi_m}, \quad (4.13)$$

em que o  $z$  é altura acima do nível do solo do centro do volume de controlo,  $z_0$  é a característica da rugosidade, o  $U_\parallel$  é a velocidade paralela à fronteira na altura  $z$ , o  $\kappa$  é a constante de von Kármán ( $\kappa = 0,4$ ) e o  $\psi_m$  é a correção Businger-Dyer diabática para um impulso, sendo que é calculada da seguinte forma,

$$\psi_m = \begin{cases} 4, 7 \frac{z}{L}, & L \geq 0, \\ -2 \log(\frac{1}{2}(1 + \zeta)) - \log(\frac{1}{2}(1 + \zeta^2)) + 2 \arctan(\zeta) - \frac{\pi}{2}, & L < 0, \end{cases} \quad (4.14)$$

com  $\zeta = (1 - 15 \frac{z}{L})^{1/4}$ , resultante da integração das funções do impulso de Businger-Dyer,

$$\phi_m = \begin{cases} 1 + 4, 7 \frac{z}{L}, & L \geq 0 \\ (1 - 15 \frac{z}{L})^{-1/4}, & L < 0. \end{cases} \quad (4.15)$$

O comprimento de Monin-Obukov,  $L$ , é definido,

$$L = -\frac{u_*^3 \theta}{g \kappa (\overline{w'\theta'})_0}, \quad (4.16)$$

onde  $(\overline{w'\theta'})_0$  representa o fluxo de calor turbulento no solo.

Para o modelo de turbulência TKE 1.5, como não existe o  $C_\mu$  como parâmetro, a tensão de corte de Reynolds é calculada usando a equação 4.13 assumindo  $C_\mu^{1/2} = 0,003^{1/2}$ .

O fluxo de calor turbulento no solo é obtido a partir dos resultados da simulação WRF e está disponível para uma quantidade variável de tempo. O

fluxo é interpolado linearmente no espaço, para as posições da malha sendo depois interpolado no tempo, com intervalos de 20 minutos entre duas saídas de resultados WRF consecutivas.

A tensão de corte de Reynolds é considerada quase constante ( $\tau \simeq \tau_{wall} \equiv \rho u_*^2$ ) e a taxa dissipação de energia cinética ( $\epsilon$ ) para este comportamento padrão é aproximadamente,

$$\epsilon = u_*^3 \left( \frac{\phi_m}{\kappa z} - \frac{1}{zL} \right). \quad (4.17)$$

As condições de fronteira laterais e de topo do domínio foram obtidas a partir dos resultados do WRF, através de interpolações trilineares no espaço e interpolações lineares no tempo com intervalos de 20 minutos entre duas saídas de resultados WRF consecutivos.

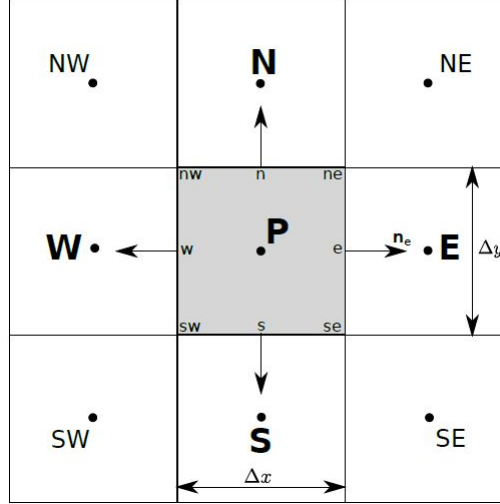
As quantidades interpoladas foram a velocidade ( $u_i$ ); a temperatura potencial ( $\theta$ ); a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e o estado de referência da massa volúmica ( $\rho$ ).

Como a descrição da topografia utilizada nas simulações WRF não necessita de ser a mesma do WINDIE<sup>TM</sup>, foi adotado um procedimento para forçar a topografia WRF nos limites laterais da malha WINDIE<sup>TM</sup> e promover uma transição suave para a topografia WINDIE<sup>TM</sup> dentro de uma camada específica (Eidsvik *et al.*, 2004).

### 4.2.3 Esquemas convectivos

Nos centros dos volumes de controlo, como é exemplo o ponto P da figura 4.5, são armazenados os valores das variáveis de cálculo e recorre-se a esquemas interpoladores para obter quantidades nas faces dos volumes de controlo a partir dos valores nodais. Estes valores são necessários para calcular os fluxos que atravessam as faces dos volumes de controlo, resultantes dos integrais de superfície. Neste trabalho os esquemas convectivos utilizados no modelo WINDIE<sup>TM</sup> foram UPWIND e 4ª ordem.

Figura 4.5: Volume de Controlo 2D



### UPWIND

De acordo com [Ferziger & Perić \(2002\)](#), o UPWIND é um esquema interpolador não centrado no espaço e no qual se fornece mais peso aos nós que se encontram a montante do ponto de interpolação. Simplificadamente este é obtido, como exemplo para  $\phi_e$ ,

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{if } (v \cdot n)_e > 0; \\ \phi_E & \text{if } (v \cdot n)_e < 0; \end{cases} \quad (4.18)$$

Este esquema possui excelentes características de estabilidade, não originando soluções oscilantes. Contudo, este introduz difusão numérica. Este efeito pode ser facilmente verificado recorrendo a uma série de Taylor para obter  $\phi_e$ , a partir da informação P, sendo na forma,

$$\phi_e = \phi_P + (x_e - x_P) \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P + \frac{(x_e - x_P)^2}{2} \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \right) + \mathcal{H}. \quad (4.19)$$

Em que a difusão numérica é associada ao processo físico difuso,

$$\Gamma \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P \approx (x_e - x_P) \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P, \quad (4.20)$$

posto isto o modo de diminuir a difusividade numérica é utilizar malhas mais finas.

#### 4<sup>a</sup> ordem

Este esquema foi desenvolvido na dissertação de [Castro \(1997\)](#) em que se interpola a partir de um polinómio de Lagrange, mantendo a estratégia de enfatizar os nós que se encontram a montante do ponto de interpolação. Desta forma são utilizados 3 nós a montante e 1 nó a jusante, perante isto, trata-se de um polinómio de grau 3 e é do tipo,

$$\phi_e = c_0\phi_{WW} + c_1\phi_w + c_2\phi_P + c_3\phi_E , \quad (4.21)$$

em que  $c_1, c_2, c_3$  e  $c_4$  são os polinómios auxiliares do terceiro grau.

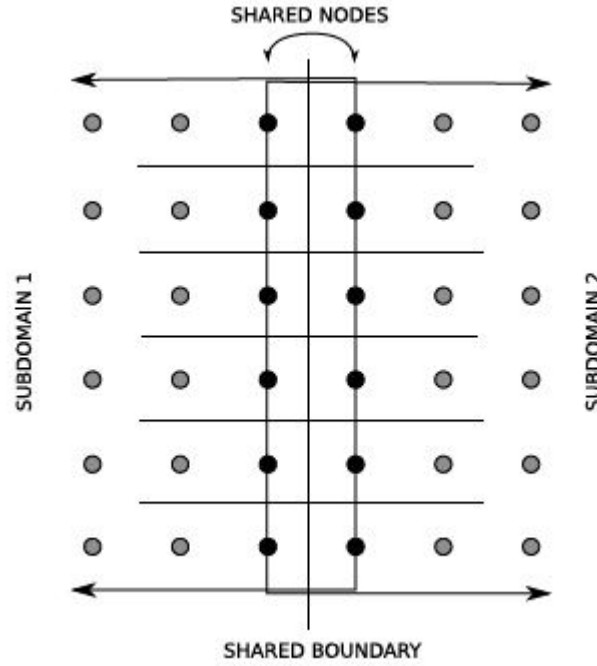
#### 4.2.4 Técnica de Paralelização

O código é paralelizado usando uma estratégia de decomposição do domínio. Assim sendo o domínio físico, discretizado por uma malha de volumes de controlo com nós centrais, é decomposto em vários subdomínios.

Dentro de cada subdomínio, o código funciona de uma forma sequencial possibilitando que existam trocas de informação de fronteira com os subdomínios vizinhos. Esta decomposição física é realizada com sobreposição fixa de dois nós da malha, como se pode verificar na figura 4.6.

O cálculo para cada subdomínio é iniciado através de campos iniciais, concluída essa interação ocorrem trocas de informações entre subdomínios vizinhos com o propósito de obter condições de fronteira de cada subdomínio para a próxima interação. Esta técnica encontra-se descrita em [Castro \*et al.\* \(2008\)](#).

Figura 4.6: Representação dos subdomínios sobrepostos



### 4.2.5 Critérios de estabilidade

A estabilidade e convergência do algoritmo é obtida através de um incremento de tempo suficientemente pequeno que respeite a condição CFL.

#### Condição CFL (Courant-Friedrichs-Lewy)

Segundo [LeVeque \(1992\)](#), a condição de CFL exige que a distância percorrida durante um intervalo de tempo deverá ser menor que um volume de controlo, ou seja,

$$|u_i|\Delta t \leq \Delta x_i. \quad (4.22)$$

O número de Courant é definido através da razão entre a distância percorrida e o tamanho de um volume de controlo,

$$Co = \frac{|u_i|\Delta t}{\Delta x_i}, \quad (4.23)$$

em que este, como referido na eq. 4.23, não pode ultrapassar a unidade. A condição CFL define-se como um parâmetro numérico constante que modifica a magnitude local do número de Courant através do incremento de tempo.

$$\text{CFL} = \frac{\Delta t}{\Delta t|_{Co=1}}, \quad (4.24)$$

em que o CFL representa a razão entre o incremento de tempo de cálculo e o incremento de tempo para o número de Courant igual à unidade. Se o incremento de tempo de cálculo for superior ao incremento de tempo para o número de Courant igual à unidade, então, o modelo de cálculo cria instabilidade numérica.

### 4.2.6 Metodologias numéricas

Durante este trabalho foram testadas diferentes configurações para as simulações, estas foram realizadas em regime transiente, como fora verificado na secção 2.2.2, e com uma malha temporal constante ( $\Delta t = 1$ ).

O mapa orográfico foi obtido através de um modelo digital de elevação, que se baseia num mapa de contorno IGeoE<sup>3</sup> com uma resolução de 10 metros a partir do qual foi rasterizado e criado com uma resolução regular de 10 metros. Similarmente o mapa da rugosidade com 10 metros de resolução foi obtido a partir da base de dados Corine Land Cover 2006<sup>4</sup>.

As condições fronteira, campos de velocidade e energia cinética turbulenta, foram extraídas do modelo WRF-ARW e geradas para cada vinte minutos de simulação WINDIE<sup>TM</sup> como referido anteriormente.

Na tabela 4.1 estão identificadas as malhas assim como os esquemas convectivos testados. As restantes opções que foram utilizadas no modelo WINDIE<sup>TM</sup> e que se mantiveram constantes para a totalidade das simulações encontram-se no apêndice C.

As simulações que constam da tabela 4.1 cobrem um período de 8 dias da calibração do local, pois devido ao tempo extensivo de computação que o código CFD requer e à falta de recursos computacionais, foi necessário escolher uma semana para simular e avaliar o modelo. A escolha incidiu na primeira semana de agosto, isto porque durante o período de calibração do

<sup>3</sup>Instituto Geográfico do Exército - [www.igeoe.pt](http://www.igeoe.pt)

<sup>4</sup>Instituto Geográfico Português - [www.igeo.pt](http://www.igeo.pt)

local (20 de junho a 11 de novembro) os meses de verão são os períodos onde existem mais variação de velocidades entre o ciclo diurno e noturno. Assim, analisando um destes períodos, pode-se identificar se o modelo consegue ou não capturar os feitos térmicos durante o ciclo diurno.

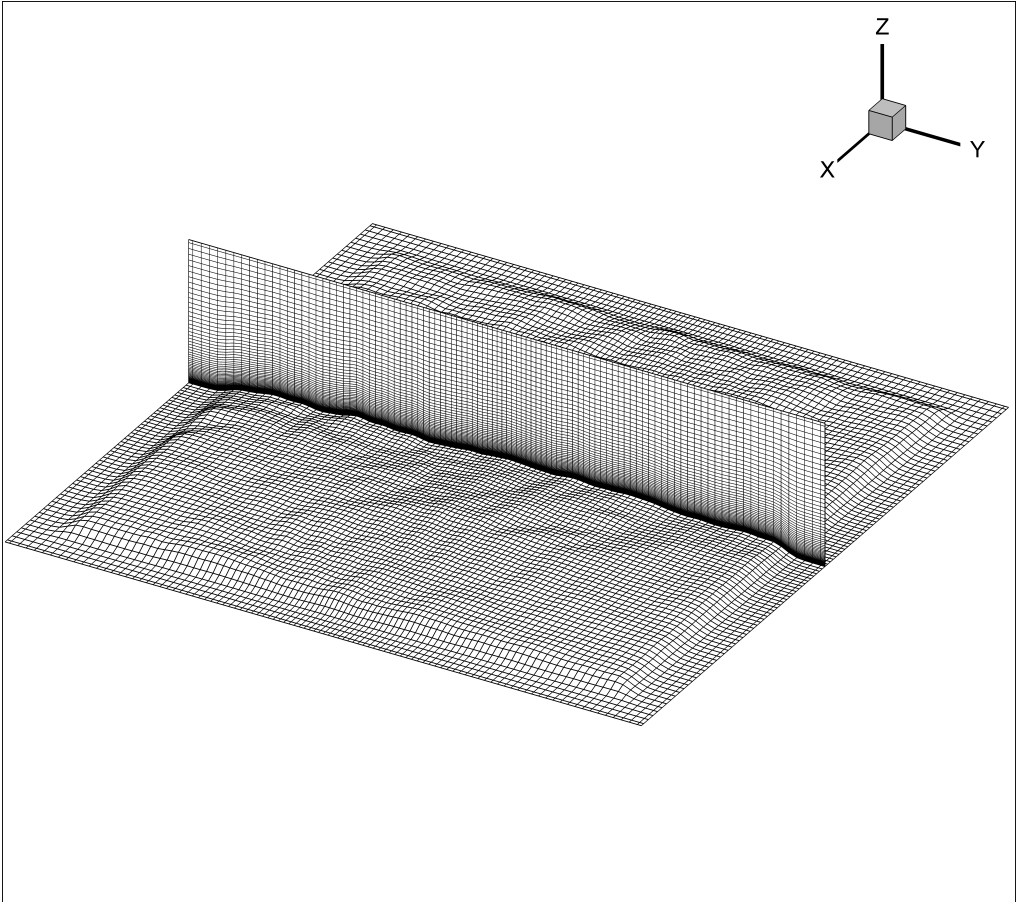
Tabela 4.1: Configurações das simulações

| Sim. | Nós da malha | $N_j \times N_j \times N_k$ | $\Delta Z_{min}$ [m] | $\Delta X_{min}/\Delta Y_{min}$ [m] | Esquema convectivo | Tamanho [ $m^2$ ] | CPU [h]       |
|------|--------------|-----------------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| 1    | 158661       | $51 \times 51 \times 61$    | 5.0                  | 300                                 | $4^{th}$           | 20000             | 36            |
| 2    | 158661       | $51 \times 51 \times 61$    | 5.0                  | 150                                 | $4^{th}$           | 20000             | 43            |
| 3    | 634644       | $102 \times 102 \times 61$  | 5.0                  | 150                                 | $4^{th}$           | 20000             | 181           |
| 4    | 158661       | $51 \times 51 \times 61$    | 5.0                  | 300                                 | Upwind             | 20000             | 32            |
| 5    | 298900       | $70 \times 70 \times 61$    | 6.0                  | 100                                 | Upwind             | 10000             | 96            |
| 6    | 390400       | $80 \times 80 \times 61$    | 6.0                  | 75                                  | Upwind             | 10000             | 105           |
| 7    | 634644       | $102 \times 102 \times 61$  | 5.0                  | 50                                  | $4^{th}$           | 10000             | não convergiu |
| 8    | 390400       | $80 \times 80 \times 61$    | 6.0                  | 75                                  | $4^{th}$           | 10000             | não convergiu |

Anteriormente à realização das simulações acima apresentadas foi simulado o período total da calibração do local com uma outra versão WINDIE<sup>TM</sup>. Por motivos desconhecidos, entre a versão do modelo de microescala e o modelo de mesoescala não se verificou um bom acoplamento, repercutindo-se na versão WINDIE<sup>TM</sup> já que não produziu resultados minimamente aceitáveis. Como está aludido na tabela 4.1 as simulações 7 e 8 foram realizadas com insucesso, uma vez que o esquema convectivo utilizado ( $4^a$  ordem) tendencialmente produz maiores velocidades (horizontais e verticais) que o esquema convectivo Upwind e para as definições de malha apresentadas a condição CFL não se verificou, criando assim instabilidade numérica.

No capítulo seguinte serão apresentados e analisados os resultados obtidos de duas das simulações apresentadas na tabela 4.1. O critério de escolha das simulações a analisar recai para as simulações 3 e 6, pois das simulações que convergiram, estas são as que possuem maior definição de malha para os dois diferentes esquemas convectivos utilizados. Na figura 4.7 está representada a malha utilizada na simulação 3.

Figura 4.7: Malha WINDIE<sup>TM</sup> - simulação 3





# Capítulo 5

## Resultados e discussão

Neste capítulo, serão apresentados e analisados dados como a velocidade, intensidade turbulenta, direções e fatores de correção de fluxo obtidos nos casos simulados.

Na primeira secção estende-se uma análise aos dados medidos para o período de tempo simulado. Na segunda secção apresenta-se uma avaliação do desempenho global das simulações em capturar temporalmente o escoamento local, através da produção de gráficos onde estão representados ao longo de uma série temporal os resultados extraídos dos casos simulados e medidos.

Na terceira secção pretende-se perceber o comportamento das simulações em capturar diferenças de velocidade entre os dois mastros e quando é que essas diferenças estão dependentes das direções do vento.

### 5.1 Análise dos dados medidos

Dado que o período simulado foi de apenas uma semana, torna-se pertinente caracterizar o regime de ventos para esse mesmo espaço temporal. Para isso recorre-se a apresentação e análise de gráficos alusivos às direções, às velocidades e às intensidades turbulentas medidas nessa semana.

Analisando-se o terreno, pode-se afirmar que não existem grandes alterações topográficas que pudessem modificar significativamente as direções do vento, pois as cumieiras adjacentes àquela onde é realizado o processo de medição não possuem alturas superiores. Destaca-se também que as inclinações não são acentuadas na proximidade do local de medição, como é perceptível no mapa de declive (Figura 3.4). Os ventos predominantemente são de norte,

pois este setor abarca mais de 60 % das ocorrências, como se pode verificar nas figuras 5.1 e 5.2.

Figura 5.1: Direções medidas

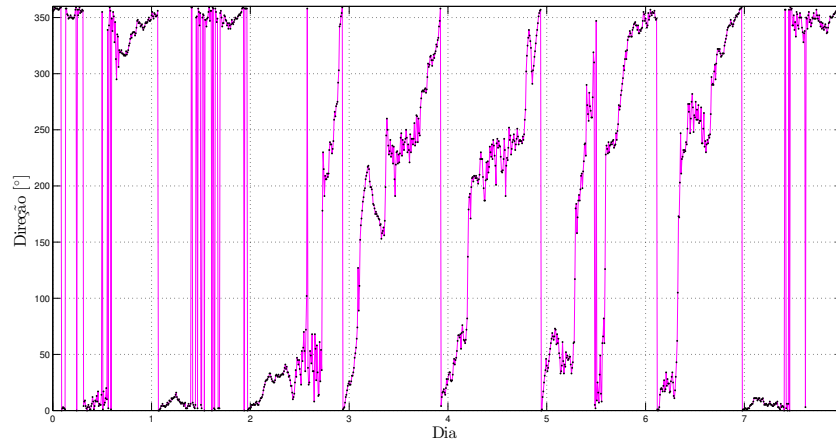
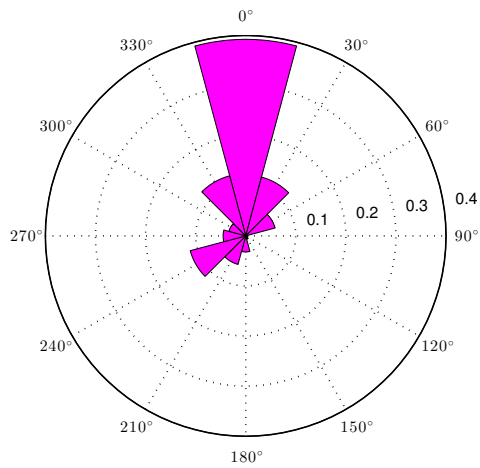
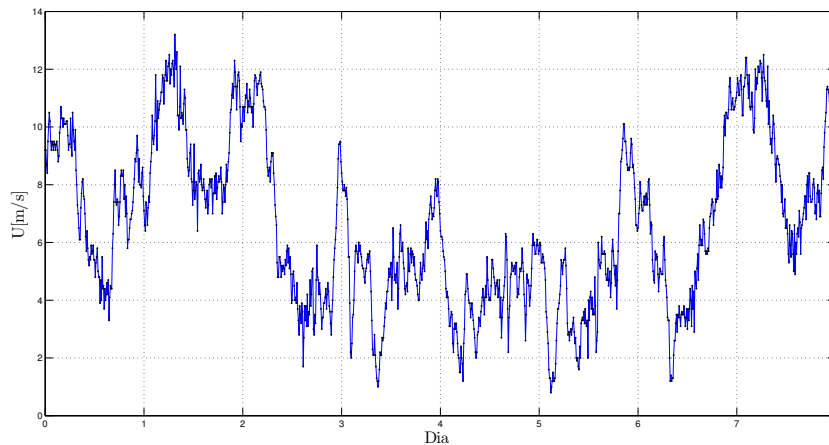


Figura 5.2: Frequência das direções medidas



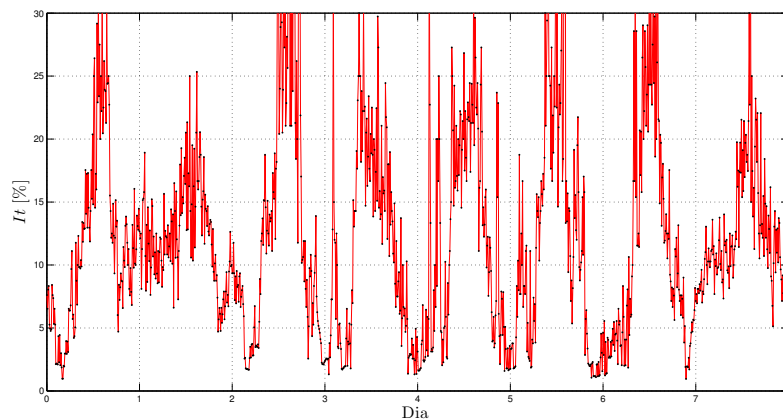
Observando-se a figura 5.3 e como já fora referido no capítulo 3, os ciclos noturnos e diurnos estão bem identificados, isto porque nas horas de maior exposição ao sol as magnitudes das velocidades apresentam-se menores do que no período noturno. Visto que o local de medição encontra-se aproximadamente a 35 km da costa, esta diferença de velocidades entre os dois ciclos pode ocorrer devido a possíveis brisas marítimas, pois a massa de ar que se desloca do mar para a terra pode afetar o vento que se desloca numa outra direção. Torna-se igualmente pertinente salientar que nos períodos em que ocorre rotação do vento, estes coincidem na generalidade das vezes, com os períodos em que se registam as velocidades mais baixas.

Figura 5.3: Velocidades medidas



Como se pode verificar na figura 5.4 existe um notório aumento da intensidade turbulenta no período diurno, este fenómeno está de acordo com o comportamento médio da intensidade turbulenta para o período total de medição (confrontar figura 3.12). Neste comportamento médio existe um crescimento da turbulência até aproximadamente ao meio do dia e um decréscimo até ao final do dia, onde os picos de intensidade turbulenta surgem entre as 12 e as 14 horas, período de maior exposição solar. Este evento poderá dever-se ao facto de grande parte da turbulência existente na camada limite atmosférica ser gerada por forças com origem no solo, como exemplo, os efeitos de flutuabilidade do ar (formação de fluxos verticais) que surgem devido ao aquecimento solar na superfície do terreno durante o período diurno.

Figura 5.4: Intensidades turbulentas medidas



## 5.2 Análise temporal

Como descrito anteriormente esta secção tem como objetivo analisar temporalmente as simulações. Nas seguintes subsecções irão ser analisados os seguintes dados extraídos das simulações:

- Direções do vento;
- Velocidades do vento;
- Intensidade turbulenta;
- Fatores de correção de fluxo.

Os dados representados graficamente nesta secção, são para cada 10 minutos de medição e simulação WINDIE<sup>TM</sup> e para cada 20 minutos simulação WRF do período analisado, tendo sido assegurada simultaneidade entre os vários conjuntos de dados.

### 5.2.1 Direção de vento

Analisando o regime de vento no que diz respeito às magnitudes das velocidades, torna-se importante confrontar as direções reproduzidas pelo modelo WINDIE<sup>TM</sup> para a posição do mastro de referência, como se pode verificar nas figuras 5.5 e 5.6.

Figura 5.5: Direções Simulação 3 WINDIE<sup>TM</sup>, WRF e medidas

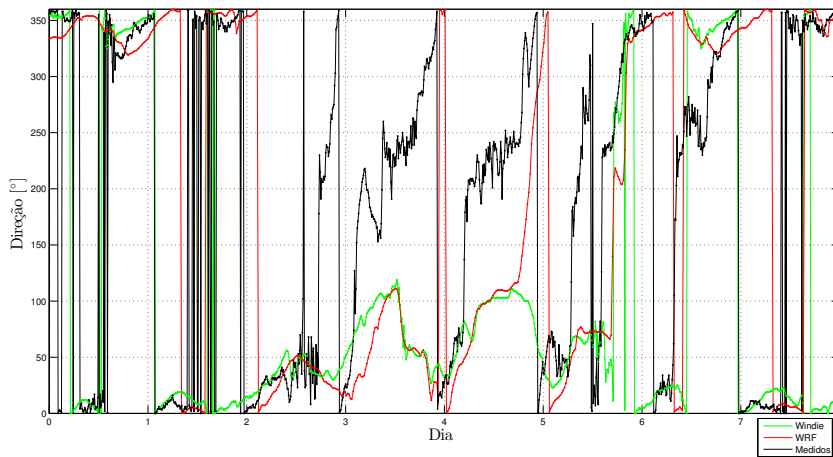
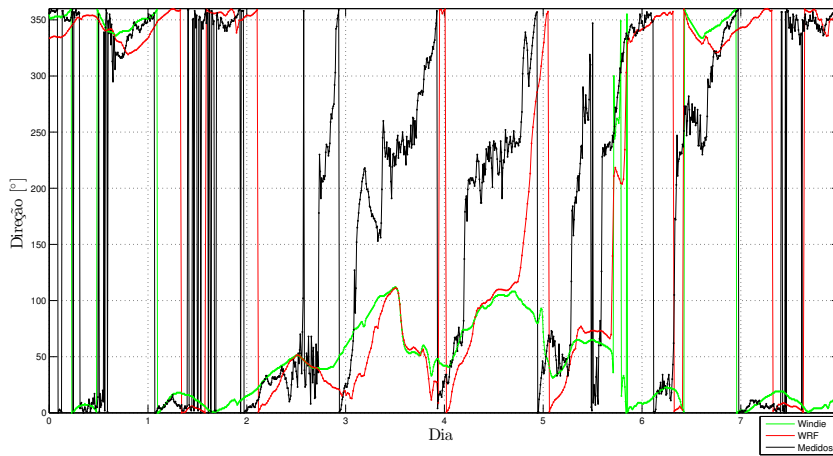


Figura 5.6: Direções Simulação 6 WINDIE<sup>TM</sup>, WRF e medidas



Observando atentamente as figuras 5.5 e 5.6, nota-se que quando a direção do vento é norte nas medições, as direções simuladas na sua grande maioria pertencem ao setor norte, por outro lado existe uma dificuldade aparente do modelo de microescala em captar a mudança de direção do vento que ocorre durante a tarde (alteração da direção do vento do setor norte para o setor sudoeste), este fenómeno deve-se ao facto do modelo de microescala estar acoplado ao modelo de mesoescala, e este, por razões desconhecidas, não consegue reproduzir essas mudanças de direções do vento nesses períodos. Como as direções do vento simuladas no modelo WINDIE<sup>TM</sup> e WRF são próximas, pode-se concluir que dentro do domínio microescala as características do terreno não alteram significativamente as direções provenientes do modelo de mesoescala. Como é visível nas seguintes rosas (figuras 5.7, 5.8, 5.9), as características do terreno do domínio WINDIE<sup>TM</sup> provocam apenas uma pequena rotação do vento no sentido horário. Apuradas as direções medidas mais frequentes (figura 5.2), setor norte, o modelo microescala em termos gerais reproduz com algum sucesso as direções do vento. Nas seguintes figuras estão representadas as frequências das direções das simulações WINDIE<sup>TM</sup> e da simulação WRF.

Figura 5.7: Frequência das Direções - simulação WRF

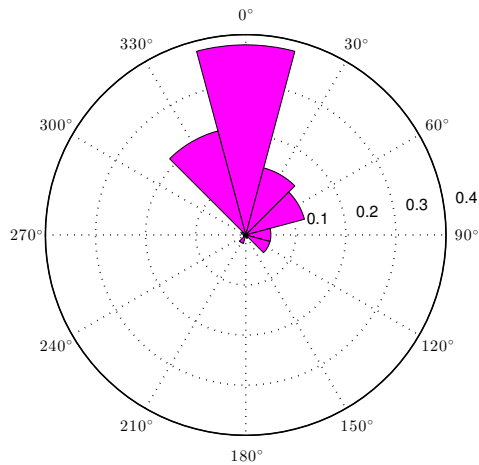
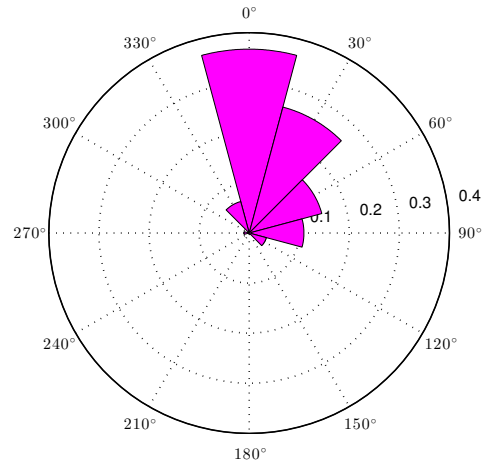
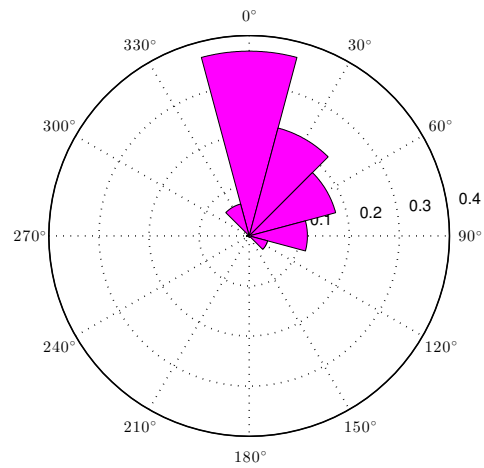


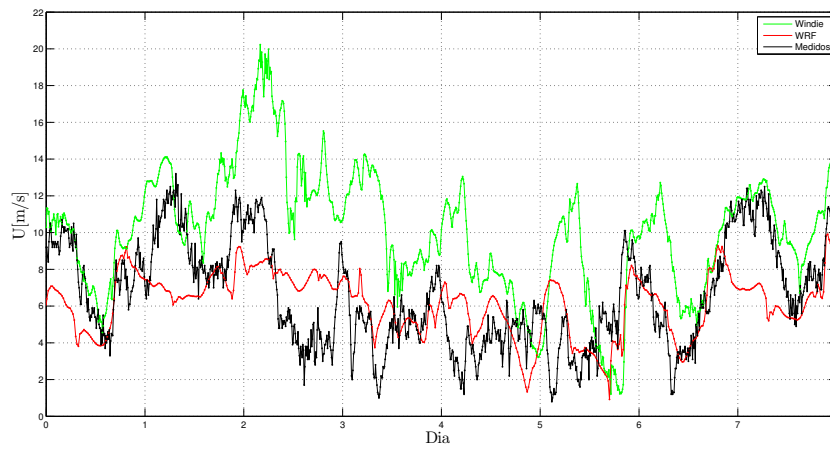
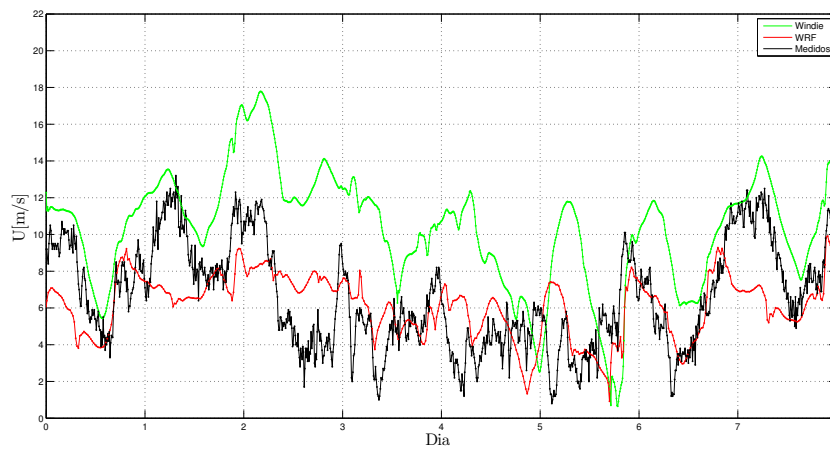
Figura 5.8: Frequência das Direções - simulação 3 WINDIE<sup>TM</sup>Figura 5.9: Frequência das Direções - simulação 6 WINDIE<sup>TM</sup>

### 5.2.2 Velocidade do vento

As velocidades medidas apresentadas são precedidas de valores médios das velocidades para cada conjunto de medições de 10 minutos, nos quais as velocidades são registadas a uma determinada frequência, taxa de amostragem do anemómetro.

As velocidades simuladas apresentadas são retiradas a cada instante de 10 minutos de simulação. Contudo, poder-se-ia aplicar o mesmo método de extração das velocidades medidas, mas uma vez que é necessário armazenar as velocidades para cada instante de tempo da simulação no sistema, para efetuar o cálculo das médias das velocidades para cada intervalo de tempo, traria como consequência elevados custos de recursos e de armazenamento computacional. Para além disso, é de se destacar que como as condições de fronteira são geradas a cada 20 minutos e interpoladas linearmente no tempo, os cálculos dos valores médios das velocidades, para cada 10 minutos de conjuntos de dados simulados, não seriam muito diferentes do valor da velocidade ao fim de cada 10 minutos simulados, visto que se trata de um período pequeno e no qual as condições de fronteira não variam assim tão substancialmente num intervalo de tempo de 20 minutos.

Com o intuito de analisar o comportamento das simulações, comparando as velocidades produzidas pelo modelo WINDIE<sup>TM</sup> com as medidas e identificar se o acoplamento entre o modelo de mesoescala e microescala se realizou com sucesso, estão representadas nas figuras 5.10 e 5.11 as velocidades produzidas pelas medições, simulações WINDIE<sup>TM</sup> e WRF para a posição do mastro de referência.

Figura 5.10: Velocidades Simulação 3 WINDIE<sup>TM</sup>, WRF e medidasFigura 5.11: Velocidades Simulação 6 WINDIE<sup>TM</sup>, WRF e medidas

Como se pode verificar nas figuras 5.10 e 5.11 a simulação WRF reproduziu padrões de velocidades que vão desde 1 m/s até 10 m/s, em termos médios as velocidades rondam em torno dos 6 m/s.

O modelo de microescala produz resultados satisfatórios de acoplamento ao modelo de mesoescala, visto que numa boa parte da série temporal as linhas de resultados das simulações WINDIE<sup>TM</sup> acompanham razoavelmente, em termos de crescimento e decrescimento das magnitudes das velocidades, a linha de resultados do modelo WRF. De realçar que o modelo de microescala produz maioritariamente velocidades superiores às do modelo de mesoescala, visto que está bem presente uma tendência para que as velocidades WINDIE<sup>TM</sup> em termos médios sejam superiores mais ou menos 4 m/s. As simulações 3 e 6 nos dois primeiros dias e no último dia reproduzem um regime de velocidades muito próximo dos dados medidos, por outro lado nos restantes dias a anterior conjectura não se verifica, pois as velocidades são bem superiores às medidas em grande parte da série temporal e não acompanham sequer o sentido crescente ou decrescente da linha de resultados medidos. O modelo WRF entre o dia 2 e o dia 7 acaba por produzir magnitudes de velocidades mais próximas das medidas, pois este não gera velocidades tão elevadas como as velocidades das simulações do modelo de microescala. Em suma, estes dois modelos (mesoescala e microescala) não conseguem reproduzir um bom regime de vento relativamente aos valores da velocidade assim como as linhas de resultados geradas pelos modelos não produzem um bom contorno da linha de velocidades medidas.

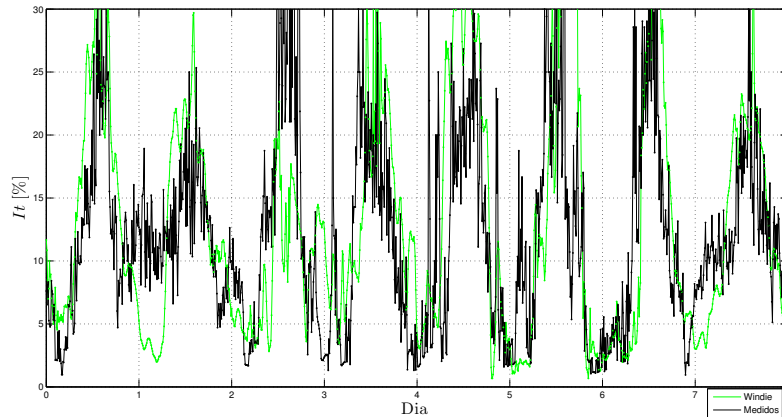
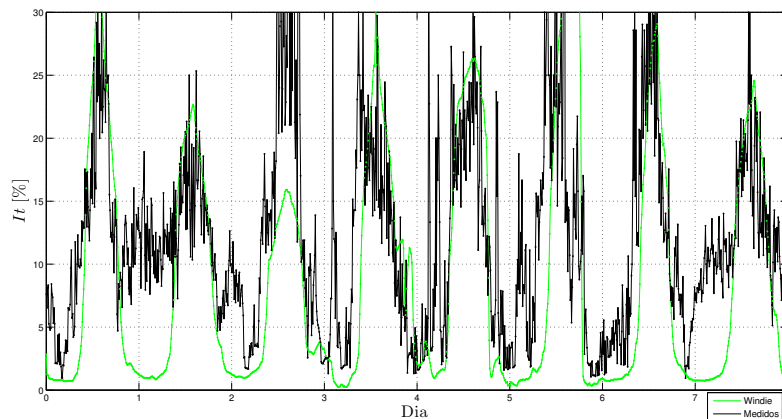
Por fim, as velocidades da simulação 3 são um pouco superiores e revelam maior instabilidade do que as velocidades da simulação 6, isto é um fenómeno já esperado, visto que na simulação 6 o esquema convectivo utilizado, Upwind, tem boas características de estabilidade.

### 5.2.3 Intensidade turbulenta

A intensidade turbulenta para os dados medidos é definida como

$$I_t = \frac{\sigma(U_{10min})}{\bar{U}_{10min}} \quad (5.1)$$

e para os dados simulados é calculada através do modelo de turbulência utilizado, nas figuras 5.12 e 5.13 estão apresentados os valores das intensidades turbulentas (notação percentual) das medições assim como das simulações.

Figura 5.12: Intensidades turbulentas Simulação 3 WINDIE<sup>TM</sup> e medidasFigura 5.13: Intensidades turbulentas Simulação 6 WINDIE<sup>TM</sup> e medidas

Analisando as figuras 5.12 e 5.13 é de se notar que nas simulações o ciclo diurno está muito marcado e em concordância com o ciclo registrado nas medições. Isto porque nas simulações os maiores índices de turbulência surgem durante o período diurno tal como nas medições, no qual o crescimento da intensidade turbulenta se verifica durante o dia e decréscimo durante o período noturno. Assim pode-se concluir que o comportamento da turbulência verificado nas simulações está qualitativamente de acordo com o comportamento da turbulência registrado nas medições para o SC.

Conclui-se também que a simulação 3 produz maiores variações e níveis de turbulência ao longo da série temporal do que a simulação 6, podendo mesmo afirmar-se que os valores da intensidade estão maioritariamente acima dos 15-20 % ao invés da simulação 6. Em suma, a simulação 3 acaba por produzir um modelo mais inconstante, o que por vezes se aproxima mais da realidade, já que produz intensidades demasiado elevadas o que leva a concluir que se trata de um modelo mais instável.

#### 5.2.4 Fatores de correção de fluxo

Os fatores de correção de fluxo, resultado relevante no contexto de calibração numérica do local, medem a distorção de fluxo entre o mastro de referência e o mastro temporário e definem-se através da seguinte expressão,

$$FCF = \frac{U_{TM}}{U_{RM}}. \quad (5.2)$$

Nas figuras 5.14 e 5.15 estão representados os fatores de correção de fluxo produzidos pelas medições e pelas simulações WINDIE<sup>TM</sup>.

Figura 5.14: FCF's Simulação 3 WINDIE<sup>TM</sup> e medidas

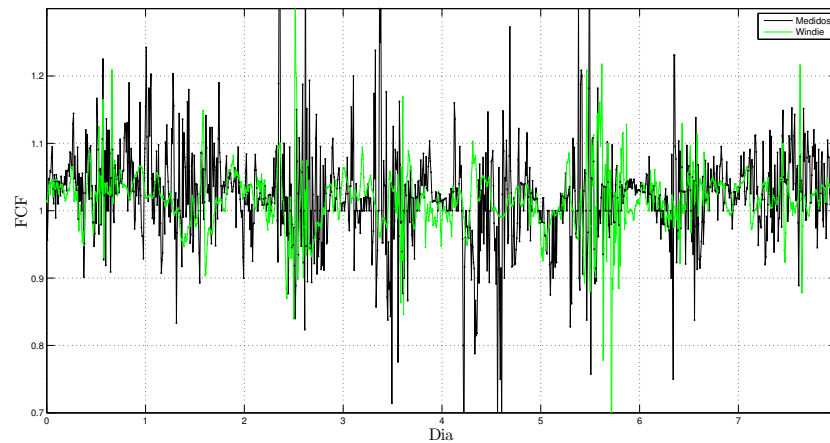
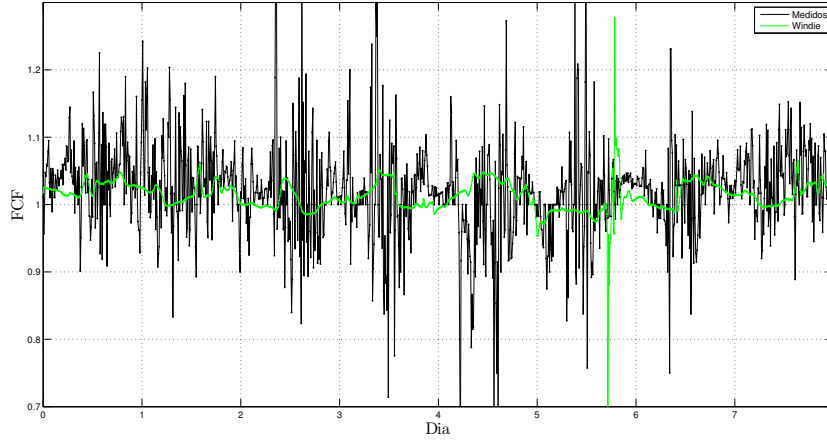


Figura 5.15: FCF's Simulação 6 WINDIE<sup>TM</sup> e medidas

Como seria previsível, os FCF's medidos seguem uma linha de valores com maiores oscilações e diferentes sentidos que as linhas de valores dos FCF's simulados. Nestes dois conjuntos de valores simulados existem dois comportamentos oscilatórios diferentes; na simulação 6 o modelo produz boas oscilações nos valores dos FCF's mas nem sempre com a monotonia da linha de dados medidos e na outra simulação não existem grandes oscilações de valores dos FCF's, pois estes estão mais próximos do valor unitário. Para avaliar com mais detalhe a relação entre os FCF's simulados e os FCF's medidos, estes conjuntos foram ajustados, através do método dos mínimos quadrados, seguindo os seguintes modelos,

$$FCF_{sim} = a_0 + a_1 FCF_{med} \quad (5.3)$$

$$FCF_{sim} = a_0 + a_1 FCF_{med} + a_2 FCF_{med}^2 \quad (5.4)$$

$$FCF_{sim} = a_0 + a_1 FCF_{med} + a_2 FCF_{med}^2 + a_3 FCF_{med}^3 \quad (5.5)$$

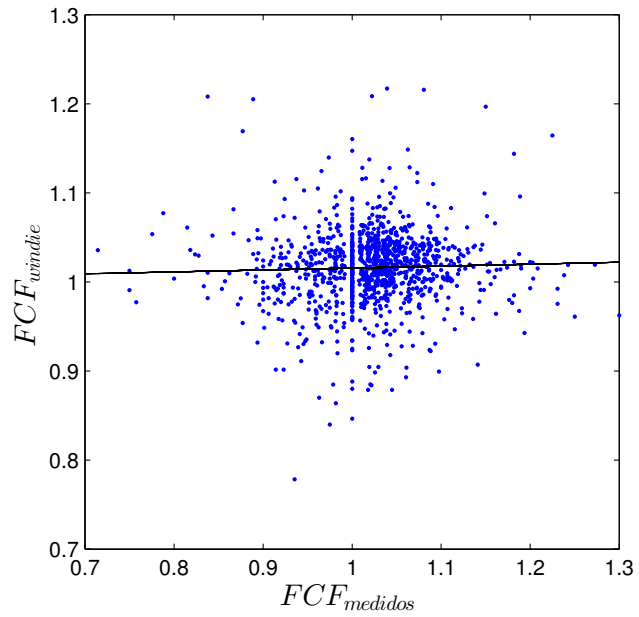
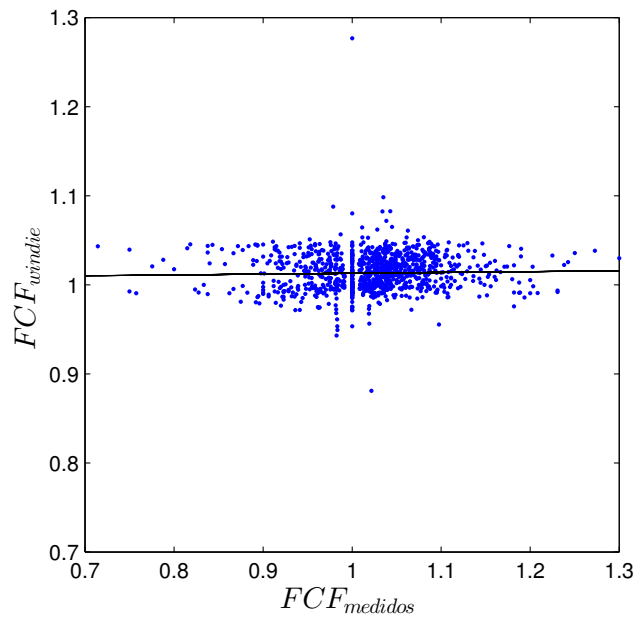
As constantes das regressões (linear, quadrática e cúbica) acima evidenciadas assim como os coeficientes de determinação, estão assinaladas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Coeficientes das regressões - Calibração do local

| Simulação | Regressão  | $a_0$  | $a_1$  | $a_2$  | $a_3$  | $R^2$  |
|-----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 3         | Linear     | 0.9940 | 0.0217 | —      | —      | 0.0012 |
|           | Quadrática | 0.9874 | 0.0345 | -      | —      | 0.0012 |
|           | Cúbica     | 1.3057 | -      | 0.0062 | -      | 0.0019 |
| 6         |            |        | 0.9021 | 0.8983 | 0.2867 |        |
|           | Linear     | 1.0037 | 0.0093 | —      | —      | 0.0007 |
|           | Quadrática | 1.0019 | -      | 0.0143 | —      | 0.0008 |
|           |            |        | 0.0201 |        |        |        |
|           | Cúbica     | 1.6881 | -      | 1.9165 | -      | 0.0104 |
|           |            |        | 1.9897 |        | 0.6628 |        |

Anteriormente verifica-se que os FCF's simulados não evidenciam o mesmo comportamento que os FCF's medidos na série temporal, os valores da tabela 5.1 e as figuras 5.16 e 5.17 demonstram não existir correlação entre os valores medidos e simulados: os coeficientes de determinação apresentam valores muito baixos, o que significa que as duas variáveis não se correlacionam linearmente, quadraticamente ou cubicamente.

Como o objetivo deste trabalho é produzir um modelo numérico de calibração do local que consiga determinar bons valores médios dos FCF's para cada intervalo de direção do setor de medição, por vezes o facto de um modelo possuir mais e maiores oscilações, como as verificadas nos dados medidos, pode não traduzir que os valores médios dos FCF's finais (valores que serão usados para prever a velocidade na turbina) estejam próximos ou não como os identificados na calibração do local. Para isso, como uma avaliação final dos modelos numéricos, na seguinte secção serão apresentados os FCF's para cada intervalo de direção do vento e analisados os erros entre os processos numéricos e o de medição.

Figura 5.16:  $FCF_{windie}$  vs  $FCF_{medidos}$  - Simulação 3Figura 5.17:  $FCF_{windie}$  vs  $FCF_{medidos}$  - Simulação 6

### 5.3 Análise do processo numérico de calibração do local

Independentemente de existir a necessidade de se analisar temporalmente os modelos numéricos de calibração do local, com o intuito de verificar a sua capacidade de reproduzir bons regimes de vento, torna-se ainda mais pertinente averiguar se os resultados das simulações fornecem valores úteis no contexto de um processo de NSC. Para se proceder a análise dos resultados dos NSC, comparando-os com os resultados do SC, foi necessário utilizar critérios de filtragem para os dados medidos e simulados (confrontar código MATLAB, Análise FCF's do NSC em anexos), conforme a norma IEC (2011), sendo que para isso foi necessário realizar os seguintes procedimentos:

- excluir os dados para os tempos de medição/simulação nos quais possuam direções do vento no mastro de referência que não fazem parte do setor de medição, tabela 3.1;
- excluir os dados para os tempos de medição/simulação nos quais não apresentem velocidades do vento no mastro de referência compreendidas entre 4 e 16 m/s.

Concluída a filtragem de dados foram calculados os rácios entre as velocidades no mastro temporário e no mastro de referência para os tempos válidos das simulações/medições.

#### 5.3.1 Fatores de correção de fluxo

Nas seguintes tabelas constará a análise estatística dos valores resultantes da calibração. Estarão patentes os FCF's finais; o desvio padrão dos mesmos; o grau da correlação entre as velocidades no mastro de referência e na posição da turbina; o número de registos e as respetivas frequências para cada intervalo de direções do vento pertencentes ao setor de medição. Para que seja possível efetuar esta análise, foi estipulado um número necessário de ocorrências mínimas para cada intervalo de direção de uma hora de simulação (6 ocorrências), de forma a ter o mínimo de relevância estatística.

Tabela 5.2: Dados estatísticos dos FCF's - Calibração do local

| Subsetor (°) | $\overline{FCF}$ | $\sigma_{FCF}$ | C.Pearson | Nr. de reg. | Frequência |
|--------------|------------------|----------------|-----------|-------------|------------|
| [0 – 10[     | 1.025            | 0.056          | 0.929     | 175         | 0.22       |
| [10 – 20[    | 1.035            | 0.051          | 0.983     | 61          | 0.08       |
| [20 – 30[    | 1.007            | 0.037          | 0.994     | 43          | 0.05       |
| [30 – 40[    | 1.025            | 0.067          | 0.973     | 48          | 0.06       |
| [40 – 50[    | 1.034            | 0.117          | 0.628     | 20          | 0.03       |
| [50 – 60[    | 0.986            | 0.063          | 0.905     | 7           | 0.01       |
| [60 – 70[    | 0.979            | 0.050          | 0.744     | 10          | 0.01       |
| [220 – 230[  | 0.965            | 0.119          | 0.549     | 15          | 0.02       |
| [230 – 235[  | 0.978            | 0.088          | 0.638     | 16          | 0.02       |
| [235 – 240[  | 0.999            | 0.054          | 0.842     | 27          | 0.03       |
| [310 – 320[  | 1.041            | 0.027          | 0.979     | 29          | 0.04       |
| [320 – 330[  | 1.048            | 0.028          | 0.986     | 24          | 0.03       |
| [330 – 340[  | 1.046            | 0.051          | 0.966     | 43          | 0.05       |
| [340 – 350[  | 1.039            | 0.048          | 0.936     | 118         | 0.15       |
| [350 – 360[  | 1.044            | 0.050          | 0.964     | 158         | 0.2        |

Tabela 5.3: Dados estatísticos dos FCF's - Calibração numérica do local (simulação 3)

| Subsetor ( $^{\circ}$ ) | $\overline{FCF}$ | $\sigma_{FCF}$ | C.Pearson | Nr. de reg. | Frequência |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------|-------------|------------|
| [0 – 10[                | 1.026            | 0.033          | 0.981     | 189         | 0.22       |
| [10 – 20[               | 1.011            | 0.035          | 0.983     | 135         | 0.16       |
| [20 – 30[               | 1.008            | 0.024          | 0.987     | 72          | 0.08       |
| [30 – 40[               | 0.987            | 0.036          | 0.964     | 83          | 0.10       |
| [40 – 50[               | 1.004            | 0.073          | 0.902     | 50          | 0.06       |
| [50 – 60[               | 1.018            | 0.064          | 0.921     | 58          | 0.07       |
| [60 – 70[               | 1.005            | 0.053          | 0.964     | 48          | 0.06       |
| [220 – 230[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [230 – 235[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [235 – 240[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [310 – 320[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [320 – 330[             | 1.004            | 0.041          | 0.922     | 7           | 0.01       |
| [330 – 340[             | 1.041            | 0.030          | 0.988     | 26          | 0.03       |
| [340 – 350[             | 1.038            | 0.031          | 0.986     | 67          | 0.08       |
| [350 – 360[             | 1.019            | 0.038          | 0.969     | 113         | 0.13       |

Tabela 5.4: Dados estatísticos dos FCF's - Calibração numérica do local (simulação 6)

| Subsetor ( $^{\circ}$ ) | $\overline{FCF}$ | $\sigma_{FCF}$ | C.Pearson | Nr. de reg. | Frequência |
|-------------------------|------------------|----------------|-----------|-------------|------------|
| [0 – 10[                | 1.022            | 0.013          | 0.996     | 215         | 0.25       |
| [10 – 20[               | 1.006            | 0.009          | 0.997     | 151         | 0.17       |
| [20 – 30[               | 0.996            | 0.002          | 0.999     | 23          | 0.03       |
| [30 – 40[               | 0.990            | 0.007          | 0.999     | 39          | 0.04       |
| [40 – 50[               | 0.999            | 0.015          | 0.992     | 111         | 0.13       |
| [50 – 60[               | 1.004            | 0.011          | 0.996     | 65          | 0.07       |
| [60 – 70[               | 0.993            | 0.010          | 0.999     | 68          | 0.08       |
| [220 – 230[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [230 – 235[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [235 – 240[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [310 – 320[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [320 – 330[             | —                | —              | —         | —           | —          |
| [330 – 340[             | 1.036            | 0.004          | 0.999     | 37          | 0.04       |
| [340 – 350[             | 1.035            | 0.006          | 0.999     | 66          | 0.08       |
| [350 – 360[             | 1.021            | 0.007          | 0.999     | 95          | 0.11       |

Como se pode verificar através dos desvios de padrão dos FCF's das tabelas acima apresentadas, os modelos numéricos reproduzem valores de FCF's com uma menor dispersão em volta do valor  $\overline{FCF}$  de cada intervalo de direção. É também de realçar que os graus de correlação entre as velocidades dos dois mastros nas simulações WINDIE<sup>TM</sup> é bem maior, aproximando-se muitas vezes de uma correlação perfeita. Conclui-se que os modelos estão distantes de prever escoamentos com o grau de imprevisibilidade do escoamento medido.

Na comparação entre as duas simulações conclui-se que como na simulação 6 foi utilizado um esquema convectivo (Upwind), que possui excelentes características de estabilidade, esta acabou por produzir valores FCF's com uma menor flutuabilidade dado que as correlações apresentadas entre as velocidades nos dois mastros é um pouco maior que no caso 3.

Como conclusão final deste trabalho, na seguinte subsecção será efetuada uma análise aos erros produzidos nos modelos numéricos de calibração do local.

### 5.3.2 Erros

No estudo de técnicas de previsão, as medidas de precisão são um tipo de análise de enorme relevo. Visto que os valores medidos da velocidade do vento na turbina são difíceis de prever, é fundamental incluir informação acerca da medida em que a previsão (velocidades simuladas) pode desviar-se do valor real da variável (velocidades medidas). Este conhecimento adicional fornece uma melhor percepção sobre o quão precisa pode ser a previsão. Na tabela 5.5 estão assinalados os erros absolutos e relativos. Os erros são calculados através das seguintes expressões:

- $ErroAbsoluto = |\overline{FCF}_{medidos} - \overline{FCF}_{simulados}|$
- $ErroRelativo = \frac{|\overline{FCF}_{medidos} - \overline{FCF}_{simulados}|}{\overline{FCF}_{medidos}} 100 (\%)$

Tabela 5.5: Erros absolutos e relativos dos FCF's

| Subsetor (°) | Erro Absoluto |             | Erro Relativo (%) |             |
|--------------|---------------|-------------|-------------------|-------------|
|              | Simulação 3   | Simulação 6 | Simulação 3       | Simulação 6 |
| [0 – 10[     | 0.00082       | 0.00359     | 0.08              | 0.35        |
| [10 – 20[    | 0.02421       | 0.02939     | 2.34              | 2.84        |
| [20 – 30[    | 0.00055       | 0.01174     | 0.05              | 1.17        |
| [30 – 40[    | 0.03766       | 0.03455     | 3.67              | 3.37        |
| [40 – 50[    | 0.02940       | 0.03361     | 2.84              | 3.25        |
| [50 – 60[    | 0.03133       | 0.01739     | 3.18              | 1.76        |
| [60 – 70[    | 0.02666       | 0.01411     | 2.72              | 1.44        |
| [220 – 230[  | —             | —           | —                 | —           |
| [230 – 235[  | —             | —           | —                 | —           |
| [235 – 240[  | —             | —           | —                 | —           |
| [310 – 320[  | —             | —           | —                 | —           |
| [320 – 330[  | 0.04466       | —           | 4.26              | —           |
| [330 – 335[  | 0.00520       | 0.00997     | 0.50              | 0.95        |
| [340 – 350[  | 0.00157       | 0.00485     | 0.15              | 0.47        |
| [350 – 360[  | 0.02498       | 0.02272     | 2.39              | 2.18        |

Analisando a tabela 5.5 pode-se afirmar que os erros são relativamente baixos nos dois casos. De realçar que nos intervalos de direção entre 0° e 10° foi onde se verificaram mais ocorrências de vento simulado sendo aquele em que o erro é menor; nos restantes intervalos o erro é menor numa simulação do que na outra e vice versa. Será difícil de definir qual o modelo com melhores medidas de precisão, pois o período simulado foi curto e as duas simulações estão próximas na magnitude do erro que geram. Por forma a medir globalmente os erros produzidos pelas simulações calculou-se os erros absolutos/relativos médios globais pesados pela frequência de ocorrência do vento em cada subsetor através das seguintes expressões:

- $ErrosAbsolutoGlobal = \sum_{i=1}^n [ErroAbsoluto(i) \times frequencia(i)];$
- $ErrosRelativoGlobal = \sum_{i=1}^n [ErroRelativo(i) \times frequencia(i)];$

em que o n é o número de subsetores existentes e i é a posição do subsetor.

Tabela 5.6: Erros globais

| Simulação | Erro Absoluto<br>Global | Erro Relativo<br>Global(%) |
|-----------|-------------------------|----------------------------|
| 3         | 0.0171                  | 1.67                       |
| 6         | 0.0178                  | 1.73                       |

Como se verifica os erros globais das duas simulações estão muito próximos, o que leva a concluir que é necessário simular um período de tempo mais alargado por forma a definir entre estas simulações qual a melhor configuração WINDIE<sup>TM</sup> para a realização de um NSC.

Com a realização de um maior número de NSC's para outros locais que afetem um período de simulação maior, estes tipo de erros poderão servir para aferir a incerteza do procedimento.



# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalho Futuro

### 6.1 Conclusões

O modelo WINDIE<sup>TM</sup> foi usado para obter rácios de velocidade entre os 2 pontos de um processo numérico de calibração do local. Foi então efetuada uma simulação precursora com o modelo de mesoescala WRF, cujos resultados foram acoplados ao modelo WINDIE<sup>TM</sup>.

Tendo em consideração que o modelo WINDIE<sup>TM</sup> foi testado para um intervalo de tempo reduzido, as principais conclusões que se podem almejar, consistem na capacidade que os modelos possuem em reproduzir bons resultados de calibração do local, visto que os erros máximos atingidos foram de quatro pontos percentuais para os valores finais dos FCF's. Por outro lado, estes modelos não foram capazes de simular corretamente os padrões locais de vento para a totalidade dos dias simulados, visto que entre o terceiro dia e o penúltimo dia as linhas de resultados dos dois modelos não foram capazes acompanhar a linha dos dados medidos, nomeadamente nas magnitudes das velocidades. Já no que concerna aos padrões de direção do vento e turbulência, o código de uma forma geral e satisfatória conseguiu reproduzir um regime de vento próximo do registado nas medições.

De notar que o modelo WRF no intervalo de tempo em estudo não conseguiu reproduzir direções próximas das direções medidas, quando estas estavam localizadas entre os setores sul e este. O modelo WINDIE<sup>TM</sup> revelou a mesma dificuldade, visto que as características do terreno não alteraram significativamente as direções provenientes do WRF.

Como o esquema upwind fornece mais peso aos nós da malha que se encon-

tram a montante do ponto de interpolação e possui boas características de estabilidade, a simulação na qual foi utilizado este esquema convectivo produziu um regime de velocidades menos oscilatório do que na simulação em que foi utilizado o esquema convectivo de 4ª ordem, assim como as relações entre as velocidades nos mastros são mais constantes e próximas do valor unitário, o que permite concluir que o upwind não só produz campos de velocidades com uma maior estabilidade temporal assim como espacial.

Durante a realização das simulações foi testado um caso, com insucesso, que tinha como configuração um esquema de interpolação 4ª ordem e uma malha com uma definição igual à simulação 6. Com este estudo conclui-se que o esquema convectivo de 4ª ordem produz maiores velocidades (horizontais e verticais) que o upwind. Desta forma, a condição CFL não foi verificada pois o número de Courant ultrapassou a unidade sendo que o modelo criou instabilidade numérica e os erros produzidos tenderam para infinito.

Neste trabalho poderia existir uma maior comparação de resultados entre os processos numéricos e as medições, no entanto, o período simulado foi de apenas uma semana, enquanto que a realização do processo de calibração do local teve duração de seis meses. Não será demais salientar que foram testados seis tipos configurações, nas quais três se enquadram num grupo de simulações em que o esquema convectivo usado foi o upwind para diferentes resoluções de malha e nas restantes foi utilizado o esquema convectivo de 4ª ordem para diferentes resoluções de malha. Perante isto, foram apenas analisadas duas simulações de cada grupo, aquelas que denotavam maiores definições de malha. Durante o processo de simulação surgiram alguns obstáculos. O obstáculo mais pertinente cingiu-se à falta de recursos temporais e computacionais para que, assim, pudesse simular num período de tempo mais alargado. Sendo que para simular uma semana foi necessário entre 4 a 7 dias, dependendo da configuração WINDIE<sup>TM</sup>, então para simular o período restante com os recursos computacionais disponíveis (2 nós de um cluster) seria necessário pelo menos um período de 2 a 3 meses.

## 6.2 Trabalho futuro

Num futuro próximo, este estudo beneficiaria de uma análise mais detalhada com a conclusão das simulações para o período de 6 meses, tempo da calibração do local. Considera-se importante que seja feita uma análise que abranja as várias estações do ano, pois nestas ocorrem diferentes regimes de vento, desta forma é fundamental entender se o  $WINDIE^{TM}$ , independentemente da sua configuração, tem a capacidade de produzir diferentes regimes de vento em estações distintas e, fundamentalmente, conhecer qual(ais) a(s) melhor(es) estação(ões) simulada(s).

Posteriormente, sustenta-se que deveriam ser testados outros modelos de turbulência, como o  $k - \epsilon$  e/ou *Spalart-Allmaras* conjugados com os esquemas convectivos que o  $WINDIE^{TM}$  oferece, nomeadamente o upwind e o quick. Não obstante das configurações de simulação, as malhas espaciais devem ser mais refinadas, por forma a obter uma melhor correlação de fluxo entre os dois mastros. O refinamento da malha espacial deve ter sempre em consideração o refinamento da malha temporal, visto que quanto menores forem os volumes de controlo, menor deve ser o incremento de de tempo a simular de maneira a conferir o critério de estabilidade. Estas eventuais hipóteses a aplicar no modelo  $WINDIE^{TM}$  requerem um considerável recurso temporal e computacional.

O processo numérico de calibração deverá também ser testado noutro tipo de locais, sobretudo em terrenos mais complexos em que as variações dos FCF's sejam mais notórias de forma a que o comportamento do modelo seja observável mais facilmente.



# Bibliografia

- (2011). IEC 61400-12-1 Ed.2:Wind turbines – Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.
- (2013). ARW Version 3 Modeling System User’s Guide. National Center for Atmospheric Research, Mesoscale and Microscale Meteorology Division.
- BARRIOS, A., ZUBIAUR, R. & CORDÓN, R. (2007). Checking the capabilities of commercial software for numerical site calibration. In EWEC.
- BRODEUR, P. & MASSON, C. (2008). Numerical site calibration over complex terrain. *Journal of Solar Energy Engineering*.
- CARVALHO, D., ROCHA, A., GÓMEZ-GESTEIRA, M. & SANTOS, C. (2012). A sensitivity study of the wrf model in wind simulation for an area of high wind energy. *Environmental Modelling & Software*, pp. 23–34.
- CASTRO, F., SANTOS, C. M. P. S. & PALMA, J. (2008). Parallelisation of the CFD code of a CFD - NWP coupled system for the simulation of atmospheric flows over complex terrain. In Springer (Ed.), High Performance Computing for Computational Science- VECPAR 2008, pp. 195–207.
- CASTRO, F. A. (1997). Métodos numéricos para a simulação de escoamentos sobre topografia complexa. Ph.D. thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CASTRO, F. A., SANTOS, C. S. & COSTA, J. C. (2010). Development of a meso-microscale coupling procedure for site assessment in complex terrain. In EWEC.
- DA COSTA, J. L., CASTRO, F., PALMA, J. & STUART, P. (2006). Computer simulation of atmospheric flows over real forests for wind energy

- resource evaluation. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, p. 603–620.
- DA SILVA CARVALHO, D. J. (2009). Optimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica. Master's thesis, Universidade de Aveiro - Departamento de Física.
- DALPÉ, B. & MASSON, C. (2009). Numerical simulation of wind flow near a forest edge. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, p. 228–241.
- EIDSVIK, K., HOLSTAD, A. & LIE, T., I. UTNES (2004). A prediction system for local wind variations in mountainous terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, pp. 557–558.
- FERZIGER, J. H. & PERIĆ, M. (2002). Computational Methods for Fluids Dynamics. Springer, 3<sup>a</sup> edition.
- IIDA, M., SUGIMURA, T., ARAKAWA, C., TAKAHASHI, K. & KAMIO, T. (2008). Large-eddy simulation of wind for numerical site calibration technology phase I : Basic study of numerical simulation on complex terrain. *Annual Report of the Earth Simulator Center*, pp. 341–344.
- LEVEQUE, R. (1992). Numerical Methods for Conservation Laws, volume Lectures in Mathematics. ETH Zurich, 2<sup>a</sup> edition.
- SKAMAROCK, W. C., KLEMP, J. B., DUDHIA, J., GILL, D. O., BARKER, D. M., WANG, W. & POWERS, J. G. (2005). A Description of the Advanced Research WRF Version 2. National Center for Atmospheric Research, Mesoscale and Microscale Meteorology Division.
- TRADUZIDO POR GLAYSON E. DE FIGUEIREDO, A. G. (2008). Matlab com aplicações em Engenharia. Bookman, 2<sup>a</sup> edition.

# Apêndice A

## Códigos MATLAB

### A.1 Apresentação do escoamento

#### A.1.1 Importar os dados para análise

```
[ficheiro,pasta]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados', ...
    'caminho da diretoria do ficheiro');
importfile([pasta ficheiro]);

Diri=data(:,2);           %Direção
Vel=data(:,3);           %Velocidade média no intervalo de 10 min
Velmaxima=data(:,4);     %Velocidade máxima no intervalo de 10 min
Velminima=data(:,5);     %Velocidade minima no intervalo de 10 min
DesVel=data(:,6);        %Desvio padrão da Velocidade no intervalo de 10 min
time=data(:,7);          %tempo de medição
stime=num2str(time(:));  %converção do vetor stime num ficheiro de texto
year=str2num(stime(:,1:4)); %Ano da medição/simulação
month=str2num(stime(:,5:6)); %Mês da medição/simulação
day=str2num(stime(:,7:8)); %Dia da medição/simulação
hours=str2num(stime(:,9:10)); %Hora da medição/simulação
minutes=str2num(stime(:,11:12)); %Minutos da medição/simulação
IT=DesVel./Vel;          %ITensidade turbulenta 1
Dir= Diri - (Diri==360)*360;
```

## A.1.2 Análise dos dados em função da direção do vento

### Direção do vento

Cálculo da frequência da Direção do vento

```
%%Setores de 30° de amplitude
sec = 0:30:330;
nsec = length(sec);
amp = ones(1,nsec)*30;
delta = amp/2

for isec = 1:nsec
    if isec==1
        nreg(isec) = length(Dir(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)+360) | ...
                            Dir<(sec(isec) +delta(isec))));
    else
        nreg(isec) = length(Dir(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)) & ...
                            (Dir<(sec(isec) +delta(isec))));
    end
end

freq1=nreg/sum(nreg);

%%Setores de 10° de amplitude

sec2 = 0:10:350;
nsec2 = length(sec2);
amp2 = ones(1,nsec2)*10;
delta2 = amp2/2;

for isec2 = 1:nsec2
    if isec2==1
        nreg2(isec2) = length(Dir(Dir>=(sec2(isec2)-delta2(isec2)+360) | ...
                                Dir<(sec2(isec2) +delta2(isec2))));
    else
        nreg2(isec2) = length(Dir(Dir>=(sec2(isec2)-delta2(isec2)) & ...
```

```
(Dir<(sec2(isec2) +delta2(isec2)))));  
    end  
end  
  
freq2=nreg2/sum(nreg2);  
  
%%Rosa de frequência da Direção do vento 12 secções  
  
figure('Name','freq.Dir')  
htemp1= polar(sec(1),max(freq1)*1)  
YY=max(xlim);  
  
%%Unidades dos eixos  
hHiddenText = findall(gca,'type','text');  
Angles = 0 : 30 : 330;  
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );  
  
for ang = Angles  
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));  
    switch ang  
    case 0  
        set(hObj,'string','0$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 30  
        set(hObj,'string','30$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 60  
        set(hObj,'string','60$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 90  
        set(hObj,'string','90$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 120  
        set(hObj,'string','120$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 150  
        set(hObj,'string','150$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 180  
        set(hObj,'string','180$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 210  
        set(hObj,'string','210$\{\circ\}$','Interpreter','latex');  
    case 240  
        set(hObj,'string','240$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
```

```
case 270
    set(hObj,'string','270$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 300
    set(hObj,'string','300$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 330
    set(hObj,'string','330$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
end
end
hold on
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec

    sdt = (sec(isec) -delta(isec)) : delta(isec)/50 : ...
        (sec(isec) +delta(isec));

    sdf = freq1(isec)*ones(1,101);

    sthetaf=[0 sdt 0];

    sradiuf=[0 sdf 0];

    sxf=cos(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    syf=sin(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    hf(isec)= fill (sxf,syf,[0.8 0.8 0.8])

end

hold on

for isec2=1:nsec2

    sdt2 = (sec2(isec2) -delta2(isec2)) : delta2(isec2)/50 : ...
        (sec2(isec2) +delta2(isec2));
```

```
sdf2 = freq2(isec2)*ones(1,101);

sthetaf2=[0 sdt2 0];

sradiuf2=[0 sdf2 0];

sxf2=cos(sthetaf2*pi/180).*sradiuf2;

syf2=sin(sthetaf2*pi/180).*sradiuf2;

hf2(isec2)= fill (sxf2,syf2,[0.9 0.9 0.0])

end
```

### Velocidade do vento

```
%%Cálculo da velocidade média
```

```
for isec=1:nsec
    if isec==1
        medVelsec(isec)=mean(Vel(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)+360) | ...
            Dir<(sec(isec)+delta(isec))));
    else
        medVelsec(isec)=mean(Vel(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)) & ...
            Dir<(sec(isec)+delta(isec))));
    end
end
```

```
%%Rosa da velocidade média
```

```
fHand =figure('Name','Velmed')
aHand = axes('parent', fHand);
pHand = polar(sec(1),max(medVelsec)*1.1, 'parent', aHand);
YY=max(xlim);
delete(pHand)
```

```
%%Unidades dos eixos
```

```
hands = findall(fHand,'parent', aHand, 'Type', 'text');
hands = hands(strncmp(' ', get(hands,'String'), 2));
hands = sort(hands);
nlab= size(hands,1);
straux=get(hands(:),'String');

for i=1:nlab
    strauxx(i)=strcat(straux(i),' m/s');
end

for i = 1:nlab
    set(hands(i),'String', strauxx(i));
end

hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );
for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));
    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 60
        set(hObj,'string','60$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 90
        set(hObj,'string','90$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 120
        set(hObj,'string','120$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 150
        set(hObj,'string','150$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 180
        set(hObj,'string','180$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 210
        set(hObj,'string','210$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 240
```

```

    set(hObj,'string','240$\{\circ}$','Interpreter','latex');
case 270
    set(hObj,'string','270$\{\circ}$','Interpreter','latex');
case 300
    set(hObj,'string','300$\{\circ}$','Interpreter','latex');
case 330
    set(hObj,'string','330$\{\circ}$','Interpreter','latex');
end
end

hold on;
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec
    sdt=sec(isec)-delta(isec):delta(isec)/50:sec(isec)+delta(isec);
    sdmvm=medVelsec(isec)*ones(1,101);
    sthetamvm=[0 sdt 0];
    sradiumvm=[0 sdmvm 0];
    sx=cos(sthetamvm*pi/180).*sradiumvm;
    sy=sin(sthetamvm*pi/180).*sradiumvm;
    hf(isec)=fill(sx,sy,[0 0 1]);
end

```

### Intensidade turbulenta

```

%%Cálculo da intensidade turbulenta média

for isec=1:nsec
    if isec==1
        ITmed(isec)=(mean(IT(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)+360) | ...
        Dir<(sec(isec)+delta(isec))))) *100;
    else
        ITmed(isec)=(mean(IT(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)) & ...
        Dir<(sec(isec)+delta(isec))))) *100;
    end
end

```

```

end

%%Rosa da intensidade turbulenta média

fHand =figure('Name','ITmed')
aHand = axes('parent', fHand);
pHand = polar(sec(1),max(ITmed)*1.1, 'parent', aHand);
YY=max(xlim);
delete(pHand)

%%Unidades dos eixos

hands = findall(fHand,'parent', aHand, 'Type', 'text');
hands = hands(strncmp(' ', get(hands,'String'), 2));
hands = sort(hands);
nlab= size(hands,1);
straux=get(hands(:),'String');

for i=1:nlab
    strauxx(i)=strcat(straux(i),' %');
end

for i = 1:nlab
    set(hands(i),'String', strauxx(i));
end

hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );
for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));
    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 60
        set(hObj,'string','60$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    end
end

```

```
case 90
    set(hObj,'string','90$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 120
    set(hObj,'string','120$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 150
    set(hObj,'string','150$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 180
    set(hObj,'string','180$','Interpreter','latex');
case 210
    set(hObj,'string','210$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 240
    set(hObj,'string','240$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 270
    set(hObj,'string','270$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 300
    set(hObj,'string','300$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
case 330
    set(hObj,'string','330$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
end
end

hold on;
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec;
    sdt=sec(isec)-delta(isec):delta(isec)/50:sec(isec)+delta(isec);
    sdi=ITmed(isec)*ones(1,101);
    sthetaIT=[0 sdt 0];
    sradiuIT=[0 sdi 0];
    sx=cos(sthetaIT*pi/180).*sradiuIT;
    sy=sin(sthetaIT*pi/180).*sradiuIT;
    hf(isec)= fill (sx,sy,[1 0 0]);
end
```

### Contribuição energética

```

%%Cálculo da percentagem contribuição energética (%)

rho=1.225          %kg/m3 massa volumica do ar

FP=0.5*rho*Vel.^3; %W/m2 fluxo potência

for isec=1:nsec
    if isec==1
        perFP(isec)=(sum(FP(Dir>=(sec(isec)-delta(isec)+360)| ...
            Dir<(sec(isec)+delta(isec))))) / sum(FP))*100;
    else
        perFP(isec)=(sum(FP(Dir>=sec(isec)-delta(isec) & ...
            Dir<sec(isec)+delta(isec))))) / sum(FP))*100;
    end
end

end

%%Rosa da contribuição energética

fHand = figure('Name','%Cont.energética')
aHand = axes('parent', fHand);
pHand = polar(isec(1),max(perFP)*1.1, 'parent', aHand);
YY=max(xlim);
delete(pHand)

%%Unidades dos eixos

hands = findall(fHand,'parent', aHand, 'Type', 'text');
hands = hands(strncmp(' ', get(hands,'String'), 2));
hands = sort(hands);
nlab= size(hands,1);
straux=get(hands(:),'String');

for i=1:nlab
    strauxx(i)=strcat(straux(i),'');
end
end

```

```
for i = 1:nlab
    set(hands(i),'String', strauxx(i));
end

hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );
for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));
    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 60
        set(hObj,'string','60$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 90
        set(hObj,'string','90$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 120
        set(hObj,'string','120$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 150
        set(hObj,'string','150$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 180
        set(hObj,'string','180$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 210
        set(hObj,'string','210$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 240
        set(hObj,'string','240$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 270
        set(hObj,'string','270$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 300
        set(hObj,'string','300$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 330
        set(hObj,'string','330$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    end
end
end
```

```

hold on;
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec;
    sdt=sec(isec)-delta(isec):delta(isec)/50:sec(isec)+delta(isec);
    sdi=perFP(isec)*ones(1,101);
    sthetaFP=[0 sdt 0];
    sradiuFP=[0 sdi 0];
    sx=cos(sthetaFP*pi/180).*sradiuFP;
    sy=sin(sthetaFP*pi/180).*sradiuFP;
    hf(isec)= fill (sx,sy,[1 0.6 0]);
end

```

### A.1.3 Análise dos dados em função da hora

#### Direção do vento

```

%% Cálculo da direção média
for h=0:23
    l=length(Dir(hours==h ));
    Dirh(1:l,h+1)=Dir(hours==h ) ;
    medDirh(h+1)=circ_rad2ang(circ_mean(circ_ang2rad(Dirh(1:l,h+1))));
end

for j=1:24
    if medDirh(j)<0
        medDirhc(j)=medDirh(j)+360;
    else
        medDirhc(j)=medDirh(j);
    end
end

%%Gráfico da Direção média

```

```

figure('Name','horas,Dirmed')
h=0:23;
plot(h,medDirhc,'m')
hold on
plot(h,medDirhc,'k.')
grid on
set(gca,'XLim',[0 23])
set(gca,'XTick',[0:1:24])
X=xlabel('Horas [h]')
set(gca,'YLim',[0 359])
set(gca,'YTick',[0:30:360])
Y=ylabel('$\overline{Dir}$ [$^{\circ}$]','Interpreter','latex')
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)

```

### Velocidade do vento

```

%% Cálculo da velocidade média

for h=0:23
    l=length(Vel(hours==h));
    Velhora(1:l,h+1)=Vel(hours==h) ;
    medVelhora(h+1) = mean(Velhora(1:l,h+1));
end

%%Gráfico da velocidade média

figure('Name','horas,Dirmed')
h=0:23;
plot(h,medVelhora,'b')
hold on
plot(h,medVelhora,'k.')
grid on
set(gca,'XLim',[0 23])
set(gca,'XTick',[0:1:24])
X=xlabel('Horas [h]')
Y=ylabel('$\overline{U}$ [m/s]','Interpreter','latex')
set(X,'FontSize',18)

```

```
set(Y, 'FontSize', 18)
```

#### A.1.4 Análise dos dados de cada mês

```
NomeMes=char('Junho', 'Julho', 'Agosto', 'Setembro', 'Outubro', 'Novembro');
n=cellstr(NomeMes);
```

##### Direção do vento

```
%% Cálculo da direção média horária
```

```
for mes=6:1:11
    for h=0:23
        l=length(Dir(hours==h & month==mes));
        Dirhm(1:l,h+1)=Dir(hours==h & month==mes) ;
        medDir(h+1)=circ_rad2ang(circ_mean(circ_ang2rad(Dirhm(1:l,h+1))));
        medDirhm(h+1,mes-5)=medDir(h+1);
    end
end
```

```
for mes=6:1:11
    for i=1:24
        if medDirhm(i,mes-5)<0
            medDirhmc(i,mes-5)=medDirhm(i,mes-5)+360;
        else
            medDirhmc(i,mes-5)=medDirhm(i,mes-5);
        end
    end
end
```

```
%%Gráfico da Direção média horária
```

```
figure('Name', 'horas(mes),Dirmed(mes)')
for mes=6:1:11
    i=mes-5;
    horas=0:23;
```

```

subplot(2,3,mes-5)
plot(horas,medDirhmc(1:24,mes-5),'m')
hold on
plot(horas,medDirhmc(1:24,mes-5),'k. ')
grid on
set(gca,'XLim',[0 23])
set(gca,'XTick',[0:2:24])
X=xlabel('Horas [h]')
set(gca,'YLim',[0 359])
set(gca,'YTick',[0:30:360])
Y=ylabel('$\overline{Dir}$ [$^{\circ}$]','Interpreter','latex')
text(12,360*1.1,n(i),...
'FontSize',14,'HorizontalAlignment','center')
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)
end

```

### Velocidade do vento

```

%%Cálculo da velocidade média horária

for mes=6:11
    for h=0:23
        l=length(Vel(hours==h & month==mes));
        Velhm(1:l,h+1)=Vel(hours==h & month==mes) ;
        medVelhm(h+1,mes-5) = mean(Velhm(1:l,h+1));
    end
end

%%Gráfico da velocidade média horária

figure('Name','horas(mes),Velmed(mes)')
Aux=ceil(max(max(medVelhm)));
for mes=6:1:11
    i=mes-5
    horas=0:23;
    subplot(2,3,mes-5)

```

```

title('Velocidade m\''edia ', 'Interpreter', 'latex')
plot(horas, medVelhm(:, mes-5), 'b')
hold on
plot(horas, medVelhm(:, mes-5), 'k. ')
grid on
set(gca, 'XLim', [0 23])
set(gca, 'XTick', [0:2:24])
X=xlabel('Horas [h] ')
set(gca, 'YLim', [0 Aux+1])
set(gca, 'YTick', [0:1:Aux+1])
Y=ylabel('$\overline{U}$ [m/s]', 'Interpreter', 'latex')
text(12, (Aux+1)*1.1, n(i), ...
'FontSize', 14, 'HorizontalAlignment', 'center')
set(X, 'FontSize', 18)
set(Y, 'FontSize', 18)
end

```

### Intensidade turbulenta

```

%%Cálculo da Intensidade turbulenta média horária

```

```

for mes=6:11
    for h=0:23
        l=length(IT(hours==h & month==mes));
        IThm(1:l, h+1)=IT(hours==h & month==mes) ;
        medIThm(h+1, mes-5) = mean(IThm(1:l, h+1))*100;
    end
end

```

```

%%Gráfico da velocidade média horária

```

```

figure('Name', 'horas(mes), ITmed(mes)')
Aux=ceil (max(max(medIThm)))

for mes=6:1:11
    i=mes-5;
    subplot(2,3,mes-5)

```

```

plot(horas,medIThm(:,mes-5),'r')
hold on
plot(horas,medIThm(:,mes-5),'k.')
grid on
set(gca,'XLim',[0 23])
set(gca,'XTick',[0:2:24])
X=xlabel('Horas [h]')
set(gca,'YLim',[0 Aux+1])
set(gca,'YTick',[0:3:Aux+1])
Y=ylabel('$\overline{IT}$ $[\%]$', 'Interpreter', 'latex')
text(12,(Aux+1)*1.1,n(i),...
'FontSize',14,'HorizontalAlignment','center')
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)
end

```

### Contribuição energética

```

%%Cálculo do fluxo potência médio horário

```

```

for mes=6:11
    for h=0:23
        l=length(FP(hours==h & month==mes));
        FPhm(1:l,h+1)=FP(hours==h & month==mes) ;
        medFPhm(h+1,mes-5) = mean(FPhm(1:l,h+1));
    end
end

```

```

%%Gráfico do fluxo potência médio horário

```

```

figure('Name','horas(mes),FPmed(mes)')
Aux=ceil(max(max(medFPhm)))

for mes=6:1:11
    i=mes-5
    subplot(2,3,mes-5)
    p=plot(horas,medFPhm(:,mes-5),'r')

```

```

set(p,'color',[1 0.6 0])
hold on
plot(horas,medFPhm(:,mes-5),'k.')
grid on
set(gca,'XLim',[0 23])
set(gca,'XTick',[0:2:24])
X=xlabel('Horas [h]')
set(gca,'YLim',[0 Aux+100])
set(gca,'YTick',[0:100:Aux+100])
Y=ylabel('$\overline{FP}$ $$[W/m^2]$$','Interpreter','latex')
text(12,(Aux+100)*1.1,n(i),...
'FontSize',14,'HorizontalAlignment','center')
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)
end

```

### A.1.5 Análise dos dados em função da velocidade

#### Intensidade turbulenta

```

%%Cálculo da intensidade turbulenta média

for i=4:16
    j=i-3
    ITmVel(j)=mean(IT(Vel>=i & Vel<i+1))
end

%% Gráfico da intensidade turbulenta média

figure('Name','Vel,ITmed')
i=4:16;
plot(i,ITmVel*100,'r')
hold on
plot(i,ITmVel*100,'k.')
grid on
X=xlabel('Velocidade [m/s]')

```

---

```
Y=ylabel('$\overline{IT}$ [%]', 'Interpreter', 'latex')
set(X, 'FontSize', 18)
set(Y, 'FontSize', 18)
```

## A.2 Apresentação dos resultados SC

### A.2.1 Importar os dados para análise

#### Mastro referência

```
[ficheiro1,pasta1]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados ...
do Mastro referência','caminho da diretoria do ficheiro1');
importfile([pasta1 ficheiro1]);
D_rmi=data(:,2); %direção do vento
V_rmi=data(:,3); %velocidade do vento
D_rmi = D_rmi - (D_rmi==360)*360; % transformar dir de 360° em 0°
```

#### Mastro temporário

```
[ficheiro2,pasta2]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados ...
do Mastro temporário','caminho da diretoria do ficheiro2');
importfile([pasta2 ficheiro2]);
D_tmi=data(:,2); %direção do vento
V_tmi=data(:,3); %velocidade do vento
D_tmi = D_tmi - (D_tmi==360)*360; % transformar dir de 360° em 0°
```

### A.2.2 Filtrar dados pela velocidade do vento no mastro referência

```
D_rm=D_rmi(V_rmi>=4 & V_rmi<=16);
V_rm=V_rmi(V_rmi>=4 & V_rmi<=16);
D_tm=D_tmi(V_rmi>=4 & V_rmi<=16);
V_tm=V_tmi(V_rmi>=4 & V_rmi<=16);
```

### A.2.3 Fatores de correção de fluxo

```
FCF=V_tm./V_rm;
```

### A.2.4 Análise dos FCF's para as direcções de vento no mastro referência dentro do setor de medição

Setor de medição

```
sec = [ 0 10 20 30 40 50 60 220 230 235 310 320 330 340 350];
amp = [10 10 10 10 10 10 10 10 5 5 10 10 10 10 10];
nsec = length(sec);
```

Dados estatísticos do FCF's de cada subsector de medição

```
for isec=1:nsec
    if (sec(isec)+amp(isec) > 360)
        l=length(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
        FCFmed(isec)=mean(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
        FCFmin(isec)=min(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
        FCFmax(isec)=max(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
        FCFdp(isec)=std(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
        FCFrms(isec)=norm(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)))/sqrt(l);
        Cpsc2(isec)=(corr(V_rm(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)),V_tm(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)), 'type', 'pearson'))^2;
        nreg(isec)=length(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
    else
        l=length(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec))));
        FCFmed(isec)=mean(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec))));
        FCFmin(isec)=min(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
            D_rm<(sec(isec)+amp(isec))));
        FCFmax(isec)=max(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
```

```

D_rm<(sec(isec)+amp(isec)));
FCFdp(isec)=std(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
D_rm<(sec(isec)+amp(isec))));
FCFrms(isec)=norm(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
D_rm<(sec(isec)+amp(isec)))/sqrt(1);
Cpsc2(isec)=(corr(V_rm(D_rm>=(sec(isec)) & ...
D_rm<(sec(isec)+amp(isec))),V_tm(D_rm>=(sec(isec)) & ...
D_rm<(sec(isec)+amp(isec))),'type','pearson'))^2;
nreg(isec)=length(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & ...
D_rm<(sec(isec)+amp(isec))));
end
end

```

**Dados estatísticos do FCF's de cada subsetor de medição por gama de velocidade**

```

for isec=1:nsec

if (sec(isec)+amp(isec) > 360)
l=length(FCF(D_rm>=(sec(isec)) | D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
FCF_s=FCF(D_rm>=(sec(isec)) | D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360));
V_rm_s=V_rm(D_rm>=(sec(isec)) | D_rm<(sec(isec)+amp(isec)-360));
for v=4:0.5:16
jj=(v-3.5)/0.5;
nrec=length(FCF_s(V_rm_s >=v & V_rm_s < (v+0.5)));
if nrec>6
if v<16
FCF_s_med(jj,isec)=mean(FCF_s(V_rm_s >=v & ...
V_rm_s < (v+0.5)));
else
FCF_s_med(jj,isec)=mean(FCF_s(V_rm_s==v ));
end
else
FCF_s_med(jj,isec)=mean(FCF_s);
end
end
end
else

```

```

l=length(FCF(D_rm>=(sec(isec)) & D_rm<(sec(isec)+amp(isec))));
FCF_s=FCF(D_rm>=(sec(isec)) & D_rm<(sec(isec)+amp(isec)));
V_rm_s=V_rm(D_rm>=(sec(isec)) & D_rm<(sec(isec)+amp(isec)));
for v=4:0.5:16
    jj=(v-3.5)/0.5;
    nrec=length(FCF_s(V_rm_s >=v & V_rm_s < (v+0.5)));
    if nrec>6
        if v<16
            FCF_s_med(jj,isec)=mean(FCF_s(V_rm_s >=v & ...
                V_rm_s < (v+0.5)));
        else
            FCF_s_med(jj,isec)=mean(FCF_s(V_rm_s==v ));
        end
    else
        FCF_s_med(jj,isec)=mean(FCF_s)
    end
end
end
end
end

```

### Rosa dos FCF's

```

figure('name','Rosa dos FCFs')
htemp3=polar(sec(1),max(FCF));

%%Unidades dos eixos
hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );
for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));
    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    end
end

```

```

case 60
    set(hObj,'string','60$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 90
    set(hObj,'string','90$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 120
    set(hObj,'string','120$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 150
    set(hObj,'string','150$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 180
    set(hObj,'string','180$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 210
    set(hObj,'string','210$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 240
    set(hObj,'string','240$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 270
    set(hObj,'string','270$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 300
    set(hObj,'string','300$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
case 330
    set(hObj,'string','330$\^{\circ}$','Interpreter','latex');
end
end

hold on;
view(90,-90);

%%%Desenho do gráfico
sx=cos(D_rm*pi/180).*FCF;
sy=sin(D_rm*pi/180).*FCF;
hh=plot(sx,sy,'k. ');
FCFinv=FCF((D_rm>70 & D_rm<=220) | (D_rm>240 & D_rm<=310));
D_rminv=D_rm((D_rm>70 & D_rm<=220) | (D_rm>240 & D_rm<=310));
sx=cos(D_rminv*pi/180).*FCFinv;
sy=sin(D_rminv*pi/180).*FCFinv;
hhinv=plot(sx,sy,'r. ');
sth=0:1:360;
srr=ones(1,361);
sx=cos(sth*pi/180).*srr;

```

```

sy=sin(sth*pi/180).*srr;
hhss=plot(sx,sy,'b-');
sx=cos((sec+amp/2)*pi/180).*FCFmed;
sy=sin((sec+amp/2)*pi/180).*FCFmed;
hhm=plot(sx,sy,'g*');

```

### Folha de cálculo dos resultados

```
%%Tabelas
```

```

TABELAPtotal=[sec;FCFmed;FCFmin;FCFmax;FCFdp;FCFrms;Cpsc2;nreg];
TAB1=fopen('Tab_Periodo_total.xls','w');
fprintf(TAB1,'  Secção   FCFMédio  FCFMínimo  FCFMáximo ...
FCFDes.Padrão FCFRMS C.Pearson  Nr.Registos \n');
fprintf(TAB1,'   %8.0f    %8.6f    %8.6f    %8.6f    %8.6f    ...
%8.6f %8.6f    %8.0f          \n',TABELAPtotal);
fclose(TAB1)

```

```

TAB2=fopen('Tab_FCFmedios_setor_vel.xls','w');
fprintf(TAB2,' %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f ...
%8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f %8.6f \n',FCF_s_med');
fclose(TAB2)

```

```

%%Juntar tabelas num livro de cálculo
name = 'Resultados_SC_NSC.gnumeric';
comando_merge=['ssconvert --merge-to ' name ' Tab_Periodo_total.xls ...
Tab_FCFmedios_setor_vel.xls '];
comando_limpa=['rm -rf Tab_Periodo_total.xls Tab_FCFmedios_setor_vel.xls'];
system(comando_merge);
system(comando_limpa);

```

## A.3 Análise temporal

### A.3.1 Intervalo de tempo analisado

'Datas inicial e final da análise temporal das simulações'

```
datai=200807310010
```

```
dataf=200808080000
```

```
jdatei=date2jdate(datai);
```

```
jdatef=date2jdate(dataf);
```

### A.3.2 Importar os dados para análise

Dados medidos do Mastro referência

```
[ficheiro1,pasta1]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...  
Mastro referência Medidos',  
'caminho da diretoria do ficheiro1');  
importfile([pasta1 ficheiro1]);
```

```
V_rm_medi=data(:,3);
```

```
D_rm_medi=data(:,2);
```

```
DesV_rm_medi=data(:,6);
```

```
Datei=data(:,7);
```

```
jdate_medi=date2jdate(Datei);
```

```
%%Extrair dados para o intervalo de tempo definido para análise
```

```
V_rm_med=V_rm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
D_rm_med=D_rm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
Date=Datei(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
jdate_med=jdate_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
DesV_rm_med=DesV_rm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
Diadec=(jdate_med-jdatei)./(144); % dia decimal
```

```
D_rm_med = D_rm_med - (D_rm_med==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

**Dados medidos do Mastro temporário**

```
[ficheiro2,pasta2]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...
Mastro temporário Medidos','caminho da diretoria do ficheiro2');
importfile([pasta2 ficheiro2]);
```

```
Datei=data(:,7);
jdate_medi=date2jdate(Datei);
V_tm_medi=data(:,3);
D_tm_medi=data(:,2);
```

```
%%Extrair dados para o intervalo de tempo definido para análise}
\begin{verbatim}
```

```
V_tm_med=V_tm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
D_tm_med=D_tm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
D_rm_med = D_rm_med -(D_rm_med==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

**Dados WINDIE<sup>TM</sup> do Mastro referência**

```
[ficheiro3,pasta3]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...
Mastro referência Windie','caminho da diretoria do ficheiro3');
importfile([pasta3 ficheiro3]);
```

```
V_rm_windie=data(:,3);
D_rm_windie=data(:,2);
DesV_rm_windie=data(:,6);
```

```
D_rm_windie = D_rm_windie -(D_rm_windie==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

**Dados WINDIE<sup>TM</sup> do Mastro temporário**

```
[ficheiro4,pasta4]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...
Mastro Temporário Windie','caminho da diretoria do ficheiro4');
importfile([pasta4 ficheiro4]);
```

```
V_tm_windie=data(:,3);
D_tm_windie=data(:,2);
```

```
D_tm_windie = D_tm_windie -(D_tm_windie==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

### Dados WRF do Mastro referência

```
[ficheiro5,pasta5]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...  
Mastro referencia WRF','caminho da diretoria do ficheiro5');  
importfile([pasta5 ficheiro5]);
```

```
V_rm_wrf=data(:,3);  
D_rm_wrf=data(:,2);  
Datewrf=data(:,7);  
jdatewrf=date2jdate(Datewrf);  
Diadecwrf=(jdatewrf-jdatei)./(144); %dia decimal
```

```
D_rm_wrf = D_rm_wrf - (D_rm_wrf==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

## A.3.3 Cálculos

### Frequência da direção do vento no mastro referência

```
%%Setores de 30° de amplitude  
sec = 0:30:330;  
nsec = length(sec);  
amp = ones(1,nsec)*30;  
delta = amp/2
```

```
%%Medidos  
for isec = 1:nsec  
    if isec==1  
        nreg_med(isec)=length(D_rm_med(D_rm_med>=(sec(isec)-delta(isec)+360) ...  
                                | D_rm_med<(sec(isec) +delta(isec))));  
    else  
        nreg_med(isec)=length(D_rm_med(D_rm_med>=(sec(isec)-delta(isec)) ...  
                                & (D_rm_med<(sec(isec) +delta(isec))));  
    end  
end
```

```

freq_med=nreg_med/sum(nreg_med);

%%WINDIE
for isec = 1:nsec
    if isec==1
        nreg_windie(isec)=length(D_rm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec) - ...
            delta(isec)+360) | D_rm_windie<(sec(isec) + ...
            delta(isec))));
    else
        nreg_windie(isec)=length(D_rm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)- ...
            delta(isec)) & (D_rm_windie<(sec(isec) + ...
            delta(isec))));
    end
end

freq_windie=nreg_windie/sum(nreg_windie);

%%WRF
for isec = 1:nsec
    if isec==1
        nreg_wrf(isec) = length(D_rm_wrf(D_rm_wrf>=(sec(isec)-delta(isec)+360) | ...
            D_rm_wrf<(sec(isec) +delta(isec))));
    else
        nreg_wrf(isec) = length(D_rm_wrf(D_rm_wrf>=(sec(isec)-delta(isec)) & ...
            (D_rm_wrf<(sec(isec) +delta(isec))));
    end
end

freq_wrf=nreg_wrf/sum(nreg_wrf);

```

### Intensidade turbulenta

```

it_rm_med=(DesV_rm_med./V_rm_med)*100 ;
it_rm_windie=(DesV_rm_windie./V_rm_windie)*100;

```

### FCF

```

FCF_med=V_tm_med./V_rm_med;

```

```
FCF_windie=V_tm_windie./V_rm_windie;
```

### Regressões FCF Windie e FCF medidos

```
%% de 1ª ordem
[a0_1,a1_1,a2_1,a3_1,R_1]=metminquad(FCF_med,FCF_windie,1);
%% de 2ª ordem
[a0_2,a1_2,a2_2,a3_2,R_2]=metminquad(FCF_med,FCF_windie,2);
%% de 3ª ordem
[a0_3,a1_3,a2_3,a3_3,R_3]=metminquad(FCF_med,FCF_windie,3);

%FCF_Windie= a0 + a1*FCF_med + a2*FCF_med^2 + a3*FCF_med^3
```

## A.3.4 Gráficos dos dados medidos

### Direção do vento

```
%% Serie temporal
figure('name',' Direcções no mastro referência - medidos')
plot(Diadec,D_rm_med,'-m')
hold on
plot(Diadec,D_rm_med,'.k')
grid on
Y=ylabel('Dire\c{c}\~ao [^\circ]','Interpreter','latex')
X=xlabel('Dia ','Interpreter','latex')
set(gca,'YLim',[0 360])
set(gca,'XLim',[0 ceil(max(Diadec))])
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)
```

### %%Rosa de frequência

```
figure('Name','freq.dir_med')
htemp1= polar(sec(1),max(freq_med)*1)
YY=max(xlim);
```

```
%%%Unidades dos eixos

hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );

for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));

    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 60
        set(hObj,'string','60$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 90
        set(hObj,'string','90$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 120
        set(hObj,'string','120$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 150
        set(hObj,'string','150$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 180
        set(hObj,'string','180$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 210
        set(hObj,'string','210$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 240
        set(hObj,'string','240$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 270
        set(hObj,'string','270$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 300
        set(hObj,'string','300$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 330
        set(hObj,'string','330$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    end
end

hold on
```

```
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec

    sdt = (sec(isec)-delta(isec)) : delta(isec)/50 : (sec(isec)+delta(isec));

    sdf = freq_med(isec)*ones(1,101);

    sthetaf=[0 sdt 0];

    sradiuf=[0 sdf 0];

    sxf=cos(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    syf=sin(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    hf(isec)= fill (sxf,syf,[1 0 1])

end
```

### Velocidade do vento

```
%%serie temporal
figure('name','Velocidades no mastro referência - medidos')
plot(Diadec,V_rm_med,'-b')
hold on
plot(Diadec,V_rm_med,'.k')
grid on
Y=ylabel('{U}[m/s]','Interpreter','latex')
X=xlabel('Dia ','Interpreter','latex')
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)
```

### Intensidade turbulenta

```

%%serie temporal
figure('name',' Intensidades turbulentas no mastro referência - medidos')
plot(Diadec,it_rm_med,'-r')
hold on
plot(Diadec,it_rm_med,'.k')
grid on
Y=ylabel('${It}$ [%]', 'Interpreter', 'latex')
X=xlabel('Dia ', 'Interpreter', 'latex')
set(gca,'YLim',[0 30])
set(gca,'XLim',[0 ceil(max(Diadec))])
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)
set(gca,'YLim',[0 30])
set(gca,'XLim',[0 ceil(max(Diadec))])

```

### A.3.5 Gráficos dos dados medidos, WINDIE<sup>TM</sup> e WRF

#### Direção do vento

```

%% Serie temporal
figure('name','Direcções no mastro referência')
plot(Diadec,D_rm_windie,'-g')
hold on
plot(Diadecwrf,D_rm_wrf,'-r')
hold on
plot(Diadec,D_rm_med,'-k')
hold on
plot(Diadec,D_rm_windie,'.g')
hold on
plot(Diadecwrf,D_rm_wrf,'.r')
hold on
plot(Diadec,D_rm_med,'.k')
grid on
Y=ylabel('Dire\c{c}\~ao [^\circ]$', 'Interpreter', 'latex')
X=xlabel('Dia ', 'Interpreter', 'latex')
L=legend('Windie', 'WRF', 'Medidos')

```

```
set(gca,'YLim',[0 360])
set(gca,'XLim',[0 ceil(max(Diadec))])
set(X,'FontSize',18)
set(Y,'FontSize',18)

%%Rosa de frequência - WINDIE
figure('Name','freq.dir_windie')
htemp1= polar(sec(1),max(freq_windie)*1)
YY=max(xlim);

%%Unidades dos eixos

hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );

for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));

    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 60
        set(hObj,'string','60$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 90
        set(hObj,'string','90$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 120
        set(hObj,'string','120$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 150
        set(hObj,'string','150$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 180
        set(hObj,'string','180$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 210
        set(hObj,'string','210$\{\circ}$','Interpreter','latex');
    case 240
        set(hObj,'string','240$\{\circ}$','Interpreter','latex');
```

```
case 270
    set(hObj,'string','270$\{\circ}$','Interpreter','latex');
case 300
    set(hObj,'string','300$\{\circ}$','Interpreter','latex');
case 330
    set(hObj,'string','330$\{\circ}$','Interpreter','latex');
end
end

hold on
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec

    sdt = (sec(isec)-delta(isec)) : delta(isec)/50 : (sec(isec)+delta(isec));

    sdf = freq_windie(isec)*ones(1,101);

    sthetaf=[0 sdt 0];

    sradiuf=[0 sdf 0];

    sxf=cos(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    syf=sin(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    hf(isec)= fill (sxf,syf,[1 0 1])

end

%%Rosa de frequência - WRF

figure('Name','freq.dir_wrf')
htemp1= polar(sec(1),max(freq_wrf)*1)
YY=max(xlim);
```

```
%%%Unidades dos eixos

hHiddenText = findall(gca,'type','text');
Angles = 0 : 30 : 330;
hObjToDelete = zeros( length(Angles)-4, 1 );

for ang = Angles
    hObj = findall(hHiddenText,'string',num2str(ang));

    switch ang
    case 0
        set(hObj,'string','0$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 30
        set(hObj,'string','30$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 60
        set(hObj,'string','60$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 90
        set(hObj,'string','90$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 120
        set(hObj,'string','120$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 150
        set(hObj,'string','150$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 180
        set(hObj,'string','180$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 210
        set(hObj,'string','210$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 240
        set(hObj,'string','240$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 270
        set(hObj,'string','270$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 300
        set(hObj,'string','300$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    case 330
        set(hObj,'string','330$\{\circ\}$','Interpreter','latex');
    end
end

hold on
```

```
view(90,-90);

%%Desenho do gráfico

for isec=1:nsec

    sdt = (sec(isec)-delta(isec)) : delta(isec)/50 : (sec(isec)+delta(isec));

    sdf = freq_wrf(isec)*ones(1,101);

    sthetaf=[0 sdt 0];

    sradiuf=[0 sdf 0];

    sxf=cos(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    syf=sin(sthetaf*pi/180).*sradiuf;

    hf(isec)= fill (sxf,syf,[1 0 1])

end
```

### Velocidade do vento

```
%%serie temporal
figure('name','Velocidades no mastro referência')
plot(Diadec,V_rm_windie,'-g')
hold on
plot(Diadecwrf,V_rm_wrf,'-r')
hold on
plot(Diadec,V_rm_med,'-k')
hold on
plot(Diadec,V_rm_windie,'.g')
hold on
plot(Diadecwrf,V_rm_wrf,'.r')
hold on
plot(Diadec,V_rm_med,'.k')
```

```

grid on
Y=ylabel('{U}[m/s]', 'Interpreter', 'latex')
X=xlabel('Dia ', 'Interpreter', 'latex')
L=legend('Windie', 'WRF', 'Medidos')
set(gca, 'YLim', [0 22])
set(gca, 'XLim', [0 ceil(max(Diadec))])
set(X, 'FontSize', 18)
set(Y, 'FontSize', 18)

```

### Intensidade turbulenta

```

%%serie temporal
figure('name', 'Intensidades turbulentas no mastro referência')
plot(Diadec, it_rm_windie, '-g')
hold on
plot(Diadec, it_rm_med, '-k')
hold on
plot(Diadec, it_rm_windie, '.g')
hold on
plot(Diadec, it_rm_med, '.k')
grid on
Y=ylabel('${It}$ [%]', 'Interpreter', 'latex')
X=xlabel('Dia ', 'Interpreter', 'latex')
L=legend('Windie', 'Medidos')
set(gca, 'XLim', [0 ceil(max(Diadec))])
set(gca, 'YLim', [0 30])
set(X, 'FontSize', 18)
set(Y, 'FontSize', 18)

```

### FCF's

```

%%serie temporal
figure('name', 'FCFs ')
plot(Diadec, FCF_med, '-k')
hold on
plot(Diadec, FCF_windie, '-g')
hold on
plot(Diadec, FCF_med, '.k')

```

```
grid on
plot(Diadec,FCF_windie, '.g')
hold on
Y=ylabel('FCF', 'Interpreter', 'latex')
X=xlabel('Dia', 'Interpreter', 'latex')
L=legend('Medidos', 'Windie')
set(gca, 'YLim', [0.7 1.3])
set(gca, 'XLim', [0 ceil(max(Diadec))])
set(X, 'FontSize', 18)
set(Y, 'FontSize', 18)

%%FCF Windie vs FCF medidos - regressão linear e dispersão de pontos

%% regressão linear
FCF_windie_R_1=a0_1+a1_1*FCF_med

figure('Name', 'FCF_Windie vs FCF_med')
plot(FCF_med,FCF_windie, '. ')
hold on
plot(FCF_med,FCF_windie_R_1, '-k')
Y=ylabel('$FCF_{windie}$', 'Interpreter', 'latex')
X=xlabel('$FCF_{medidos}$', 'Interpreter', 'latex')
set(gca, 'YLim', [0.7 1.3])
set(gca, 'XLim', [0.7 1.3])
axis square
set(X, 'FontSize', 14)
set(Y, 'FontSize', 14)
```

## A.4 Análise FCF's do NSC

### A.4.1 Intervalo de tempo analisado

'Datas inicial e final da análise temporal das simulações'

```
datai=200807310010
```

```
dataf=200808080000
```

```
jdatei=date2jdate(datai);
```

```
jdatef=date2jdate(dataf);
```

### A.4.2 Importar os dados para análise

Dados medidos do Mastro referência

```
[ficheiro1,pasta1]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do  
Mastro referência Medidos','caminho da diretoria do ficheiro1');  
importfile([pasta1 ficheiro1]);
```

```
V_rm_medi=data(:,3);
```

```
D_rm_medi=data(:,2);
```

```
Datei=data(:,7);
```

```
jdate_medi=date2jdate(Datei);
```

```
%%Extrair dados para o intervalo de tempo definido para análise
```

```
V_rm_medi=V_rm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
D_rm_medi=D_rm_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
Datei>Datei(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
jdate_medi=jdate_medi(jdate_medi>=jdatei & jdate_medi<=jdatef);
```

```
Diadeci=(jdate_medi-jdatei)./(144); % dia decimal
```

```
D_rm_medi = D_rm_medi - (D_rm_medi==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

**Dados medidos do Mastro temporário**

```
[ficheiro2,pasta2]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...
Mastro temporário Medidos','caminho da diretoria do ficheiro2');
importfile([pasta2 ficheiro2]);

Datei=data(:,7);
jdate_medi_aux=date2jdate(Datei);
V_tm_medi=data(:,3);
D_tm_medi=data(:,2);

%%Extrair dados para o intervalo de tempo definido para análise

V_tm_medi=V_tm_medi(jdate_medi_aux>=jdatei & jdate_medi_aux<=jdatef);
D_tm_medi=D_tm_medi(jdate_medi_aux>=jdatei & jdate_medi_aux<=jdatef);

D_rm_medi = D_rm_medi -(D_rm_medi==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

**Dados Windie do Mastro referência**

```
[ficheiro3,pasta3]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ...
Mastro referência Windie','caminho da diretoria do ficheiro3');
importfile([pasta3 ficheiro3]);

%%Extrair dados para o intervalo de tempo definido para análise

V_rm_windiei=data(:,3);
D_rm_windiei=data(:,2);

D_rm_windiei = D_rm_windiei -(D_rm_windiei==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

**Dados Windie do Mastro temporário**

```
[ficheiro4,pasta4]=uigetfile('*','Selecione ficheiro de dados do ....
Mastro Temporário Windie','caminho da diretoria do ficheiro4');
importfile([V_tm_windiei=data(:,3);

D_tm_windiei=data(:,2);
```

```
D_tm_windiei = D_tm_windiei -(D_tm_windiei==360)*360; % transforma 360° em 0°
```

### A.4.3 Filtrar dados pela velocidade e direção no mastro referência

#### Dados medidos

```
V_rm_med=V_rm_medi(((D_rm_medi>=0 & D_rm_medi<70) | ...
(D_rm_medi>=220 & D_rm_medi<240) | (D_rm_medi>=310 & D_rm_medi<360)) & ...
(V_rm_medi>=4 & V_rm_medi<=16 ));
V_tm_med=V_tm_medi(((D_rm_medi>=0 & D_rm_medi<70) | ...
(D_rm_medi>=220 & D_rm_medi<240) | (D_rm_medi>=310 & D_rm_medi<360)) & ...
(V_rm_medi>=4 & V_rm_medi<=16 ));
D_rm_med=D_rm_medi(((D_rm_medi>=0 & D_rm_medi<70) | (D_rm_medi>=220 & ...
D_rm_medi<240) | (D_rm_medi>=310 & D_rm_medi<360)) & ...
(V_rm_medi>=4 & V_rm_medi<=16 ));
```

#### Dados Windie

```
V_rm_windie=V_rm_windiei(((D_rm_windiei>=0 & D_rm_windiei<70) | ...
(D_rm_windiei>=220 & D_rm_windiei<240) | ...
(D_rm_windiei>=310 & D_rm_windiei<360)) & ...
(V_rm_windiei>=4 & V_rm_windiei<=16 ));
V_tm_windie=V_tm_windiei(((D_rm_windiei>=0 & D_rm_windiei<70) | ...
(D_rm_windiei>=220 & D_rm_windiei<240) | ...
(D_rm_windiei>=310 & D_rm_windiei<360)) & ...
(V_rm_windiei>=4 & V_rm_windiei<=16 ));
D_rm_windie=D_rm_windiei(((D_rm_windiei>=0 & D_rm_windiei<70) | ...
(D_rm_windiei>=220 & D_rm_windiei<240) | ...
(D_rm_windiei>=310 & D_rm_windiei<360)) & ...
(V_rm_windiei>=4 & V_rm_windiei<=16 ));
```

### A.4.4 Cálculos

#### FCF's

```
FCF_med=V_tm_med./V_rm_med;
FCF_windie=V_tm_windie./V_rm_windie;
```

## Dados estatísticos do FCF's de cada subsetor de medição

```

%%Setor de medição

sec = [ 0 10 20 30 40 50 60 220 230 235 310 320 330 340 350];
amp = [10 10 10 10 10 10 10 10 5 5 10 10 10 10 10];
nsec = length(sec);

%%Medidos

for isec=1:nsec

    if (sec(isec)+amp(isec) > 360)
        nreg_windiei(isec)=length(V_rm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
            D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)));

        if nreg_windiei(isec) >= 6

            FCF_windie_min(isec)=min(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            FCF_windie_max(isec)=max(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            FCF_windie_mean(isec)=mean(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            FCF_windie_dp(isec)=std(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            Cpssc2_windie(isec)=(corr(V_rm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)),...
                V_tm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec)-360)), 'type', 'pearson'))^2;
            nreg_windie=nreg_windiei;
        else

            FCF_windie_min(isec) = 0;
            FCF_windie_max(isec) = 0;
            FCF_windie_mean(isec) = 0;
            FCF_windie_dp(isec) = 0;
        end
    end
end

```

```

        Cpsc2_windie(isec)=0;
        nreg_windie=0;

    end

else
    nreg_windiei(isec)=length(V_rm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))));

    if nreg_windiei (isec) >= 6

        FCF_windie_min(isec)=min(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) & ...
        D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))));
        FCF_windie_max(isec)=max(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) & ...
        D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))));
        FCF_windie_mean(isec)=mean(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) & ..
        D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))));
        FCF_windie_dp(isec)=std(FCF_windie (D_rm_windie>=(sec(isec)) & ...
        D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))));
        Cpsc2_windie(isec)=(corr(V_rm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)) & ...
        D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))),...
        V_tm_windie(D_rm_windie>=(sec(isec)) & ...
        D_rm_windie<(sec(isec)+amp(isec))),'type','pearson')^2;
        nreg_windie=nreg_windiei;
    else

        FCF_windie_min(isec) = 0;
        FCF_windie_max(isec) = 0;
        FCF_windie_mean(isec) = 0;
        FCF_windie_dp(isec) = 0;
        Cpsc2_windie(isec)=0;
        nreg_windie=0;

    end

end

end
end

```

```

%% Windie

for isec=1:nsec

    if (sec(isec)+amp(isec) > 360)
        nreg_medi(isec)=length(V_rm_med(D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
            D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)));

        if nreg_medi(isec) >= 6

            FCF_med_min(isec)=min(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            FCF_med_max(isec)=max(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            FCF_med_mean(isec)=mean(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            FCF_med_dp(isec)=std(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)));
            Cpsc2_med(isec)=(corr(V_rm_med(D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)),...
                V_tm_med(D_rm_med>=(sec(isec)) | ...
                D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec)-360)),'type','pearson'))^2;
            nreg_med=nreg_medi;
        else

            FCF_med_min(isec) = 0;
            FCF_med_max(isec) = 0;
            FCF_med_mean(isec) = 0;
            FCF_med_dp(isec) = 0;
            Cpsc2_med(isec)=0;
            nreg_med=0;
        end

    else

        nreg_medi(isec)=length(V_rm_med(D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
            D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))));

        if nreg_medi(isec) >= 6

```

```

FCF_med_min(isec)=min(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))));
FCF_med_max(isec)=max(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))));
FCF_med_mean(isec)=mean(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))));
FCF_med_dp(isec)=std(FCF_med (D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))));
Cpsc2_med(isec)=(corr(V_rm_med(D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))), ...
    V_tm_med(D_rm_med>=(sec(isec)) & ...
    D_rm_med<(sec(isec)+amp(isec))), 'type', 'pearson'))^2
nreg_med=nreg_medi;
else
    FCF_med_min(isec) = 0;
    FCF_med_max(isec) = 0;
    FCF_med_mean(isec) = 0;
    FCF_med_dp(isec) = 0;
    Cpsc2_med(isec)=0;
    nreg_med=0;
end
end

Freq_med=nreg_med/sum(nreg_med);
Freq_Windie=nreg_windie/sum(nreg_windie);

Erro_rel_final_FCF = abs((FCF_med_mean-FCF_windie_mean)./FCF_med_mean);
Erro_abs_final_FCF = abs(FCF_med_mean-FCF_windie_mean);

Erro_rel_global=sum(Erro_rel_final_FCF.*Freq_Windie);
Erro_abs_global=sum(Erro_abs_final_FCF.*Freq_Windie);

end

```

**Erros**

```

%% Frequência das ocorrências por subsetor de medição
%% subsetores analisados para mais de seis ocorrências de vento
%% no periodo analisado

Freq_med=nreg_med/sum(nreg_med);
Freq_Windie=nreg_windie/sum(nreg_windie);

Erros final
Erro_rel_final_FCF = abs((FCF_med_mean-FCF_windie_mean)./FCF_med_mean);
Erro_abs_final_FCF = abs(FCF_med_mean-FCF_windie_mean);

Erro final pesado pela frequência de ocorrência
Erro_rel_global=sum(Erro_rel_final_FCF.*Freq_Windie);
Erro_abs_global=sum(Erro_abs_final_FCF.*Freq_Windie);

```

**A.4.5 Folha de cálculo dos resultados**

```

%%Tabelas

TABELA1=[sec;FCF_med_min;FCF_med_max;FCF_med_mean;FCF_med_dp;Cpsc2_med; ...
nreg_med;Freq_med];
TAB1=fopen('FCF_med_Est.xls','w');
fprintf(TAB1,'  Secção FCFmin  FCFmax  FCFmean FCFdp  C.Pearson ...
Nr.Reg.  frequência \n');
fprintf(TAB1,'  %8.0f  %8.6f  %8.6f  %8.6f  %8.6f  %8.6f  ...
%8.0f  %8.2f  \n',TABELA1);
fclose(TAB1)

TABELA2=[sec;FCF_windie_min;FCF_windie_max;FCF_windie_mean;FCF_windie_dp; ...
Cpsc2_windie;nreg_windie;Freq_Windie];
TAB2=fopen('FCF_windie_Est.xls','w');
fprintf(TAB2,'  Secção FCFmin  FCFmax  FCFmean FCFdp  ...
C.Pearson Nr.Reg.  frequência \n');
fprintf(TAB2,'  %8.0f  %8.6f  %8.6f  %8.6f  %8.6f  ...

```

```
%8.6f    %8.0f    %8.2f    \n',TABELA2);
fclose(TAB2)

TABELA3=[sec;Erro_rel_final_FCF;Erro_abs_final_FCF];
TAB3=fopen('Erros_final_FCFs.xls','w');
fprintf(TAB3,'  Secção Erro_relativo Erro_absoluto \n');
fprintf(TAB3,'    %8.0f    %8.6f          %8.6f          \n',TABELA3);
fclose(TAB3)%

%%Juntar tabelas num livro de cálculo
name = 'Analise_FCFs_final.gnumeric';
comando_merge=['ssconvert --merge-to ' name ' FCF_windie_Est.xls ...
FCF_med_Est.xls Erros_final_FCFs.xls '];
comando_limpa=['rm -rf FCF_windie_Est.xls FCF_med_Est.xls ...
Erros_final_FCFs.xls'];
system(comando_merge);
system(comando_limpa);
```

# Apêndice B

## Configuração WRF

### B.1 Ficheiro de pré-processamento : namelist.wps

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 3,
start_date = '2008-06-30_00:00:00', '2008-06-30_00:00:00', '2008-06-30_00:00:00',
end_date   = '2008-07-08_00:00:00', '2008-07-08_00:00:00', '2008-07-08_00:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
/

&geogrid
parent_id          = 1,1,2
parent_grid_ratio = 1,3,3
i_parent_start     = 1,6,22
j_parent_start     = 1,6,22
e_we               = 33,67,67
e_sn               = 33,67,67
geog_data_res      = '30s', '30s', '30s',
dx = 27000,
dy = 27000,
map_proj = 'mercator',
ref_lat  = 37.373750,
ref_lon  = -08.118028,
```

```
truelat1 = 37.373750,
truelat2 = 37.373750,
stand_lon = -08.118028,
geog_data_path = '/mnt/data/input/TOPO/GEO_V3/',
opt_geogrid_tbl_path = './',
/

&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix = 'FILE',
/

&metgrid
  fg_name = 'FILE'
  io_form_metgrid = 2,
  opt_metgrid_tbl_path = './',
/

&bdy_control
  spec_bdy_width           = 5,
  spec_zone                = 1,
  relax_zone               = 4,
  specified                = .true., .false., .false.,
  nested                   = .false., .true., .true.,
/

&grib2
/

&namelist_quilt
  nio_tasks_per_group = 0,
  nio_groups = 1,
/
```

## B.2 Ficheiro de processamento : namelist.input

```

&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2008, 2008, 2008,
start_month        = 07,  07,  07,
start_day          = 31,  31,  31,
start_hour         = 00,  00,  00,
start_minute       = 00,  00,  00,
start_second       = 00,  00,  00,
end_year           = 2008, 2008, 2008,
end_month          = 08,  08,  08,
end_day            = 08,  08,  08,
end_hour           = 00,  00,  00,
end_minute         = 00,  00,  00,
end_second         = 00,  00,  00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,.true.,.true.,
history_interval   = 180, 60,  20,
frames_per_outfile = 2000, 2000, 2000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 5000,
io_form_history    = 2,
io_form_restart    = 2,
io_form_input      = 2,
io_form_boundary   = 2,
debug_level        = 0,
iofields_filename  = io_config_d01.txt,io_config_d02.txt,io_config_d03.txt,
ignore_iofields_warning = .true.,
/

&domains
eta_levels   = 1.000, 0.993, 0.98, 0.966, 0.95,
              0.933, 0.913, 0.892, 0.869, 0.844,
              0.816, 0.786, 0.753, 0.718, 0.68,

```

```

0.639, 0.596, 0.55, 0.501, 0.451,
0.398, 0.345, 0.29, 0.236, 0.188,
0.145, 0.108, 0.075, 0.046, 0.021,
0.000,

time_step                = 135,
time_step_fract_num      = 0,
time_step_fract_den      = 1,
max_dom                  = 3,
e_we                    = 33,    67,    67,
e_sn                    = 33,    67,    67,
e_vert                  = 31,    31,    31,
p_top_requested          = 5000,
num_metgrid_levels      = 27,
num_metgrid_soil_levels = 4,
dx                      = 27000, 9000, 3000,
dy                      = 27000, 9000, 3000,
grid_id                 = 1,     2,     3,
parent_id               = 0,     1,     2,
i_parent_start          = 0,     06,    22,
j_parent_start          = 0,     06,    22,
parent_grid_ratio       = 1,     3,     3,
parent_time_step_ratio  = 1,     3,     3,
feedback                = 1,
smooth_option           = 2
/

&physics
mp_physics              = 6,     6,     6,
ra_lw_physics           = 1,     1,     1,
ra_sw_physics           = 1,     1,     1,
radt                    = 30,    30,    30,
sf_sfclay_physics      = 1,     1,     1,
sf_surface_physics     = 1,     1,     1,
bl_pbl_physics          = 1,     1,     1,
bldt                    = 0,     0,     0,
cu_physics              = 1,     1,     0,
cudt                    = 5,     5,     5,

```

```
isfflx           = 1,
ifsnow           = 0,
icloud           = 1,
surface_input_source = 1,
num_soil_layers  = 2,
sf_urban_physics = 0,
maxiens          = 1,
maxens           = 3,
maxens2          = 3,
maxens3          = 16,
ensdim           = 144,
/

&fdda
/

&dynamics
rk_ord           = 3,
w_damping        = 0,
diff_opt         = 2,
km_opt           = 2,
diff_6th_opt     = 0,      0,      0,
diff_6th_factor  = 0.12,  0.12,  0.12,
base_temp        = 290.
damp_opt         = 0,
zdamp            = 5000.,  5000.,  5000.,
dampcoef         = 0.01,   0.2,   0.2
khdif            = 0,      0,      0,
kvdif            = 0,      0,      0,
non_hydrostatic  = .true., .true., .true.,
moist_adv_opt    = 1,      1,      1,
scalar_adv_opt   = 1,      1,      1,
h_mom_adv_order  = 5,
v_mom_adv_order  = 3,
h_sca_adv_order  = 5,
v_sca_adv_order  = 3,
/
```



# Apêndice C

## Configuração WINDIE<sup>TM</sup>

### C.1 Ficheiro de pré-processamento : preproc.cfg

```
#GSURF
nit          = 4074      !x-dimension of topo data
njt          = 4074      !y-dimension of topo data
cofx         = 150.0     !cofx
cofy         = 150.0     !cofy
xmin         = -10000.0  !xmin
xmax         = +10000.0  !xmax
ymin         = -10000.0  !ymin
ymax         = +10000.0  !ymax
alfalayer    = 2500.0    !alfa layer
npassfilter  = 15        !npassfilter
:

#GROUG
nir          = 4074      !x-dimension of roughness data
njr          = 4074      !y-dimension of roughness data

#MESH ROTATION
rot          = 270.0     !wind direction
xcentre      = 578187.8   !x-coordinate of site centre
ycentre      = 4136646.2  !y-coordinate of site centre
```

```
#MESOSCALE
wrf_file      = wrfout.nc      !file to be read by wsurf and wprep
wrfM_data     = wrfdata.nc     !file to be read by wprepM
nim           = 67
njm           = 67
nkm           = 31
utm_zone      = 29
xcentrem     = 569144.5
ycentrem     = 4127634.8
init_wrf_step = 001
iend_wrf_step = 577
xutm_targetpoint = 569144.5    !x-utm monitoring point coordinates
yutm_targetpoint = 4127634.8    !y-utm monitoring point coordinates
zagl_targetpoint = 83.0        !zagl monitoring point coordinates
icontrol     = 1              !1 - all the proc 2 - only interpolation

#GCANO
nic          = 1601           !x-dimension of forest data
njc          = 1601           !y-dimension of forest data

#GMESH
zmax         = 4500.0         !top boundary altitude
cofz         = 5.000          !height of the first CV above ground level
zpz0         = 0              !add z0 to z
```

## C.2 Ficheiro de processamento : windie.cfg

```
# GRID_DIMENSIONS
nig          = 102          #
njg          = 102          #
nkg          = 061          #

# DOMAIN PARTITION
autopart     = 1           #
nid          = 03          #
njd          = 03          #
nkd          = 01          #

# STEADY-TRANSIENT
recalc       = 1           #
itrans       = 1           #
sormax       = 0.00085     #
nitermax     = 9000000     #
nnitermax    = 010         #
dtime        = 01.000     #
timemax      = 1000000.0   #
ivduwrite    = 100         # deprecated
istwrite     = 100         #
itrwrite     = 300         #
irfwrite     = 600         #
outputlevel  = 1           # 0->stealth,only Rfs RRs, 1-> windie.res, 2-> all

# GROUND_COVER
iroug        = 1           #
roug0        = 0.03        # check default value of roug.dat
icano        = 0           #

# THERMODYNAMICS
itemp        = 1           #
iprandtl     = 1           # 0 - constant Prandtl, 1 - variable Prandtl
prt0         = 0.74        # contant Prandtl number
t00          = 302.0       #
fbv          = 0.01        #
```

```
cpp                = 1005.                #

# BOUNDARY CONDITIONS
ibcs               = 1                    # 0- synthetic 1-coupled
ibcsk              = 1                    # 0- without k coupling 1- with k coupling

# MESOSCALE COUPLING
dtimemeso         = 1200.                # time between WRF output's #

# CORIOLIS
icoriolis         = 1                    #
fcoriolis         = 9.54e-5              #

# SPONGES
alfavu            = 0.010                 #
alfave            = 0.010                 #
alfahu            = 0.010                 #
alfahe            = 0.010                 #
alfal             = 0.010                 #
xd                = 0500.0               #
yd                = 0500.0               #
zd                = 3500.0               #

# PHYSICS
density           = 1.205                 #
viscos            = 1.85E-5               #
ustar             = 0.40                  #
deltam            = 1500.0               #
cmu0              = 0.033                #
cappa            = 0.40                   #
grav              = 9.8                   #

# TURBULENCE MODELS
iturbmod          = 4                    #1-> ke, 2-> keREALIZ, 3-> keRNG,
# 4-> tke, 5-> Smagorinsky

# NUMERICAL PARAMETERS
iconvscheme       = 4                    #1-> upwind, 2-> 2th order 4-> 4th order
```

```
iordempres      = 3                #1-> linear 3-> 3 order
```

```
# MONITORING POINT
```

```
#xmon           = 727297.9         #
```

```
#ymon           = 4746316.0        #
```

```
#zmon           = 050.0            #
```

```
#imon           = 22               #
```

```
#jmon           = 22               #
```

```
#kmon           = 13               #
```

```
# OUTPUT CONTROL
```

```
ignuplot        = 0                #
```

