

**Simulação computacional de escoamentos atmosféricos sobre  
regiões montanhosas através de aplicação comercial -  
WINDSIM**

*António Manuel Conceição Silva Oliveira*

**Relatório do projecto final**

Orientadores:

Professor José Manuel Laginha Mestre da Palma

Dr. Carlos Miguel Pereira da Silva Santos



**FEUP**

**Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica**

Julho de 2009

## Agradecimentos

PROF. JOSÉ LAGINHA PALMA, pela sua supervisão, paciência, ensinamentos e encorajamento ao longo deste trabalho.

DR. CARLOS SILVA SANTOS, pelos seus conselhos, supervisão e capacidade de ajudar quando as coisas não correram conforme o previsto.

RUI MOURA, pelo companheirismo, conselhos e a amizade demonstrada nas alturas difíceis deste trabalho.

As palavras tolerância, compreensão e ajuda, descrevem o papel que a minha namorada ROSA FERREIRA teve ao longo deste trabalho. Para Ela um sincero obrigado.

## Resumo

O estudo do escoamento atmosférico sobre regiões montanhosas é de importância extrema para a vida útil dos aerogeradores. Com a aplicação comercial WINDSIM é feito um estudo do campo tridimensional dos escoamentos dominantes numa determinada região de Portugal para qual está projectado um parque eólico.

Este trabalho inicia-se com a introdução à Mecânica dos Fluidos computacional através da utilização da aplicação comercial genérica FLUENT e revisão bibliográfica. Após esta fase, inicia-se o trabalho propriamente dito, começando-se a usar o WINDSIM na versão “trial” para um estudo preliminar. Para os cálculos finais, é fornecido um conjunto de especificações dos parâmetros das simulações, para permitir uma futura comparação com outros modelos. Estas especificações focam-se no tamanho do domínio, número de elementos, modelos de turbulência e perfis de entrada.

O “layout” do parque a implementar na área de interesse é também fornecido, com a respectiva posição dos aerogeradores e estações de medição. O terreno em estudo é bastante complexo e é rodeado de outras montanhas com formas semelhantes. O regime de ventos da zona privilegia as direcções de escoamento sudeste e noroeste.

Com os resultados das simulações constroem-se mapas de contornos, perfis verticais, tabelas com resultados pontuais na zona dos aerogeradores. Uma validação dos resultados é feita para verificar o grau de correlação dos dados numéricos com os dados experimentais. Com estes resultados faz-se a análise do “layout” dos aerogeradores. A análise de convergência dos resultados também é apresentada.

Para a turbulência o aerogerador WTG8 é o que tem o resultado mais elevado da intensidade. Para a inclinação do escoamento o aerogerador WTG6 está fora dos parâmetros normais ( $-8^\circ < \text{inclinação} < 8^\circ$ ) no conjunto global das direcções. São detectados bastantes valores negativos para o shear factor muito próximos de 0 (limite inferior para boa operacionalidade) nas zonas dos aerogeradores, mas estes valores podem não ser factores de exclusão para a sua implementação.

## Abstract

The study of atmospheric flow over mountainous regions is of extreme importance for the life of wind turbines. With the commercial application WINDSIM a three-dimensional field study is made of the dominant flow in a region of Portugal, where wind farm is planned.

This work begins with the introduction to computational fluid dynamics through the use of generic commercial application FLUENT and literature review. After this, preliminary simulations are performed using the trial version of WINDSIM. For the final calculations, a set of specifications for the parameters of the simulations are provided to enable a future comparison with other models. These specifications focus on the size of domain, number of elements, turbulence models and inlet profiles.

The layout of the park to implement in the area of interest is also provided, with the position of wind turbines and measuring masts. The terrain under study is very complex and is surrounded by mountains of similar complexity. The local wind regime, favours the southeast and northwest flow directions.

Maps of contours, vertical profiles and tables with specific results in the area of wind turbines are constructed from the numerical results. A validation of the results is made to verify the correlation between numerical and experimental data. With these results, an analysis of the layout of wind turbines is made. The analysis of the convergence of results is also presented.

Regarding turbulence, wind turbine WTG8 has the highest intensity result. The inflow angle to the wind turbine WTG6 is outside of the normal ( $-8^\circ < \text{inflow angle} < 8^\circ$ ) parameters in all directions. Negative values of shear factor were found near the lower limit value 0 (lower limit for proper operation) in areas of wind turbine location. However, these values may not have necessarily prevented the local implementation of wind turbines.

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Metodologia</b>	<b>17</b>
2.1	Equações de Navier Stokes . . . . .	17
2.2	Equações “Reynolds Averaged Navier-Stokes” . . . . .	18
2.2.1	Modelo de turbulência $k - \varepsilon$ . . . . .	18
2.3	Modelação numérica . . . . .	19
2.4	Camada limite atmosférica . . . . .	20
2.5	Programa . . . . .	21
2.5.1	Terreno . . . . .	22
2.5.2	Campo de escoamentos . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Simulações</b>	<b>26</b>
3.1	Descrição do problema . . . . .	26
3.1.1	Descrição do terreno . . . . .	28
3.1.2	Descrição do regime de ventos . . . . .	29
3.2	Estudo preliminar - versão “trial” . . . . .	30
3.2.1	Resultados WINDSIM . . . . .	32
3.2.2	Resultados FLUENT . . . . .	33
3.3	Cálculos finais . . . . .	34
3.3.1	Validação dos resultados . . . . .	36
3.3.2	Resultados WINDSIM . . . . .	42
3.3.2.1	Campo de velocidades . . . . .	42
3.3.2.2	Campo da intensidade de turbulência . . . . .	44

3.3.2.3	Campo da inclinação do escoamento . . . . .	47
3.3.2.4	Análise da convergência . . . . .	48
3.3.2.5	Análise do “layout” dos aerogeradores de acordo com os resultados numéricos . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Conclusões</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Cálculos preliminares - resultados</b>	<b>63</b>
<b>B</b>	<b>Validação do modelo - tabelas de erros</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>Mapas de contornos</b>	<b>72</b>
<b>D</b>	<b>Aerogeradores - perfis verticais e tabelas</b>	<b>100</b>
<b>E</b>	<b>Malha na direcção vertical</b>	<b>132</b>
<b>F</b>	<b>Diferença de alturas - terreno original versus terreno suavizado</b>	<b>133</b>
<b>G</b>	<b>Dados meteorológicos</b>	<b>137</b>
<b>H</b>	<b>Gráficos de comparação dos resultados finais - WINDSIM/FLUENT</b>	<b>147</b>
<b>I</b>	<b>Functions MATLAB</b>	<b>149</b>

# Lista de Figuras

1.1	Falha estrutural num aerogerador . . . . .	15
3.1	Imagem do terreno em alta resolução . . . . .	28
3.2	“Layout” dos aerogeradores (WTGs) e estações de medição . . . . .	29
3.3	Mapa do terreno rodado nas direcções principais . . . . .	32
3.4	Evolução dos resíduos pesados - exemplo 113° - versão “trial” . . . . .	34
3.5	Evolução dos resíduos para 105° . . . . .	36
3.6	Malha - plano xy . . . . .	37
3.7	Campo de velocidades 120° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	43
3.8	Campo de velocidades 300° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	44
3.9	Campo da intensidade de turbulência 112.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	45
3.10	Campo da intensidade de turbulência 300° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	46
3.11	Campo da inclinação do escoamento 105°, os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	47
3.12	Campo da inclinação do escoamento 315°, os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	48
3.13	Perfis de velocidade adimensionalizados WTG7 . . . . .	51
3.14	Perfis de velocidade adimensionalizados WTG3 . . . . .	51
3.15	Perfis da intensidade de turbulência WTG8 . . . . .	52
3.16	Intensidade de turbulência para o escoamento a 113° . . . . .	53
3.17	Perfis da inclinação do escoamento WTG6 . . . . .	54

A.1	Campo de velocidades 3D - versão “trial” - 113°e 135°, os triângulos designam a posição das estações de medição. . . . .	63
A.2	Campo de velocidades 3D - versão “trial” - 293°e 315°, os triângulos designam a posição das estações de medição. . . . .	64
A.3	Campo da intensidade de turbulência - versão “trial” - 113°e 135°, os triângulos designam a posição das estações de medição. . . . .	65
A.4	Campo da intensidade de turbulência - versão “trial” - 293°e 315°, os triângulos designam a posição das estações de medição. . . . .	65
A.5	Campo de velocidades 3D - FLUENT - 113°e 135° . . . . .	66
A.6	Campo de velocidades 3D - FLUENT - 293°e 315° . . . . .	66
A.7	Campo da intensidade de turbulência - FLUENT - 113°e 135° . . . . .	67
A.8	Campo da intensidade de turbulência - FLUENT - 293°e 315° . . . . .	67
C.1	Campo de velocidades 105°, 112.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	72
C.2	Campo de velocidades 120°, 127.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	73
C.3	Campo de velocidades 135°, 142.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	73
C.4	Campo de velocidades 105°, 112.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	74
C.5	Campo de velocidades 120°, 127.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	74
C.6	Campo de velocidades 135°, 142.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	75
C.7	Campo de velocidades 105°, 112.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	75
C.8	Campo de velocidades 120°, 127.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	76
C.9	Campo de velocidades 135°, 142.5° (h=126m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	76
C.10	Campo de velocidades 285°, 292.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	77
C.11	Campo de velocidades 300°, 307.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	77

C.12 Campo de velocidades $315^\circ, 322.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	78
C.13 Campo de velocidades $285^\circ, 292.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	78
C.14 Campo de velocidades $300^\circ, 307.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	79
C.15 Campo de velocidades $315^\circ, 322.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	79
C.16 Campo de velocidades $285^\circ, 292.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	80
C.17 Campo de velocidades $300^\circ, 307.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	80
C.18 Campo de velocidades $315^\circ, 322.5^\circ$ (h=126m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	81
C.19 Campo da intensidade de turbulência $105^\circ, 112.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	82
C.20 Campo da intensidade de turbulência $120^\circ, 127.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	82
C.21 Campo da intensidade de turbulência $135^\circ, 142.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	83
C.22 Campo da intensidade de turbulência $105^\circ, 112.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	83
C.23 Campo da intensidade de turbulência $120^\circ, 127.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	84
C.24 Campo da intensidade de turbulência $135^\circ, 142.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	84
C.25 Campo da intensidade de turbulência $105^\circ, 112.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	85
C.26 Campo da intensidade de turbulência $120^\circ, 127.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	85
C.27 Campo da intensidade de turbulência $135^\circ, 142.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	86
C.28 Campo da intensidade de turbulência $285^\circ, 292.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	86

C.29 Campo da intensidade de turbulência $300^\circ, 307.5^\circ$ ( $h=44$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	87
C.30 Campo da intensidade de turbulência $315^\circ, 322.5^\circ$ ( $h=44$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	87
C.31 Campo da intensidade de turbulência $285^\circ, 292.5^\circ$ ( $h=85$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	88
C.32 Campo da intensidade de turbulência $300^\circ, 307.5^\circ$ ( $h=85$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	88
C.33 Campo da intensidade de turbulência $315^\circ, 322.5^\circ$ ( $h=85$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	89
C.34 Campo da intensidade de turbulência $285^\circ, 292.5^\circ$ ( $h=126$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	89
C.35 Campo da intensidade de turbulência $300^\circ, 307.5^\circ$ ( $h=126$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	90
C.36 Campo da intensidade de turbulência $315^\circ, 322.5^\circ$ ( $h=126$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	90
C.37 Campo da inclinação do escoamento $105^\circ, 112.5^\circ$ ( $h=44$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	91
C.38 Campo da inclinação do escoamento $120^\circ, 127.5^\circ$ ( $h=44$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	91
C.39 Campo da inclinação do escoamento $135^\circ, 142.5^\circ$ ( $h=44$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	92
C.40 Campo da inclinação do escoamento $105^\circ, 112.5^\circ$ ( $h=85$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	92
C.41 Campo da inclinação do escoamento $120^\circ, 127.5^\circ$ ( $h=85$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	93
C.42 Campo da inclinação do escoamento $135^\circ, 142.5^\circ$ ( $h=85$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	93
C.43 Campo da inclinação do escoamento $105^\circ, 112.5^\circ$ ( $h=126$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	94
C.44 Campo da inclinação do escoamento $120^\circ, 127.5^\circ$ ( $h=126$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	94
C.45 Campo da inclinação do escoamento $135^\circ, 142.5^\circ$ ( $h=126$ m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	95

C.46 Campo da inclinação do escoamento $285^\circ, 292.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	95
C.47 Campo da inclinação do escoamento $300^\circ, 307.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	96
C.48 Campo da inclinação do escoamento $315^\circ, 322.5^\circ$ (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	96
C.49 Campo da inclinação do escoamento $285^\circ, 292.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	97
C.50 Campo da inclinação do escoamento $300^\circ, 307.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	97
C.51 Campo da inclinação do escoamento $315^\circ, 322.5^\circ$ (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	98
C.52 Campo da inclinação do escoamento $285^\circ, 292.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	98
C.53 Campo da inclinação do escoamento $300^\circ, 307.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	99
C.54 Campo da inclinação do escoamento $315^\circ, 322.5^\circ$ (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores. . . . .	99
D.1 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG1 . . . . .	100
D.2 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG2 . . . . .	101
D.3 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG3 . . . . .	101
D.4 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG4 . . . . .	101
D.5 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG5 . . . . .	102
D.6 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG6 . . . . .	102
D.7 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG7 . . . . .	102
D.8 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG8 . . . . .	103
D.9 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG9 . . . . .	103
D.10 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG10 . . . . .	103
D.11 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG11 . . . . .	104
D.12 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG12 . . . . .	104
D.13 Perfis de velocidade adimensionalizados WTG13 . . . . .	104
D.14 Perfis da intensidade de turbulência WTG1 . . . . .	105

D.15 Perfis da intensidade de turbulência WTG2 . . . . .	105
D.16 Perfis da intensidade de turbulência WTG3 . . . . .	105
D.17 Perfis da intensidade de turbulência WTG4 . . . . .	106
D.18 Perfis da intensidade de turbulência WTG5 . . . . .	106
D.19 Perfis da intensidade de turbulência WTG6 . . . . .	106
D.20 Perfis da intensidade de turbulência WTG7 . . . . .	107
D.21 Perfis da intensidade de turbulência WTG8 . . . . .	107
D.22 Perfis da intensidade de turbulência WTG9 . . . . .	107
D.23 Perfis da intensidade de turbulência WTG10 . . . . .	108
D.24 Perfis da intensidade de turbulência WTG11 . . . . .	108
D.25 Perfis da intensidade de turbulência WTG12 . . . . .	108
D.26 Perfis da intensidade de turbulência WTG13 . . . . .	109
D.27 Perfis da inclinação do escoamento WTG1 . . . . .	110
D.28 Perfis da inclinação do escoamento WTG2 . . . . .	110
D.29 Perfis da inclinação do escoamento WTG3 . . . . .	110
D.30 Perfis da inclinação do escoamento WTG4 . . . . .	111
D.31 Perfis da inclinação do escoamento WTG5 . . . . .	111
D.32 Perfis da inclinação do escoamento WTG6 . . . . .	111
D.33 Perfis da inclinação do escoamento WTG7 . . . . .	112
D.34 Perfis da inclinação do escoamento WTG8 . . . . .	112
D.35 Perfis da inclinação do escoamento WTG9 . . . . .	112
D.36 Perfis da inclinação do escoamento WTG10 . . . . .	113
D.37 Perfis da inclinação do escoamento WTG11 . . . . .	113
D.38 Perfis da inclinação do escoamento WTG12 . . . . .	113
D.39 Perfis da inclinação do escoamento WTG13 . . . . .	114
D.40 Perfis do shear factor WTG1 . . . . .	115
D.41 Perfis do shear factor WTG2 . . . . .	115
D.42 Perfis do shear factor WTG3 . . . . .	115
D.43 Perfis do shear factor WTG4 . . . . .	116
D.44 Perfis do shear factor WTG5 . . . . .	116

D.45 Perfis do shear factor WTG6 . . . . .	116
D.46 Perfis do shear factor WTG7 . . . . .	117
D.47 Perfis do shear factor WTG8 . . . . .	117
D.48 Perfis do shear factor WTG9 . . . . .	117
D.49 Perfis do shear factor WTG10 . . . . .	118
D.50 Perfis do shear factor WTG11 . . . . .	118
D.51 Perfis do shear factor WTG12 . . . . .	118
D.52 Perfis do shear factor WTG13 . . . . .	119
F.1 $\Delta h$ -105°, 112.5° . . . . .	133
F.2 $\Delta h$ -120°, 127.5° . . . . .	134
F.3 $\Delta h$ -135°, 142.5° . . . . .	134
F.4 $\Delta h$ -285°, 292.5° . . . . .	135
F.5 $\Delta h$ -300°, 307.5° . . . . .	135
F.6 $\Delta h$ -315°, 322.5° . . . . .	136
G.1 Rosa dos ventos das frequências - P042 . . . . .	137
G.2 Rosa dos ventos das velocidades médias - P042 . . . . .	138
G.3 Rosa dos ventos da energia - P042 . . . . .	138
G.4 Rosa dos ventos das frequências - P384 . . . . .	139
G.5 Rosa dos ventos das velocidades médias - P384 . . . . .	139
G.6 Rosa dos ventos da energia - P384 . . . . .	140
G.7 Rosa dos ventos das frequências - P385 . . . . .	140
G.8 Rosa dos ventos das velocidades médias - P385 . . . . .	141
G.9 Rosa dos ventos da energia - P385 . . . . .	141
G.10 Função distribuição de probabilidade - P042 . . . . .	142
G.11 Função distribuição de probabilidade - P384 - 30 m . . . . .	142
G.12 Função distribuição de probabilidade - P384 - 60 m . . . . .	143
G.13 Função distribuição de probabilidade - P385 - 30 m . . . . .	143
G.14 Função distribuição de probabilidade - P385 - 60 m . . . . .	144
G.15 Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média - P042 . . . . .	144

G.16	Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média	
	- P384 - 30 m . . . . .	145
G.17	Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média	
	- P384 - 60 m . . . . .	145
G.18	Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média	
	- P385 - 30 m . . . . .	146
G.19	Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média	
	- P385 - 60 m . . . . .	146
H.1	Gráficos da comparação da velocidade para as direcções principais . . . . .	147
H.2	Gráficos da comparação da intensidade de turbulência para as direcções principais . . . . .	148

# Lista de Tabelas

2.1	Constantes do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ aplicadas no WINDSIM [7, Leroy, J.] . . . . .	19
2.2	Comprimentos característicos da rugosidade do solo típicos . . . . .	21
3.1	Características do computador usado nas simulações . . . . .	26
3.2	Características das estações de medição . . . . .	30
3.3	Constantes de Weibull . . . . .	30
3.4	Parâmetros de modelação - versão “trial” . . . . .	31
3.6	Coordenadas limite do mapa em metros - versão “trial” . . . . .	31
3.7	Espaçamento e número de células da malha - versão “trial” . . . . .	32
3.8	Resíduos pesados - versão “trial” . . . . .	33
3.9	Parâmetros de modelação . . . . .	35
3.11	Espaçamento e número de células da malha . . . . .	36
3.12	Média pesada do valor absoluto dos erros relativos direccionais e globais para a estação de medição P385 . . . . .	39
3.13	Média pesada do valor absoluto dos erros relativos para todas as direcções a diferentes alturas . . . . .	39
3.14	Média pesada do valor absoluto dos erros relativos específicos da velocidade e direcção . . . . .	41
3.15	Média pesada do módulo dos erros absolutos do shear factor . . . . .	42
3.16	Resíduos, número de iterações e tempos de computação . . . . .	49
3.17	Características do vento na zona dos aerogeradores - média pesada - sudeste/noroeste . . . . .	55
B.1	Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - $105^\circ, 112.5^\circ, 120^\circ$ . . . . .	68

B.2	Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 127.5°, 135°, 142.5° . . . . .	69
B.3	Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 285°, 292.5°, 300° . . . . .	69
B.4	Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 307.5°, 315°, 322.5° . . . . .	70
B.5	Erros absolutos do shear factor para a estação de medição P384 . . . . .	70
B.6	Erros absolutos do shear factor para a estação de medição P385 . . . . .	71
B.7	Nº e pesos específicos das medições usadas para as várias direcções . . . . .	71
B.8	Nº e pesos globais das medições usadas . . . . .	71
D.1	Características do vento na zona dos aerogeradores -105° . . . . .	120
D.2	Características do vento na zona dos aerogeradores -112.5° . . . . .	121
D.3	Características do vento na zona dos aerogeradores -120° . . . . .	122
D.4	Características do vento na zona dos aerogeradores -127.5° . . . . .	123
D.5	Características do vento na zona dos aerogeradores - 135° . . . . .	124
D.6	Características do vento na zona dos aerogeradores - 142.5° . . . . .	125
D.7	Características do vento na zona dos aerogeradores -285° . . . . .	126
D.8	Características do vento na zona dos aerogeradores -292.5° . . . . .	127
D.9	Características do vento na zona dos aerogeradores -300° . . . . .	128
D.10	Características do vento na zona dos aerogeradores -307.5° . . . . .	129
D.11	Características do vento na zona dos aerogeradores -315° . . . . .	130
D.12	Características do vento na zona dos aerogeradores -322.5° . . . . .	131
E.1	Dimensões da malha na direcção z . . . . .	132

# Nomenclature

$\overline{\phi}_{exp}$  valor médio experimental da variável genérica

$Vh_{85m}$  magnitude da velocidade horizontal a 85 m a.n.s

$\mu$  viscosidade dinâmica

$\overline{EA}_{SF}$  média pesada do módulo dos erros absolutos do shear factor

$\overline{ER}$  média pesada do valor absoluto dos erros relativos

$\overline{ER}_{global}$  erro relativo global para o mastro P385

$\overline{u'_j u'_i}$  tensão de Reynolds

$\phi_{num}$  valor numérico da variável genérica

$\varepsilon$  taxa de dissipação de energia cinética em forma de calor

$C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_{\mu}$  constantes do modelo de turbulência

$Dir_{num}, Dir_{exp}$  direcção do escoamento valor numérico e experimental

$Dir_{ref}$  direcção do escoamento na simulação

$EA_{SF}$  erro absoluto do shear factor

$ER_{Vh}, ER_{dir}, ER_{IT}$  erro relativo da velocidade horizontal, direcção e intensidade de turbulência

$IT_{num}, IT_{exp}$  intensidade de turbulência valor numérico e experimental

$peso_i$  peso

$ref_{inflow}$  reference inflow quantities

$ref_{residual}$  resíduo de referência

$res_{sum}$  soma dos resíduos

$SF_{num}, SF_{exp}$  shear factor numérico e experimental

$U(z_r)$  velocidade média de escoamento à cota  $z$  de referência  
 $U_j$  componente média da velocidade  
 $u'_j$  componente turbulenta da velocidade  
 $Vh_{num}, Vh_{exp}$  velocidade horizontal valor numérico e experimental  
 $z_0$  comprimento característico da rugosidade do solo  
 $z_r$  altura de referência  
 $k$  constante de Von Karman (cujo valor é 0.4)  
 $k$  energia cinética por unidade de massa  
KE energia cinética da turbulência  
 $n_x$  numero de elementos na direcção  $x$   
 $n_y$  numero de elementos na direcção  $y$   
 $n_z$  numero de elementos na direcção  $z$   
 $p$  pressão  
SF shear factor  
 $u$  velocidade na direcção  $x$   
 $U(z)$  velocidade média do escoamento à cota  $z$   
 $U^*$  velocidade de fricção  
UCRT velocidade do vento na direcção este-oeste  
VCRT velocidade do vento na direcção norte-sul  
 $V_h$  magnitude da velocidade horizontal  
WCRT velocidade do vento na direcção vertical

# Capítulo 1

## Introdução

O contexto deste trabalho insere-se na procura de novas abordagens ao estudo da implementação de parques eólicos. Como tal, este trabalho avalia novas ferramentas que se estão a aplicar para estudar fenómenos talvez pouco conhecidos na maior parte da comunidade, mas de uma importância extrema para o funcionamento correcto dos aerogeradores. Os chamados efeitos de recirculação bastante nefastos para as máquinas (fig. 1.1), na maior parte dos casos não são levados em conta por projectistas e construtores dos parques. A procura de cada vez melhores simulações dos escoamentos atmosféricos, faz com que em alguns casos se use modelos não lineares para estudar topografias complexas em detrimento dos lineares.



Figura 1.1: Falha estrutural num aerogerador

O objectivo geral deste trabalho é duplo: primeiro é estudar o escoamento sobre uma região montanhosa com a aplicação comercial WINDSIM. O segundo objectivo é ganhar experiência na mecânica dos fluidos computacional. Quatro alunos finalistas realizaram um trabalho com a mesma ideia deste, mas cada um com um software diferente. As reuniões semanais feitas pelo grupo (alunos + orientadores) tiveram um papel importantíssimo na aprendizagem e motivação para os desafios constantes que se apresentaram.

No início fez-se uma introdução ao CFD utilizando um software genérico (FLUENT). Com este software e com apoio bibliográfico (Pantankar), fez-se uma introdução ao CFD generalista (tutoriais FLUENT), após esta fase começou a iniciação ao software utilizado neste trabalho (tutorial WINDSIM). Com esta iniciação deu-se o passo para o uso da versão completa já com o conhecimento do “motor” por trás do software, isto é, a teoria utilizada para modelar escoamentos atmosféricos em computador.

A zona em estudo é uma região montanhosa de Portugal, esta zona revela um terreno complexo com a forte possibilidade de separação de escoamento, apresentando assim a necessidade da aplicação de modelos não lineares para o seu estudo. O parque eólico é constituído por 13 aerogeradores e 3 estações de medição. As estações de medição têm como designação P042, P384, P385. As dimensões do domínio a usar são: 16 km (longitudinal) por 10 km (transversal) por 4km (vertical). O terreno é rodado em relação ao pivô para a condição de entrada ser perpendicular a cada direcção de escoamento. As direcções dominantes do escoamento são o conjunto das direcções noroeste e sudeste, logo é nestas direcções que o estudo vai ser focado. Estas direcções são baseadas no estudo da rosa dos ventos das frequências, velocidades médias e energia nas três estações de medição.

**Descrição dos capítulos:** O primeiro capítulo é o de introdução ao trabalho apresentado neste relatório. O segundo capítulo é o da metodologia, onde se faz uma introdução teórica abordando as equações de Navier-Stokes, camada limite atmosférica, modelos de turbulência, discretização, etc. Explica-se também algumas características do software utilizado para a modelação dos escoamentos e as opções gerais tomadas com base nas suas limitações ou variedade de opções. No terceiro capítulo apresentam-se as simulações incluindo os parâmetros de modelação, análise topográfica, resultados das simulações, análise da implementação dos aerogeradores, comparação com os resultados do FLUENT e cálculos preliminares (uso da versão “trial”). O quarto capítulo é o das conclusões, este capítulo serve para resumir as conclusões tiradas ao longo do trabalho e também para fazer uma breve análise da experiência tida com a utilização do software WINDSIM. Em anexo apresentam-se a maior parte das imagens e tabelas como os mapas de contornos, perfis verticais, erros de validação, tabelas dos parâmetros numéricos na zona dos aerogeradores, suavizações de terrenos, etc.

# Capítulo 2

## Metodologia

No capítulo metodologia é abordada simplisticamente a teoria utilizada para a modelação dos escoamentos atmosféricos. Aqui são introduzidas as equações de Navier-Stokes, modelos de turbulência, discretização e camada limite atmosférica.

O programa e algumas opções de modelação tomadas são também abordados para esclarecer o leitor das especificidades do WINDSIM.

### 2.1 Equações de Navier Stokes

O escoamento de um fluido rege-se pelas duas equações fundamentais da conservação: a de quantidade de movimento e massa.

#### Quantidade de movimento

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2.1)$$

Os três primeiros termos presentes na equação geral de conservação são os termos instacionários, convecção e difusão o último termo representa a variação da pressão.

#### Conservação de massa

O campo de escoamentos deve também obedecer à equação de conservação de massa ou equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (2.2)$$

No caso de um fluido incompressível:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.3)$$

## 2.2 Equações “Reynolds Averaged Navier-Stokes”

A maioria dos escoamentos é do tipo turbulento, variável no tempo e a três dimensões. Reynolds apresentou uma abordagem estatística à velocidade  $u_j$ , separando-a em duas componentes: a componente média e a flutuante ou turbulenta.

$$u_j = U_j + u'_j \quad (2.4)$$

As equações de Navier-Stokes aplicadas a um escoamento laminar tem a forma:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2.5)$$

são transformadas usando a equação 2.4 e usando o facto de os valores médios das flutuações  $\overline{u'_j} = 0$ :

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i + \overline{u'_j u'_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (2.6)$$

sendo a equação reordenada:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho (U_j U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u'_j u'_i} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} \quad (2.7)$$

aparece o termo fonte  $\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_j u'_i}$ , este termo é conhecido como tensão de Reynolds.

As equações que regem o escoamento do fluido, já não são resolúveis directamente, sendo renomeadas de RANS, estas equações dão uma maior representação do escoamento real. Anteriormente, havia quatro incógnitas com quatro equações de movimento, e o conjunto poderia ser resolvido. Agora dez incógnitas estão presentes, mas ainda assim o número de equações não mudou. Modelos de turbulência devem ser introduzidos para a solução do problema [9, Wilcox D. C.].

### 2.2.1 Modelo de turbulência $k - \varepsilon$

Turbulência em pequena escala pode ser caracterizada por duas variáveis: a dissipação da energia por unidade de massa e a viscosidade cinemática [4, Hanjalic, K., Launder, B.E.]. O modelo  $k - \varepsilon$  e as RANS formam um sistema de equações diferenciais elípticas (ou parabólicas dependendo do caso). Se o sistema for elíptico,  $k$  e  $\varepsilon$  necessitam da

especificação de velocidade, em todo o contorno. O parâmetro  $k$  representa a energia cinética por unidade de massa e é determinado recorrendo à equação 2.8. O parâmetro  $\varepsilon$  representa a taxa de dissipação de energia cinética em forma de calor por acção da viscosidade.

O modelo  $k - \varepsilon$  é o mais utilizado de todos os modelos de turbulência, foi verificado e validado para uma ampla variedade de escoamentos tem relativamente baixo custo computacional e é numericamente mais estável do que os modelos mais avançados e complexos.

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.8)$$

O modelo  $k - \varepsilon$  padrão é um modelo de duas equações de transporte e é caracterizado pela viscosidade turbulenta  $\mu_t$ :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

$k$  e  $\varepsilon$  serão sujeitos às equações de transporte:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \overline{u_i} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (2.10)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \overline{u_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.11)$$

Tabela 2.1: Constantes do modelo de turbulência  $k - \varepsilon$  aplicadas no WINDSIM [7, Leroy, J.]

	$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
Standard $k - \varepsilon$	0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

## 2.3 Modelação numérica

“Computational Fluid Dynamics” (CFD) é a análise de qualquer sistema envolvendo escoamento de um fluido por meio de simulação computacional. Um código CFD resolve vários aspectos da modelação numérica de fluidos. O WINDSIM recorre às RANS para modelar o escoamento, estas equações estão apresentadas no capítulo 2.1, por conseguinte, este tipo de modelação também é conhecida como a modelação RANS.

**Discretização:** Uma vez o domínio de escoamento e condições de fronteira definidas, dois processos devem ocorrer: discretização do domínio numa série de elementos e transformação das equações de derivadas parciais que descrevem o escoamento em operações

algébricas discretas envolvendo os valores das variáveis desconhecidas em cada nó do domínio.

O método dos volumes finitos utiliza directamente as leis da conservação - formulação integral das equações de Navier-Stokes/Euler [5, Blazek, J.]. Este método discretiza as equações que regem o escoamento dividindo o espaço físico num número arbitrário de volumes de controlo poliédricos. A precisão da discretização espacial depende do regime com que os escoamentos são avaliados.

A principal vantagem do método de volumes finitos é que a discretização espacial é efectuada directamente no espaço físico. Assim, não há problemas com qualquer transformação entre sistemas de coordenadas, como no caso do método das diferenças finitas. Outra vantagem é poder ser aplicado facilmente em malhas estruturadas como não estruturadas. Isto torna o método dos volumes finitos especialmente adequado para o tratamento de escoamentos em terrenos complexos.

A discretização dos sistemas convectivos faz-se com o esquema híbrido (esquema pré-definido). O esquema híbrido foi desenvolvido pelo Professor Brian Spalding, este nome advém da conjugação do método das diferenças centrais e o “upwind scheme” (consultar [1, Patankar V. Suhas]). Outros esquemas podem ser testados, manipulando o ficheiro Q1 referenciado na secção 2.5.

## 2.4 Camada limite atmosférica

O atrito entre a superfície terrestre e o vento têm como consequência um retardamento deste último. As camadas mais baixas de ar retardam as que lhe estão por cima, resultando numa variação da velocidade média do vento com a altura ao solo [2, Castro, Rui].

O efeito da força de atrito vai-se desvanecendo até praticamente se anular a uma altura de aproximadamente 2000 metros. No solo, a condição fronteira obriga a que a velocidade do escoamento seja nula. A esta zona da atmosfera caracterizada pela variação da velocidade do vento com a altura chama-se camada limite atmosférica, acima desta zona diz-se que a atmosfera é livre.

A região da camada limite atmosférica que se estende até uma altura de cerca de 100 metros (a chamada camada superficial) é a zona de interesse para os aerogeradores. Nesta zona, a topografia do terreno e a rugosidade do solo condicionam fortemente o perfil de velocidades do vento, que pode ser adequadamente representado pela lei logarítmica de Prandtl:

$$\frac{U(z)}{U_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (2.12)$$

A velocidade de atrito que varia com a rugosidade do solo, com a velocidade do vento

e com forças que se desenvolvem na atmosfera, é difícil de calcular. Para ultrapassar esta dificuldade, e porque o uso habitual da equação 2.12 é a extrapolação para alturas diferentes de dados medidos a uma altura de referência, usa-se, na prática, a equação 2.13:

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_r/z_0)} \quad (2.13)$$

Tabela 2.2: Comprimentos característicos da rugosidade do solo típicos

Tipo de terreno	z0 (m) min	z0 (m) max
gelo	$10^{-5}$	$3 \times 10^{-5}$
neve	$10^{-3}$	$6 \times 10^{-3}$
campo de cereais	$10^{-3}$	$10^{-2}$
relva baixa	$10^{-2}$	$4 \times 10^{-2}$
descampados	$2 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$
relva alta	$4 \times 10^{-2}$	$10^{-1}$
terrenos com árvores	$10^{-1}$	$3 \times 10^{-1}$
floresta	$10^{-1}$	1

## 2.5 Programa

Este trabalho usa o software de CFD WINDSIM [WINDSIM] para modelar escoamentos atmosféricos sobre montanhas.

A base do software WINDSIM é o PHOENICS [PHOENICS], software desenvolvido pelo Professor Brian Spalding. Este software de base realiza quase todas as funcionalidades que o WINDSIM necessita. Neste caso o WINDSIM funciona quase como um “easy” PHOENICS para aplicações na indústria da energia eólica.

Existe a possibilidade de mudar alguns parâmetros de modelação que à primeira vista parecem impossíveis de mudar no programa, como esquemas de discretização dos sistemas convectivos, constantes do modelo de turbulência, factores de relaxação, etc. Para isso é necessário ter conhecimentos do PHOENICS e manipular o ficheiro Q1<sup>1</sup>. Apesar de ser um software de fácil aprendizagem, por vezes revela alguns problemas inerentes a um software em desenvolvimento, o que nem sempre se torna fácil de contornar por um iniciado em CFD. O guia do utilizador<sup>2</sup> do programa está inserido dentro dos módulos e tem uma importância fundamental para a aprendizagem do software.

Os campos de escoamentos são visualizados recorrendo ao software gráfico externo “CEETRON GLview Pro”. Este programa permite fazer animações das linhas de corrente do campo de

<sup>1</sup>Windsim projects\nome\_ficheiro\windfield\nº\_sector

<sup>2</sup>WINDSIM “description”

escoamentos e visualizar as animações criadas no módulo “objects”. A existência de efeitos de bloqueio derivado à altura do domínio de modelação também é visualizado recorrendo a este programa. Este programa é uma versão demo, logo limitada na manipulação das imagens do campo de escoamentos.

### 2.5.1 Terreno

Os ficheiros necessários para o início do estudo no WINDSIM são do tipo 2D com a definição da altura dos vários pontos e parâmetros de rugosidade num formato do tipo .gws. O programa utiliza dois tipos de sistemas de coordenadas, as coordenadas globais definidas no .gws como do tipo 3 e as locais como tipo 1.

O ficheiro grid.gws está definido somente em relação às coordenadas globais. Ao gerar-se o modelo 3D, o software referencia as coordenadas locais em relação ao canto inferior esquerdo da imagem. Para se posicionar objectos como aerogeradores e estações meteorológicas dentro do terreno de simulação, é necessário definir as suas posições em relação ao sistema de coordenadas global ou local. Para reconhecer a rugosidade do terreno pode-se importar um mapa de rugosidade ou no caso de terrenos (preferencialmente com topografia complexa) com poucas variações de rugosidade considera-la constante.

**Altura da condição de fronteira superior:** A altura da condição de fronteira superior é definida como a distância vertical entre o ponto mais alto da elevação no modelo 3D e a condição de fronteira superior. A fim de estabelecer um bom valor para essa altura, dois requisitos aparentemente contraditórios devem ser equilibrados. Por um lado, que a distribuição dos nós na direcção vertical deve ser tão densa quanto possível para a obtenção de soluções numéricas precisas, em especial perto do terreno. Esta exigência implica que o limite superior deve ser colocado o mais próximo do solo quanto possível. Mas, por outro lado, se o limite superior é muito próximo ao solo, impõe um efeito de bloqueio quando o escoamento passa sobre as montanhas.

**Malha:** A malha utilizada para modelar o escoamento é do tipo estruturada. Este tipo de malha é de mais fácil tratamento por parte do programa não existindo a necessidade de referenciais locais para cada nó. O programa será mais célere a convergir para uma solução usando este tipo de malha em vez da não estruturada. A definição do número de células é um dos passos mais importantes na construção do modelo, o programa define o número de células através de um máximo número de elementos na direcção X, Y e Z. Esse número máximo é calculado do seguinte modo:

$$\text{Máx. elementos} = nx \times ny \times nz \quad (2.14)$$

O número de células na direcção Z pode ser definido à parte sendo as restantes calculadas obedecendo à fórmula 2.14. As células utilizam uma distribuição de progressão geométrica oferecendo assim um bom método para refinar a malha junto ao solo. A maneira como se faz esta distribuição está bem detalhada em [7, Leroy, J.].

**Inclinação do terreno:** Em casos em que as inclinações do terreno sejam superiores a  $50^\circ$  podem existir problemas de convergência, o programa dispõe de uma ferramenta que permite ortogonalizar a malha, esta ferramenta cria a malha na direcção perpendicular às curvas numa tentativa de ser perpendicular ao terreno, deste modo as células serão menos enviesadas em zonas de alta inclinação. O inconveniente desta ferramenta é o aumento do tempo global de simulação.

Em alguns terrenos existem mudanças abruptas de inclinação, essas mudanças abruptas são representadas pelas segundas derivadas. Geralmente essas zonas<sup>3</sup> não são as mais indicadas para a colocação de aerogeradores, logo o seu estudo é pouco interessante. O programa possui uma ferramenta que permite corrigir esse problema através da suavização do terreno “Terrain smothing limit”, com esta ferramenta, zonas em que o valor absoluto da segunda derivada seja superior a 0.004 são suavizadas diminuindo assim uma possível causa de divergência na resolução do problema.

## 2.5.2 Campo de escoamentos

As variáveis a iterar são:

1. Pressão (P)
2. Componentes da velocidade (u,v,w)
3. Energia cinética da turbulência (KE)
4. Energia dissipada de turbulência (EP)

**Condições de fronteira de entrada e saída do escoamento:** Ao longo dos contornos 3D, devem ser definidas as condições de fronteira do escoamento. Perfis definidos analiticamente são aplicados, estes perfis são dependentes da rugosidade do solo e temperatura caso esta seja activada na modelação. No caso de atmosfera neutra o perfil tem como designação de perfil logaritmo. Aplicar o perfil logarítmico junto à fronteira é o equivalente a colocar uma placa com dimensões suficientes para desenvolver o escoamento completamente a montante da condição de fronteira de entrada.

No fim da placa o escoamento já se encontra totalmente desenvolvido derivado da influência da rugosidade superficial. Os perfis de turbulência na condição de fronteira de entrada

---

<sup>3</sup>Vales estreitos e picos de montanhas

são os pré-definidos pelo software. De seguida apresentam-se as expressões analíticas das condições de entrada (pré-definidas no programa) para a velocidade [7, Leroy, J.]:

$$\frac{U(z)}{U^*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad z < \textit{altura da camada limite} \quad (2.15)$$

$$U(z) = \textit{constante} \quad z > \textit{altura da camada limite} \quad (2.16)$$

**Condição de fronteira superior e lateral:** A condição de fronteira superior a aplicar no domínio é a pressão fixa, esta condição aplica-se a terrenos complexos. Em relação às condições de fronteira das paredes laterais aplica-se a condição de simetria.

### “Solvers”

O WINDSIM usa dois tipos de resolução para as equações da quantidade de movimento e continuidade:

1. “Coupled”
2. “Segregated”

O método de resolução utilizado neste trabalho é o “coupled”, este método baseia-se no MIGAL<sup>4</sup> que permite resolver as variáveis simultaneamente em todo o campo de escoamentos (consultar [6, Ferry, M.]).

**MIGAL:** O algoritmo MIGAL difere do método segregado no aspecto da velocidade e pressão serem resolvidas simultaneamente, para cada volume de controlo. Durante uma iteração as equações de quantidade de movimento são discretizadas mas não resolvidas e os seus coeficientes são acumulados até a equação da continuidade ser discretizada. Em seguida o algoritmo MIGAL é chamado e resolve conjuntamente todas as equações para todas as células [6, Ferry, M.]. De seguida apresenta-se o algoritmo usado pelo método MIGAL para o cálculo do campo de escoamentos:

1. Estimar o campo de pressões e velocidade
2. Resolver a seguinte equação para  $(u^*, v^*, p^*)$ :

$$A_P \phi_P = \sum A_{nb} \phi_{nb} + b \quad (2.17)$$

---

<sup>4</sup>“Multi Grid Algebraic Solver”

3. Actualizar o campo de pressões e velocidade
4. Verificar convergência: caso não haja voltar ao ponto 2

Neste método os coeficientes não são números singulares mas sim matrizes:

$$A_{nb} = \begin{pmatrix} x_{nb}^u & x_{nb}^v & x_{nb}^p \\ y_{nb}^u & y_{nb}^v & y_{nb}^p \\ c_{nb}^u & c_{nb}^v & c_{nb}^p \end{pmatrix} \quad \phi_{nb} = \begin{pmatrix} u_{nb}^* \\ v_{nb}^* \\ p_{nb}^* \end{pmatrix} \quad b_{nb} = \begin{pmatrix} r_{nb}^u \\ r_{nb}^v \\ r_{nb}^p \end{pmatrix}$$

a notação para este caso indica que x e y representam as direcções da quantidade de movimento, o índice c a continuidade e o vector  $b_{nb}$  os resíduos.

**Análise da convergência:** O WINDSIM apresenta três maneiras complementares de verificar a convergência:

1. Análise dos valores iterados num ponto específico<sup>5</sup>
2. Análise dos resíduos
3. Monitor de convergência - animação

A análise por pontos é importante para verificar a evolução dos parâmetros iterados em pontos estratégicos como em zonas de colocação de aerogeradores ou estações de medição. Com esta medida é possível verificar se os valores estabilizam nessa zona. Os valores verificados são a velocidade nos três eixos e componentes da turbulência. A segunda maneira de avaliar a convergência é através dos resíduos, esta análise tal como a primeira é feita graficamente. O monitor de convergência permite ver uma animação com a evolução dos valores tomados por uma determinada variável escolhida pelo utilizador ao longo do processo de iteração em todo campo de escoamentos  $nx * ny * 1$ .

Em caso da não activação dos parâmetros a visualizar através do monitor de convergência, o programa abre uma janela do software PHOENICS, onde se pode visualizar a evolução em tempo real dos resíduos pesados e valores no ponto específico “spot values”.

---

<sup>5</sup>“spot values”

# Capítulo 3

## Simulações

Neste capítulo apresentam-se as simulações feitas para o estudo dos escoamentos sobre a região montanhosa. No início do estudo é feito uma primeira abordagem utilizando a versão “trial” do WINDSIM. O segundo estudo é o mais importante e recorre à versão completa do programa. Neste segundo estudo é que as grandes conclusões são tiradas, através da análise dos campos de escoamentos, perfis verticais, valores pontuais nos aerogeradores, validação de resultados, etc.. Todas as simulações apresentadas neste relatório recorrem a um computador com as características descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características do computador usado nas simulações

Processador	Intel Core 2 Quad CPU Q9950 @ 2.83 GHz
Memória RAM	4Gb (3GB utilizados)
Sistema Operativo	Windows Vista 32 bits

### 3.1 Descrição do problema

Para a modelação da área de interesse são feitos dois estudos: o primeiro recorre à versão “trial” e é descrito na secção 3.2 e o segundo que recorre à versão completa encontra-se na secção 3.3.

#### Requisitos

Domínio:

16 km (longitudinal) por 10 km (transversal) por 5km (vertical)

Malha:

130 nós (longitudinal) por 85 nós (transversal) por 50 nós (vertical)

Dimensões do volume de controlo mais pequeno: 30 m (longitudinal) por 30 m (transver-

sal) por 2 m (vertical)

Turbulência:

Modelo K-epsilon com  $C_{\mu}=0.033$ ;  $C_{\epsilon 1}=1.44$ ;  $C_{\epsilon 2}=1.92$ ;  $\Sigma_k=1.0$ ;  $\Sigma_{\epsilon}=1.835$

Perfis de entrada:

$\Delta_m=1500$  m

$u(\Delta_m)=7.65$  m/s

## Geometria dos aerogeradores

Altura da nacelle = 85 m a.n.s

Diâmetro do rotor = 82 m

## Simulações com a versão “trial”

O estudo preliminar recorrendo à versão “trial” do WINDSIM serve de rampa de lançamento para a utilização da versão completa. A grande limitação desta versão é o número de elementos da malha (5000 elementos). A necessidade de utilizar esta versão reside na necessidade da aprendizagem do software e uma comparação prévia com o FLUENT.

Para este primeiro teste é usada uma malha sem concentração junto à zona de interesse. Nas subsecções dentro da secção 3.2 apresentam-se as características de modelação utilizadas, as análises ao terreno e os resultados.

## Simulações com a versão “full”

No segundo estudo já não existem restrições de malha. Para a modelação do escoamento nas diferentes direcções, o terreno é rodado para melhor aproximar o modelo do FLUENT.

É feita uma validação confrontando os dados numéricos com os dados experimentais. A zona da colocação dos aerogeradores é também avaliada à luz das restrições impostas pelos fabricantes/normas. São feitas tabelas resumo das propriedades do escoamento mais importantes na zona dos aerogeradores. Imagens do campo de escoamentos para vários parâmetros e perfis verticais na zona do aerogeradores são retirados dos resultados numéricos. É feita uma observação e interpretação dos campos tri-dimensionais do escoamento.

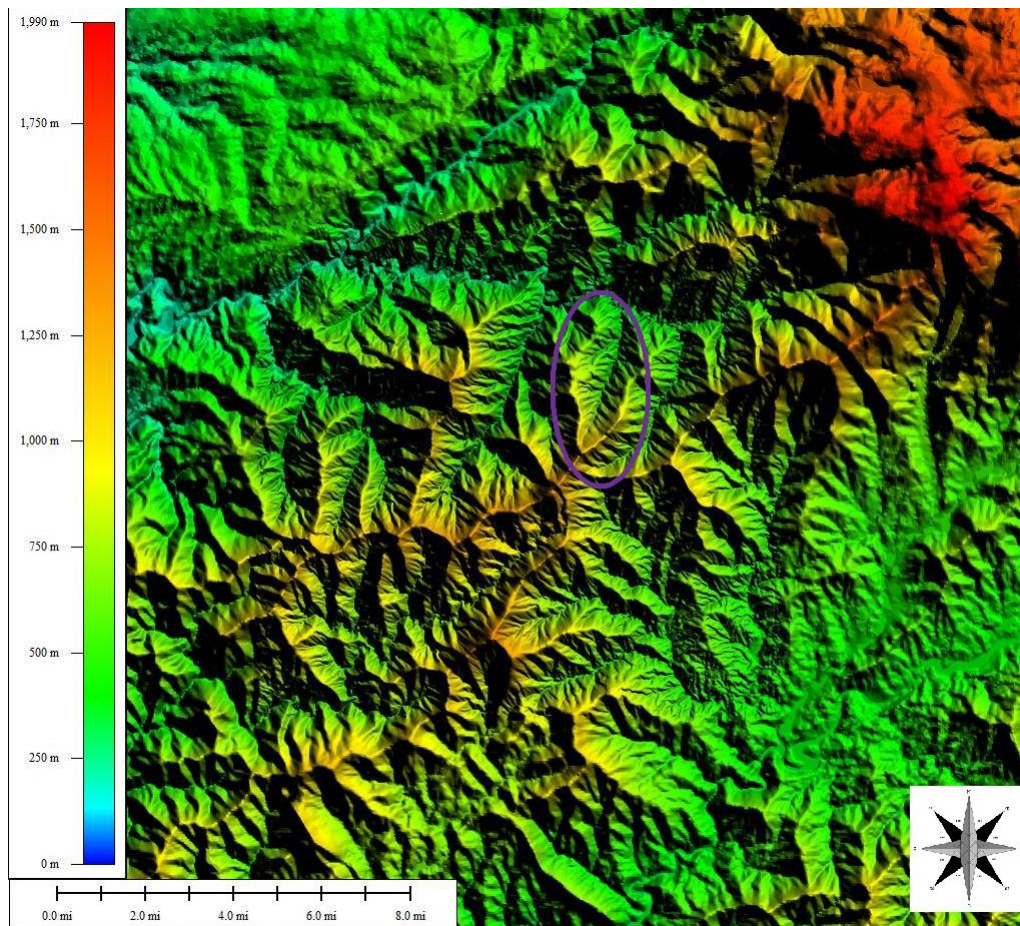


Figura 3.1: Imagem do terreno em alta resolução

### 3.1.1 Descrição do terreno

O terreno em estudo revela um relevo não uniforme, existem áreas com elevações de aproximadamente 2000 m e outras com elevações na ordem dos 250 m com uma distância entre si pequena (horizontalmente). O terreno é bastante montanhoso com algumas zonas a mais baixa altitude a noroeste e a sudeste (ver figura 3.1). Existe uma faixa de separação entre a direcção SE-NO, esta faixa separa as duas regiões do terreno com a cota mais baixa.

Neste terreno existem grandes declives e inclinações. Esta situação pode ser verificada pelas elevadas segundas derivadas da inclinação que o software detecta, este fenómeno poderá revelar-se problemático para a convergência pois a malha tem dificuldade em adaptar-se às grandes inclinações do terreno.

A área de interesse é constituída por duas cumeadas em forma de “V” e está assinalada na figura por uma elipse. Uma das cumeadas tem a direcção N-S e a outra a direcção SO-NE. A cumeada na direcção SO-NE influencia a outra para escoamentos vindos da direcção SE, o contrário acontece para direcções de escoamento NO (efeito de sombra). Esta forma complexa da área de interesse poderá dar origem a separações de escoamento e outros efeitos não lineares. Dentro da área de interesse será implementado um parque cujo objectivo deste trabalho é estudar, constituído por 13 aerogeradores e 3 estações de

medição, o respectivo “layout” pode ser visto na figura 3.2.

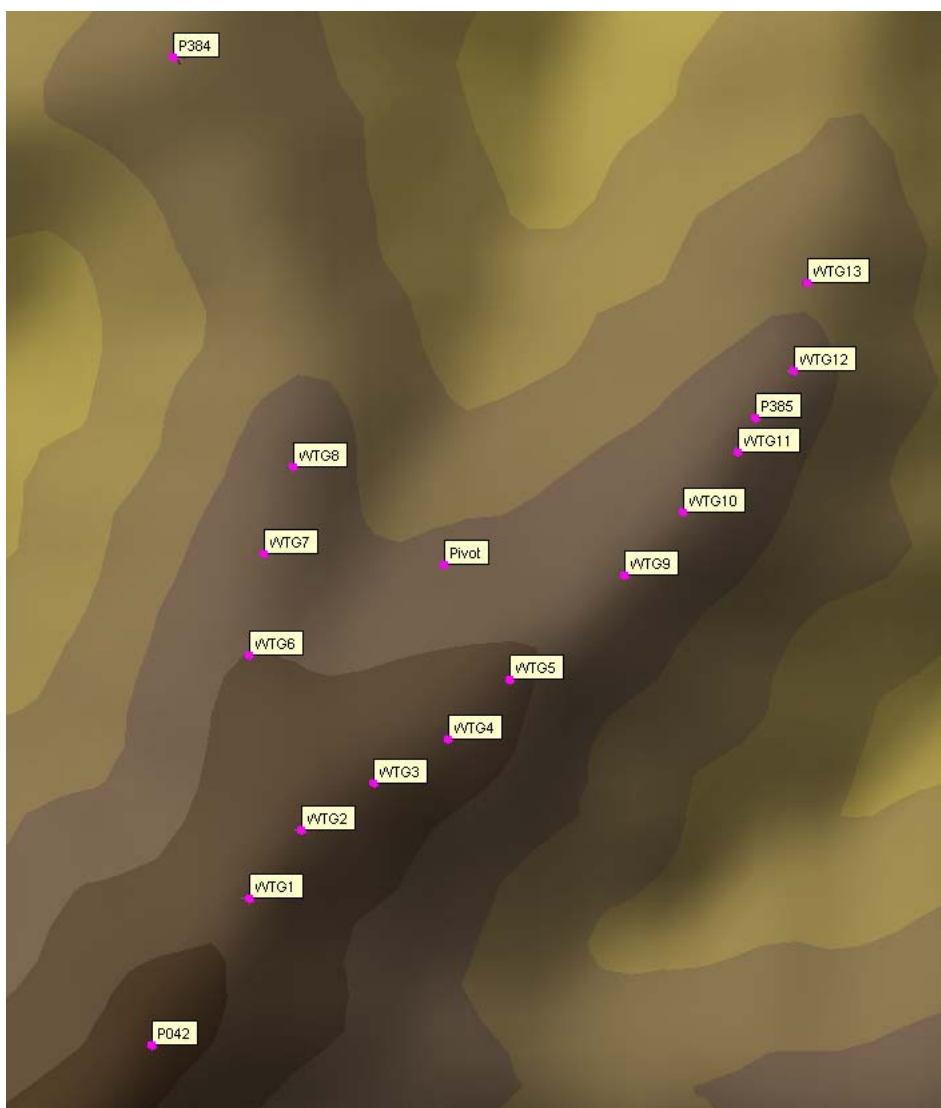


Figura 3.2: “Layout” dos aerogeradores (WTGs) e estações de medição

### 3.1.2 Descrição do regime de ventos

As direcções de escoamento e velocidade de entrada aplicados nas simulações deste relatório são baseadas nas rosas dos ventos (frequência + velocidade + energia) para as três estações de medição. O regime de ventos local indica que as direcções de escoamento privilegiadas são as direcções noroeste ( $285^{\circ}$  a  $322.5^{\circ}$ ) e sudeste ( $105^{\circ}$  a  $142.5^{\circ}$ ). Este facto é mais visível para as estações P042 e P385.

As maiores velocidades médias do escoamento atingem-se (dentro das direcções de interesse e no global) para  $135^{\circ}$ . Constata-se que a velocidade média máxima no conjunto das direcções noroeste se atinge na estação de medição P042 ( $\approx 9$  m/s) e a mínima na estação de medição P384 ( $\approx 4$  m/s). No caso das direcções sudeste, a velocidade média máxima ocorre na estação de medição P042 ( $\approx 9.5$  m/s) e a mínima na estação de medição P384

( $\approx 7$  m/s). Isto explica-se porque a estação de medição P042 se situa na zona de maior velocidade (zona mais alta do parque) e o P384 na zona mais abrigada (cota mais baixa).

A estação de medição P384 é a que regista maior intensidade de turbulência, de seguida a P385 e por último a P042. Isto acontece porque esta estação de medição é mais afastada da zona de maior velocidade ou zona de maior densidade energética, logo está mais sujeita a maiores variabilidades na velocidade do escoamento. No geral, a intensidade de turbulência nas estações de medição situa-se abaixo dos 18%.

As características das estações de medição podem ser consultadas na tabela 3.2 e as constantes de Weibull para a função distribuição de probabilidade na tabela 3.3. As rosas dos ventos, funções de distribuição de probabilidade e gráficos de velocidade versus intensidade de turbulência podem ser visualizadas no apêndice G.

Tabela 3.2: Características das estações de medição

Estação de medição	P042	P384/P385
Elevação da estação (m a.n.s)	30	30 e 60
Início das medições (dia-mês-ano h:m)	01-09-1997 00:00	01-09-2008 00:00
Fim das medições (dia-mês-ano h:m)	01-09-2008 00:00	01-09-2008 00:00
Duração (anos)	11	1
Intervalo entre registos (min)	10	10

Tabela 3.3: Constantes de Weibull

	P042	P384		P385	
		30 m	60 m	30 m	60 m
k	1.86	1.09	1.16	1.80	1.75
c (m/s)	8.93	5.49	5.89	8.07	7.82

## 3.2 Estudo preliminar - versão “trial”

Nesta secção apresenta-se o estudo preliminar da área de interesse, este estudo é feito recorrendo à versão “trial”. A versão trial tem como limitação o número de elementos: 5000 elementos. É feita uma comparação com os resultados do FLUENT para o mesmo estudo, visto que na fase deste estudo ainda se estava na aprendizagem da mecânica dos fluidos computacional.

### Parâmetros da modelação

Nesta primeira abordagem ao software, a versão utilizada é a “trial”. Esta simulação não obedece a alguns dos requisitos como a altura da camada limite, altura do domínio, dimensões mínimas da malha na direcção vertical junto ao solo, etc. Isto acontece porque na altura da realização desta simulação, os requisitos não estavam ainda definidos. Na tabela

3.4 estão apresentados os vários parâmetros de modelação utilizados para a construção do modelo.

Tabela 3.4: Parâmetros de modelação - versão “trial”

Domínio	Altura sob o terreno (m)	Auto	
Condições de fronteira	Velocidade acima da camada limite (m/s)	7	Perfil de velocidades logarítmico
	Altura da camada limite (m)	300	
	Condição de fronteira no topo	Pressão fixa	
Terreno	Rugosidade (m)	0.03	Constante
Malha	Factor distrib. da altura das células	0.1	
Modelos físicos	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Regime neutro	Modelo de temperatura não activado
	Massa volúmica do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1.225	Constante
	Modelo de turbulência	$k - \varepsilon$	“Standard”
Parâmetros de cálculo	Solver	MIGAL	Acoplado

## Terreno

A primeira área a estudar tem como dimensões  $16 \times 10 \text{ km}^2$ . São criadas quatro versões rodadas a  $113^{\circ}$ ,  $135^{\circ}$ ,  $293^{\circ}$  e  $315^{\circ}$  em relação a um sistema de eixos centrado no pivô (fig. 3.3).

Tabela 3.6: Coordenadas limite do mapa em metros - versão “trial”

	Min (em rel. pivô)	Max (em rel. pivô)
x	-5000	5000
y	-6000	10000

Para a construção deste conjunto de terrenos foi usada uma “function” do software MATLAB (ver apêndice I). O método de rodar o terreno serve para aproximar o modelo ao FLUENT; este método não usa a forma nativa do WINDSIM simular o escoamento para as várias direcções. A distância entre a condição de fronteira de entrada e o pivô é tal que permita um total desenvolvimento dos perfis verticais até chegar à área do parque. A distância do parque à condição de fronteira de saída é mínima, esta distância é definida de modo a que não afecte a área de interesse.

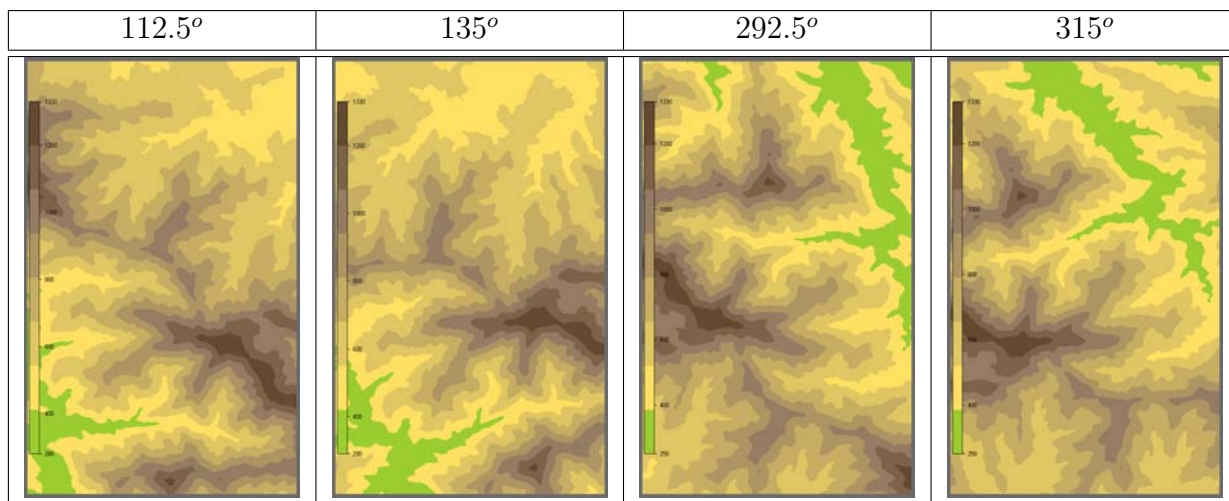


Figura 3.3: Mapa do terreno rodado nas direcções principais

## Malha

A malha usada é do tipo estruturada sem qualquer tipo de concentração junto ao parque (plano  $xy$ ), mas sim junto à parede (direcção  $z$ ). Na tabela 3.7, apresentam-se as características da malha usada. A altura da condição de fronteira superior é definida automaticamente pelo WINDSIM respeitando a regra da fracção máxima das áreas transversais (consultar documentação do programa).

Tabela 3.7: Espaçamento e número de células da malha - versão “trial”

	x	y	z	total
Espaçamento (m)	616	616	variável	-
Número de nós	16	25	10	4000

### 3.2.1 Resultados WINDSIM

O mais importante a retirar desta primeira abordagem ao programa será a análise do campo de velocidades. A recirculação do escoamento não pode ser analisada com este tipo de malha nem é razoável comparar os dados obtidos da simulação com os dados experimentais das estações de medição. As imagens do campo de escoamentos que se apresentam no apêndice A são feitas para um plano 80 m acima do terreno.

Através da análise do campo de velocidades tridimensional (fig. A.1 e A.2) verifica-se que, de uma maneira geral, a zona de interesse identificada pelas estações meteorológicas, é a zona com maior intensidade de velocidade para as várias direcções. A direcção de escoamento que menos a beneficia em termos de intensidade ao longo das cumeadas é a direcção  $315^\circ$ , apesar de ser a zona com o maior pico  $\approx 13\text{ m/s}$ . A direcção com

velocidades mais equilibradas dentro do “V” é a de 293°.

A malha utilizada na versão “trial” não permite uma avaliação fidedigna do campo de turbulência. Apesar desta restrição, através da análise das figuras A.3 e A.4, a zona de interesse é frequentemente uma das zonas com maior intensidade de turbulência. A direcção de escoamento 135° apresenta a maior faixa de turbulência ao longo da cumeada superior relativamente à imagem.

A direcção 315° apresenta também uma linha de elevada turbulência, mas neste caso na cumeada inferior.

### Análise de convergência

Da análise da convergência retira-se que todos os parâmetros convergiram (estabilização dos resíduos pesados) nas quatro direcções de escoamento. Na figura 3.4 apresenta-se uma evolução dos resíduos pesados para a direcção 113°, onde se observa que esta evolução é semelhante para todas as direcções. O valor máximo do resíduo pesado ocorre na dissipação de energia cinética de turbulência cujo valor é de 23.9% para a direcção 135° (tabela 3.8).

Tabela 3.8: Resíduos pesados - versão “trial”

	$resíduo\ pesado = \frac{res_{sum}}{res_{ref}} \times 100\%$						ITER.	TEMPO (H:MIN:S)
	P1	U1	V1	W1	KE	EP		
113°	1.042E-01	9.818E-01	4.372E-02	5.430E-01	7.030E-01	(4.971E00)	40	00:00:12
135°	7.170E-02	9.832E-01	4.677E-02	5.215E-01	6.312E-01	(2.392E01)	45	00:00:13
293°	5.812E-02	7.278E-01	3.272E-02	7.022E-01	5.434E-01	(4.325E00)	30	00:00:12
315°	5.812E-02	7.278E-01	3.272E-02	7.022E-01	5.434E-01	(4.325E00)	30	00:00:12

O processo de estabilização e diminuição dos resíduos pesados é rápido e necessita de poucas iterações. Os valores dos resíduos pesados entre parêntesis correspondem a parâmetros que estão acima do valor 1% definido pelo PHOENICS para parar automaticamente as iterações (consultar [8, Malin M. R.]). Neste caso para o cálculo do resíduo pesado usa-se um resíduo de referência pré-definido pelo PHOENICS ( $res_{ref}$ ).

### 3.2.2 Resultados FLUENT

Os resultados dos campos de velocidade para os dois softwares revelam semelhanças (ver em apêndice A). As semelhanças apenas qualitativas, são nas zonas com maior intensidade de velocidade.

A consequência da diferença de valores pode ser do perfil de velocidades e turbulência definido na entrada do domínio nas duas simulações e também nas diferentes maneiras de

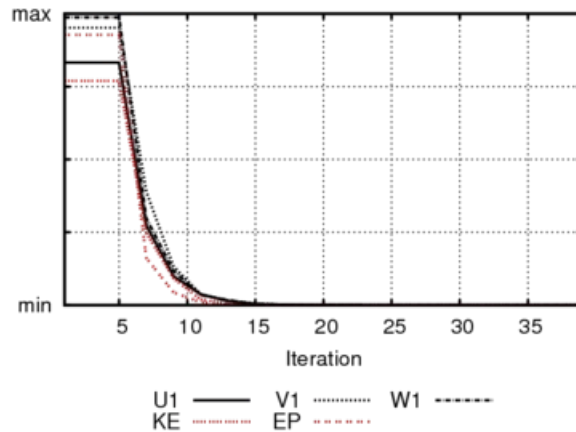


Figura 3.4: Evolução dos resíduos pesados - exemplo 113<sup>o</sup> - versão “trial”

os softwares reconhecerem a rugosidade. Com esta qualidade de malha é difícil localizar a zona de interesse nos resultados do FLUENT.

Em relação à intensidade de turbulência não se consegue identificar um padrão nas várias imagens para que se possa considerar que os resultados são idênticos, a maior causa desta situação poderá ser a qualidade da malha, perfis de entrada, etc.

### 3.3 Cálculos finais

Esta secção é a mais importante do trabalho, aqui estão os parâmetros de modelação definidos nos requisitos, resultados das simulações, perfis verticais, validação dos resultados, análise da convergência e análise do “layout” dos aerogeradores.

#### Parâmetros da modelação

Na tabela que se apresenta em seguida, estão apresentados os vários parâmetros de modelação utilizados para a construção do modelo. Neste caso todos os parâmetros obedecem aos requisitos, excepto a altura do domínio que derivado a problemas de convergência teve de ser alterado para 4000 m.

Tabela 3.9: Parâmetros de modelação

Domínio	Altura do domínio (m)	4000	Em rel. ao nível do mar
Condições de fronteira	Velocidade acima da camada limite (m/s)	7.65	Perfil de velocidades logarítmico
	Altura da camada limite (m)	1500	
	Condição de fronteira no topo	Pressão fixa	
Terreno	Rugosidade (m)	0.03	Constante
Malha	Factor distrib. da altura das células	0.028	
Modelos físicos	Temperatura (°C)	Regime neutro	Modelo de temperatura não activado
	Massa volúmica do ar (kg/m <sup>3</sup> )	1.225	Constante
	Modelo de turbulência	$k - \epsilon$	“Standard”
Parâmetros de cálculo	Solver	MIGAL	Acoplado

## Terreno

A segunda área a estudar tem a mesma dimensão e localização do pivô do estudo preliminar. São criadas doze versões rodadas em relação a um sistema de eixos centrado no pivô (fig. 3.3), metade destas versões são rodadas nas direcções sudeste (105° a 142.5°) e a outra metade a noroeste (285° a 322.5°) com um passo de 7.5°.

A definição das diferentes direcções de escoamento é baseada nas rosas dos ventos para as 3 estações de medição existentes (ver apêndice G).

Existe a necessidade de activar a opção “Terrain Smoothing Limit” derivado à presença de fortes inclinações no terreno que dificultam a convergência da solução. As diferenças de altura do terreno suavizado para o original estão apresentadas no apêndice F. A suavização introduz diferenças que podem ir até 100 m no caso da direcção 105°.

## Malha

No WINDSIM não é possível o controlo exacto do número de elementos da malha na direcção X e Y, logo, o número de nós final é aproximado aos requisitos (ver tabela 3.11). Inicialmente foi testada para a direcção vertical, o número de elementos e a dimensão do domínio especificados nos requisitos. A solução para estas características divergiu (fig. 3.5).

De seguida testou-se 40 nós e 5000 m, mas neste caso o rácio da malha em relação à altura do domínio não é igual ao requisito. Optou-se assim pela malha com 40 nós (consultar dimensões da malha na vertical no apêndice E) e altura do domínio de 4000 m; a análise visual do escoamento não revela situações de bloqueio no topo do domínio e a solução converge.

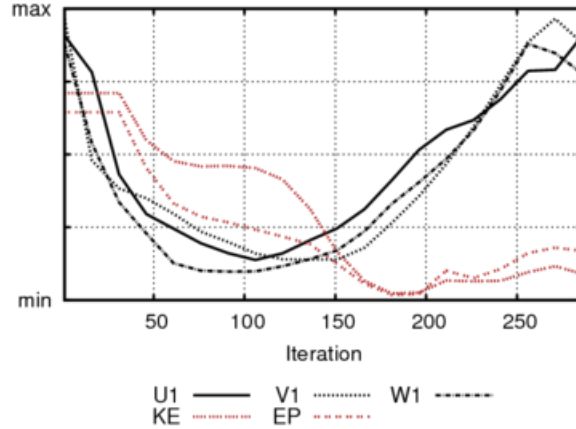


Figura 3.5: Evolução dos resíduos para 105°

É de salientar que, para obedecer aos requisitos, a malha revela problemas nas zonas concentradas ao longo da direcção transversal e longitudinal a meio do modelo, o que pode levar a divergência do problema (ver zonas concentradas na figura 3.6). A opção “Orthogonalize 3D grid” é activada numa tentativa de criar uma malha sempre ortogonal ao solo evitando problemas de convergência que daí possam vir.

Tabela 3.11: Espaçamento e número de células da malha

	x	y	z	total
Espaçamento-min/máx (m)	30/206.7	30/207.2	variável	-
Número de nós	86	137	40	471280

### 3.3.1 Validação dos resultados

Para a validação dos resultados na zona das estações de medição a 30 m e 60 m de altura, usa-se como referência o P384. É feita uma busca aos valores da velocidade e direcção nos dados experimentais de forma a corresponderem aos resultados numéricos da estação de referência. Esta busca tem uma tolerância de 0.5 m/s para a velocidade e 3° para a direcção.

Regista-se o número de dados filtrados para se proceder ao cálculo das médias pesadas (consultar tabela B.7 em apêndice). A direcção do escoamento obtida pelos dados numéricos nas zonas das estações é calculada com a seguinte equação:

$$\text{atan}(UCRT/VCRT) + Dir_{ref} \quad (3.1)$$

Após obter estes dados, efectua-se a sincronização dos tempos para as estações obtendo-se os dados simultâneos de velocidade e direcção medidos nas estações de medição P042 e P385 a 30 m. Com os dados experimentais da velocidade e direcção realiza-se uma média

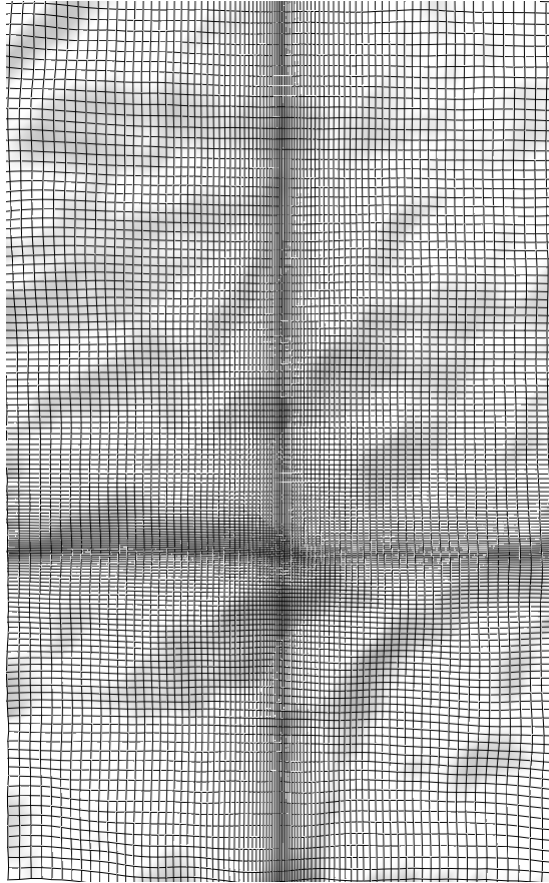


Figura 3.6: Malha - plano xy

destes parâmetros. A seguir calculam-se os erros relativos comparando os resultados numéricos com os experimentais nas estações.

Para a validação do modelo a 60 m de altura o processo é rigorosamente igual à validação a 30 m excepto que neste caso só se usam duas estações de medição P384 e P385 , uma vez que o P042 não mede a 60 m de altura.

O procedimento de busca e sincronização de dados é feito recorrendo ao MATLAB (ver no apêndice I). É feita uma análise dos erros recorrendo ao peso das medições fornecidas pela filtragem dos resultados, sendo apresentado um conjunto de erros específicos e globais que permitem atestar a qualidade da aproximação do modelo à situação real.

No apêndice B apresentam-se as tabelas dos erros relativos específicos para a velocidade, direcção e turbulência nas estações de medição. A estação de referência está referenciada com a cor azul. O erro relativo específico é calculado da seguinte forma:

$$ER = \frac{\phi_{num} - \bar{\phi}_{exp}}{\bar{\phi}_{exp}} \quad (3.2)$$

## Peso

O peso é calculado de forma a mostrar a representatividade do número de medições usadas no cálculo da média de um parâmetro experimental para uma determinada direcção e altura. A análise do peso das medições indica que o conjunto de dados para as direcções noroeste têm mais influência nos resultados globais (consultar tabela B.8 no apêndice). O mesmo se pode dizer para a altura 60 m. Esta análise indica que foram extraídos mais dados para o cálculo da média dos parâmetros (maior representatividade) nestas duas situações, logo os erros relativos mais representativos do desempenho do software são os das direcções noroeste a 60 m de altura.

## Média pesada do valor absoluto dos erros relativos

Para avaliar as simulações globalmente são calculadas as médias pesadas dos valores absolutos dos erros relativos (eq. 3.3) para uma determinada altura (tabela 3.13) e para as direcções sudeste e noroeste (separadas) na estação de medição P385 (tabela 3.12). É determinado também o erro relativo global para a estação de medição P385 baseado nos erros a sudeste e noroeste.

$$\overline{ER} = \sum peso_i * |ER_i| \quad (3.3)$$

O erro para uma determinada altura representa a média pesada dos valores absolutos dos erros relativos para todas as direcções de escoamento a essa altura.

Para a estação P384, apresentam-se apenas os erros para a intensidade de turbulência (tabela 3.14) uma vez que, na filtragem dos dados, os parâmetros de procura são a velocidade e direcção.

## Média pesada do valor absoluto dos erros relativos direccionais na estação de medição P385

A partir dos resultados demonstrados na tabela 3.12 constata-se que o programa aproxima melhor os resultados na estação de medição P385 para todas as alturas no conjunto das direcções noroeste do que a sudeste: o valor do erro<sup>1</sup> é mais baixo para todos os parâmetros.

**As causas para os erros maiores no P385 a sudeste podem ser:** A estação de medição de referência, P384 é mais afectada pela turbulência (consultar resultados pormenorizados das estações de medição em apêndice B) para as direcções sudeste em relação às de noroeste. Ventos de sudeste têm que passar primeiro a cumeada mais alta,

---

<sup>1</sup>Para facilitar a leitura, trata-se a média pesada do valor absoluto dos erros relativos apenas por erro

causando maiores efeitos de turbulência na cumeada mais baixa onde está colocado o P384.

Constata-se que a suavização do terreno é ligeiramente maior para as modelações com escoamentos vindos de sudeste do que a noroeste, diminuindo assim alguma da correlação do terreno real com o modelado (consultar apêndice F). O programa apresenta também resíduos pesados mais altos para as direcções sudeste em relação a noroeste (consultar 3.3.2.4).

Tabela 3.12: Média pesada do valor absoluto dos erros relativos direccionais e globais para a estação de medição P385

P385 - 30 m/60 m	$\overline{ER}_{VH}$ (%)	$\overline{ER}_{dir}$ (%)	$\overline{ER}_{IT}$ (%)
SE	29.04	9.65	13.30
NO	5.64	2.06	8.99
Global (SE/NO)	15.00	5.10	10.71

### Média pesada do valor absoluto dos erros relativos a diferentes alturas

O erro da modelação para a estação de medição P385 é inferior no caso da velocidade e turbulência em relação ao P042 qualquer que seja a altura de medição (fig. 3.13). Os erros mais baixos registam-se para as direcções, de seguida a turbulência e por fim velocidade. Isto indica que o programa aproxima melhor as direcções do escoamento do que as velocidades e intensidades de turbulência.

Tabela 3.13: Média pesada do valor absoluto dos erros relativos para todas as direcções a diferentes alturas

	$\overline{ER}_{VH}$ (%)	$\overline{ER}_{dir}$ (%)	$\overline{ER}_{IT}$ (%)
P042 - 30 m	27.87	2.97	15.09
P385 - 30 m	16.02	4.05	10.05
P385 - 60 m	14.20	5.91	11.23

### Média pesada do valor absoluto dos erros relativos médios específicos nas estações de medição

Na tabela 3.14 apresentam-se os erros para as diferentes direcções e alturas. O erro da aproximação da intensidade de turbulência para a estação de medição P384 é também apresentado.

A estação de medição mais problemática em termos de aproximação numérica é a P042, que atinge erros relativos específicos de velocidade por vezes na ordem dos 90% (direcção 142.5°). É de salientar que a generalidade dos erros registados no P385 são mais baixos do que no P042.

Os valores dos erros da intensidade de turbulência de uma maneira geral são mais baixos para a altura 60 m, o que apoia a teoria de o modelo de turbulência modelar pior junto ao solo necessitando das chamadas funções de parede. Na análise direccional, a turbulência regista erros mais baixos para conjunto das direcções noroeste (consultar tabela 3.12).

**Correlação da velocidade a 30 m:** O valor da velocidade numérica na estação de medição P042 é sobrestimada excepto para as direcções 300° e 322.5°. Em relação ao P385 o comportamento da simulação é sobrestimar a velocidade excepto para as direcções 285°, 300°, 307.5° e 322.5°. (consultar tabelas dos erros relativos específicos no apêndice B).

**Correlação da velocidade a 60 m:** Em relação à verificação a 60 m, os resultados numéricos indicam que a velocidade horizontal na estação de medição P385 é sobrestimada para as direcções sudeste e subestimada para noroeste, excepto para as direcções 285° e 315°.

**Correlação da intensidade de turbulência a 30 m:** Na modelação da turbulência, a tendência do programa nas estações de medição P042 e P385, para o conjunto das direcções sudeste é subestimar o valor experimental. Em relação ao conjunto das direcções noroeste, o padrão para as estações é sobrestimar.

**Correlação da intensidade de turbulência a 60 m:** Para a estação de medição P385, o padrão da intensidade de turbulência numérica é subestimar a experimental a sudeste. A noroeste sobrestima para todas as direcções, excepto a 300°, 315° e 322.5°.

**Correlação da turbulência na estação de medição de referência P384:** Os resultados para a estação de medição P384 revelam a tendência de subestimar para nordeste e em relação a sudeste não têm um padrão de erro.

**Causas para os erros mais elevados na estação de medição P042:** O desajustamento de resultados por vezes muito grande na P042, pode ficar a dever-se a efeitos de recirculação do escoamento local que o software não está a detectar, condições de entrada de escoamento pouco representativas do que acontece no local e a distância entre a estação de medição P042 à P384 ser maior do que a P384 à P385.

O uso de uma rugosidade constante para o modelo e a suavização do terreno também podem ter alguma influência nos resultados. O modelo de temperatura não foi activado para esta simulação, com isto não se entrou com os fenómenos derivados aos gradientes de temperatura.

Tabela 3.14: Média pesada do valor absoluto dos erros relativos específicos da velocidade e direcção

		Sudeste			Noroeste		
		$\overline{ER}_{VH}$ (%)	$\overline{ER}_{dir}$ (%)	$\overline{ER}_{IT}$ (%)	$\overline{ER}_{VH}$ (%)	$\overline{ER}_{dir}$ (%)	$\overline{ER}_{IT}$ (%)
30 m	P042	58.54	1.51	16.75	8.39	3.89	14.04
	P384 - ref. <sup>a</sup>	-	-	11.88	-	-	13.77
	P385	30.48	9.07	12.24	6.83	0.85	8.67
60 m	P384 - ref. <sup>a</sup>	-	-	14.50	-	-	3.86
	P385	27.97	10.09	14.09	4.68	3.03	9.25

### Erro do Shear Factor

O shear factor numérico é determinado pela equação 3.4 usando as velocidades obtidas pelos resultados numéricos. A análise do erro do shear factor é feita separadamente para as estações de medição P384 e P385.

$$SF = \log(\overline{V}h_{60m}/\overline{V}h_{30m})/\log(60/30) \quad (3.4)$$

Para a determinação do erro absoluto do shear factor é feita uma busca aos valores experimentais da velocidade com a mesma tolerância da análise dos erros relativos apresentados anteriormente, partindo do valor numérico da velocidade e direcção obtidos na estação de medição a 60 m. Calcula-se uma velocidade média experimental a 60 m com os dados saídos da filtragem.

De seguida procede-se à sincronização temporal para os dados experimentais a 30 m na mesma estação de medição, calcula-se o shear factor experimental (eq. 3.4) e procede-se ao cálculo do erro absoluto (eq. 3.5).

$$EA_{SF} = SF_{num} - SF_{exp} \quad (3.5)$$

A razão de se optar pelo erro absoluto deve-se ao facto do shear factor experimental atingir por vezes valores muito próximos de zero. O procedimento de validação do shear factor é feito em separado para a estação de medição P384 e P385.

Na tabela 3.15 apresentam-se as médias pesadas do módulo<sup>2</sup> dos erros absolutos do shear factor para sudeste, noroeste e global.

$$\overline{EA}_{SF} = \sum peso_i * |EA_{SF_i}| \quad (3.6)$$

De acordo com a tabela 3.15 para a estação de medição P384 o erro do shear factor é melhor aproximado para sudeste do que para noroeste. Para a estação de medição P385

<sup>2</sup>O mesmo que o valor absoluto

Tabela 3.15: Média pesada do módulo dos erros absolutos do shear factor

		$EA_{SF}$	$EA_{SF_{global}}$
P384	SE	0.02	0.04
	NO	0.05	
P385	SE	0.04	0.03
	NO	0.03	

acontece o inverso.

Na análise global, o erro do shear factor é mais baixo na estação de medição P385 do que na P384, a explicação para isto advém dos maiores efeitos de turbulência sentidos na estação de medição P384.

A análise das tabelas B.5 e B.6 permitem identificar que o padrão de erro do shear factor numérico foi subestimar a sudeste e noroeste para a estação de medição P384.

Em relação ao P385 foi subestimar a sudeste e sobrestimar a noroeste. Com isto espera-se a presença de um número elevado de perfis de velocidade invertidos junto aos aerogeradores pois a estação mais junta a estes, P385, subestimou a sudeste com valores abaixo do limite inferior 0, sendo que a totalidade dos shear factor experimentais neste caso estão acima de 0. A noroeste a totalidade dos shear factor numéricos são também negativos, mas neste caso os experimentais também.

### 3.3.2 Resultados WINDSIM

A análise do campo de escoamentos (apêndice C) é uma das partes mais importantes deste trabalho. Aqui faz-se uma análise aos efeitos de recirculação, velocidades horizontais, zonas com altas intensidades de turbulência, inclinações verticais e condições gerais do posicionamento dos aerogeradores. Os efeitos de recirculação são os mais difíceis de detectar com modelos lineares. Estes tipos de fenómenos acontecem derivado à topografia do terreno e têm maior probabilidade de aparecer nos terrenos complexos.

Este fenómeno é crítico se acontecer na zona dos aerogeradores, pois é muito severo para as máquinas. Problemas de fadiga estrutural podem aparecer rapidamente. As zonas de separação do escoamento são também zonas mais difíceis de correlacionar com os dados de campo através das simulações.

#### 3.3.2.1 Campo de velocidades

A velocidade horizontal (m/s) no WINDSIM é calculada da seguinte forma:

$$V_h = \sqrt{UCRT^2 + VCRT^2} \quad (3.7)$$

A análise dos perfis de velocidade vai incidir preferencialmente dentro da área do parque. De acordo com os vários mapas de contornos a área do parque é constantemente a zona com maior intensidade da velocidade.

**Sudeste:** Nas direcções sudeste, o comportamento do escoamento é criar zonas de baixas velocidades com possibilidade de efeitos de recirculação a montante do parque (de acordo com a direcção do escoamento), dentro do “V” e a jusante do parque. A zona entre a cumeada *A* e *B* (dentro do “V”) é bastante crítica pois em todos os escoamentos a sudeste as velocidades são bastantes baixas, o que indicia fenómenos de recirculação com a conseqüente separação do escoamento (fig. 3.7).

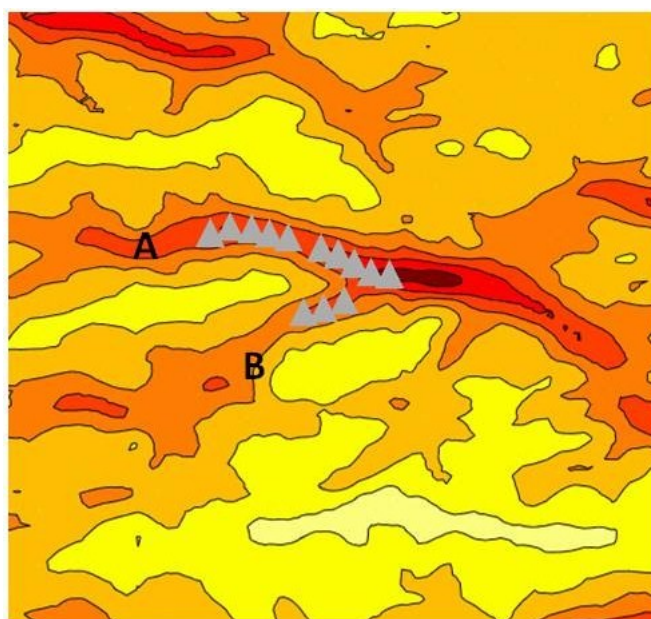


Figura 3.7: Campo de velocidades  $120^\circ$  ( $h=85$  m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

Existe uma perda da intensidade da velocidade a jusante do parque, porque a faixa da cumeada *A* tem uma cota maior do que a *B*. A cumeada *A* funciona quase como uma “parede” criando efeitos de recirculação a jusante influenciando a cumeada *B*. As zonas dos aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8 têm portanto velocidades menores do que as restantes derivado a este efeito.

No topo do parque onde se situa a estação de medição P042 a zona de intensidade máxima tem um contorno maior para as direcções  $127.5^\circ$ ,  $135^\circ$  e  $142.5^\circ$  (fig. C.5 e C.6 em apêndice), logo estas direcções são de maior aproveitamento energético para os aerogeradores situados no topo.

**Noroeste:** A noroeste as zonas de recirculação a montante do parque ficam um pouco mais afastadas (fig. 3.8). Os problemas de recirculação dentro do “V” e a jusante do parque continuam a existir. A cumeada *A* continua a ser a com maior intensidade de

velocidade, apesar de estar a jusante. É de salientar que para direcção 307.5°, existem duas zonas com pico de intensidade no topo do parque (fig. C.14).

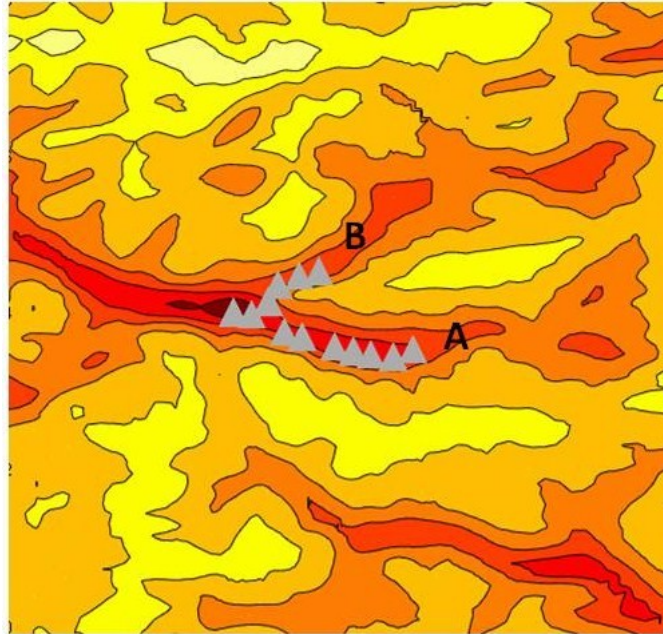


Figura 3.8: Campo de velocidades 300° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

### Conclusão:

1. Pode-se concluir que a cumeadada *A* influencia mais a *B* quando o escoamento vem de sudeste do que a *B* influencia *A* na noroeste.
2. A influência da cumeadada *A* sobre a *B* vai ter bastante impacto na velocidade do vento nos aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8 para sudeste.
3. As faixas de recirculação são mais visíveis para as direcções sudeste o que corrobora a menor correlação dos dados numéricos com os experimentais nestas direcções, visto que o programa tem mais dificuldade em modelar estes fenómenos.

### 3.3.2.2 Campo da intensidade de turbulência

A intensidade de turbulência (%) no WINDSIM é determinada da seguinte forma:

$$100\% \times \frac{\sqrt{\frac{4}{3}KE}}{\sqrt{UCRT^2 + VCRT^2}} \quad (3.8)$$

A análise do campo de intensidades de turbulência permite verificar zonas propícias a elevadas intensidades. A turbulência é um fenómeno que afecta bastante as máquinas diminuindo o seu tempo de vida. A fadiga estrutural das máquinas está intimamente

ligada a este fenómeno derivado ao seu comportamento variável, descurar este fenómeno no projecto de um parque pode ter um “preço muito caro”.

**Sudeste** Para escoamentos vindos de sudeste conseguem-se detectar 3 zonas de elevada intensidade de turbulência (>25 %) como se pode ver na figura exemplo 3.9. A primeira zona a montante do parque, a segunda dentro do “V” e a terceira a jusante, isto de acordo com a direcção do escoamento.

Para as direcções sudeste a cumeada *B* regista sempre maior intensidade de turbulência derivado à passagem do escoamento pela *A*. Este efeito pode ser notado na prática na estação de medição P384 que regista sempre maiores turbulências do que os restantes para os escoamentos sudeste. A menor intensidade de turbulência regista-se na zona mais alta do parque onde se situa a estação de medição P042.

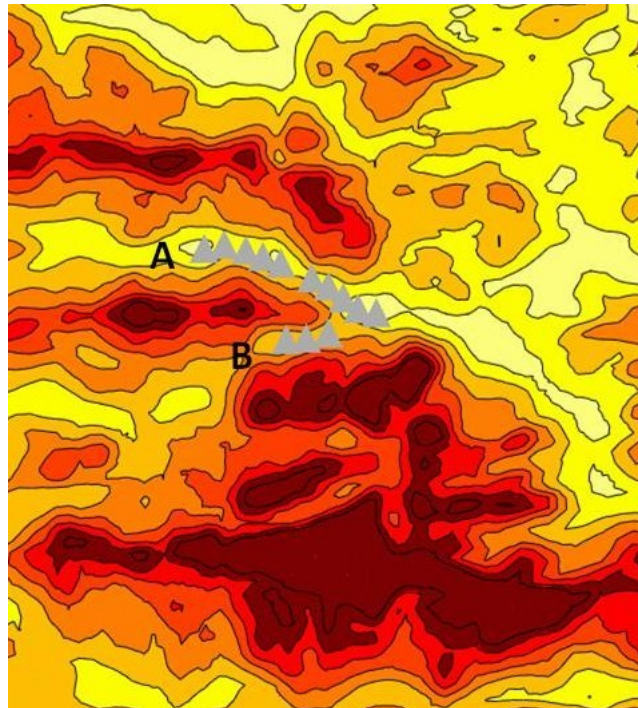


Figura 3.9: Campo da intensidade de turbulência  $112.5^\circ$  ( $h=85$  m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

**Noroeste:** De acordo com a análise dos campos a noroeste a dispersão das faixas com elevada intensidade de turbulência são maiores do que a sudeste, mas menores em tamanho (fig. 3.10).

A influência da cumeada *B* sobre a *A* nos escoamentos noroeste é menor do que a *A* sobre a *B* nos sudeste. Isto pode ser explicado pela maior cota ao longo da cumeada *A*. A cumeada *A* regista menores valores de intensidade de turbulência a noroeste do que a *B* a sudeste.

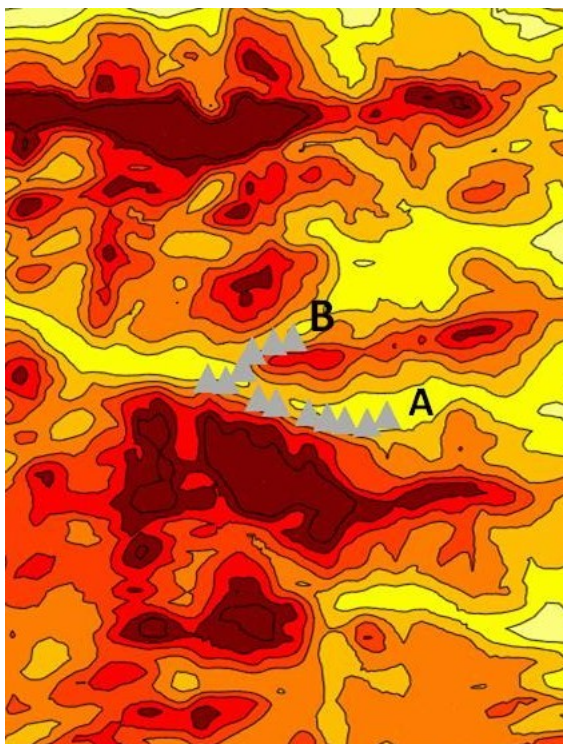


Figura 3.10: Campo da intensidade de turbulência  $300^\circ$  ( $h=85$  m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

### Conclusão:

1. Os aerogeradores situados perto da zona mais alta do parque são os menos afectados pela turbulência
2. Os aerogeradores situados na cumeada *B* vão “sofrer” mais com a turbulência do que os situados na *A* para as direcções sudeste.
3. As direcções a sudeste com maiores faixas de intensidade de turbulência elevadas são as direcções  $120^\circ$  e  $127.5^\circ$ .
4. Os aerogeradores situados na cumeada *A* são sempre os menos fustigados pela turbulência para o conjunto global das direcções.
5. Globalmente a intensidade de turbulência no parque é menor para noroeste em relação a sudeste.
6. As direcções a noroeste com as maiores faixas de intensidade de turbulência são as direcções  $285^\circ$  e  $292.5^\circ$ .
7. Para todas as zonas do parque e em todas as direcções, a turbulência manteve valores razoáveis para a instalação de um parque eólico.

### 3.3.2.3 Campo da inclinação do escoamento

A inclinação do escoamento (graus) no WINDSIM é determinada da seguinte forma:

$$\text{atan} \left( \frac{WCRT}{Vh} \right) \quad (3.9)$$

As zonas com inclinações do escoamento demasiadamente baixas ( $< -8^\circ$ ) ou elevadas ( $> 8^\circ$ ), não são zonas ideais para a implementação dos aerogeradores. Elevadas inclinações do escoamento implicam esforços verticais na estrutura do aerogerador para o qual este pode não estar projectado. Uma análise cuidada deste parâmetro deve ser levada em conta para evitar danos estruturais a curto prazo.

**Sudeste:** A montante do parque existe uma zona com elevadas inclinações do escoamento ( $> 12^\circ$ ) paralelamente à cumeada *A*. Dentro do “V” existem duas zonas, uma com inclinações elevadas e outra com inclinações baixas ( $< 12^\circ$ ). A jusante do parque existe uma zona com baixas inclinações paralelamente à cumeada *B* (fig. 3.11).

A zona de elevadas inclinações a montante da cumeada *A* deve-se ao facto dos escoamentos a sudeste “entrarem” por esta zona. A zona de baixas inclinações a jusante da cumeada *B* deve-se ao facto dos escoamentos “saírem” por esta zona. Dentro do “V” o escoamento é obrigado a descer a encosta da cumeada *A* e subir a encosta da *B*, isto verifica-se pela presença de duas faixas de inclinação, uma acima de  $12^\circ$  e outra abaixo de  $-12^\circ$ . No meio destas duas faixas existe uma zona neutra (inclinação a  $0^\circ$ ).

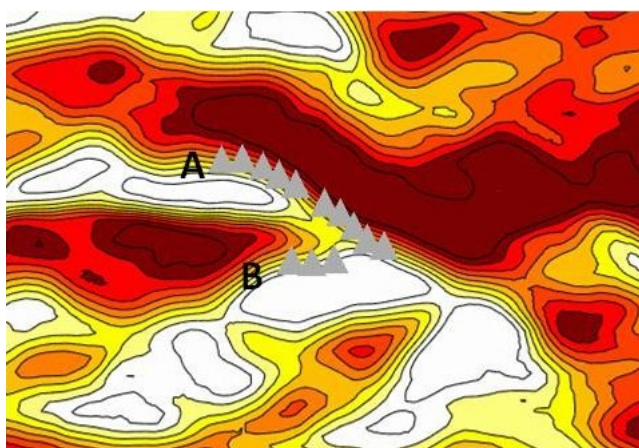


Figura 3.11: Campo da inclinação do escoamento  $105^\circ$ , os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

**Noroeste:** A noroeste destacam-se junto ao parque duas zonas com elevadas inclinações do escoamento ( $> 12^\circ$ ) e uma zona de baixas inclinações ( $< 12^\circ$ ). A primeira zona de elevadas inclinações fica a montante do parque junto à cumeada *B*. A segunda zona de elevadas inclinações fica dentro do “V”. A zona de baixa inclinações fica a jusante da cumeada *A* (fig. 3.12).

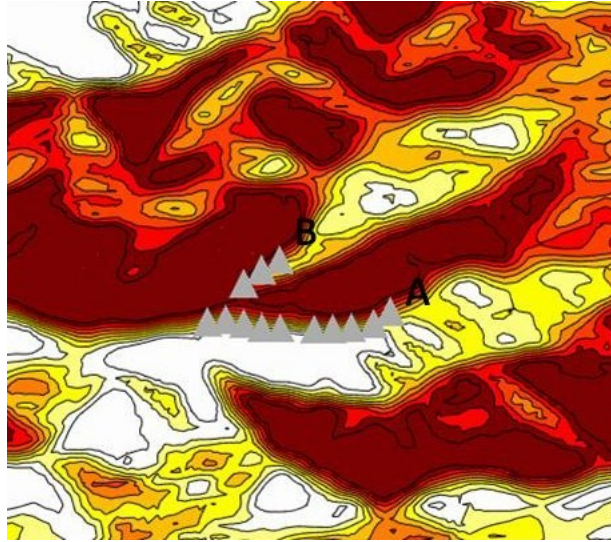


Figura 3.12: Campo da inclinação do escoamento  $315^\circ$ , os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

Neste caso, dentro do “V” só existe uma faixa de inclinação elevada, isto porque a cumeadas *B* influencia menos os escoamentos vindos de noroeste dentro do “V”, do que a cumeadas *A* escoamentos vindos de sudeste.

### Conclusões:

1. A direcção a sudeste mais crítica é a  $142.5^\circ$ , especialmente pelos efeitos das baixas inclinações no aerogerador WTG6 (fig. C.42).
2. A direcção a noroeste mais crítica é a  $322.5^\circ$ , especialmente pelos efeitos das altas inclinações no aerogerador WTG6 (fig. C.51).
3. A medida que ângulo de escoamento aumenta a sudeste a faixa de elevada inclinação dentro do “V” diminui e cada vez mais a faixa de baixa inclinação tem influência nos aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8.
4. A medida que o ângulo de escoamento a noroeste aumenta, a faixa de elevada inclinação dentro do “V” aumenta, atingindo cada vez mais os aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8.

#### 3.3.2.4 Análise da convergência

O processo de convergência é rápido, no início da simulação aplicou-se 200 iterações para todas as direcções. Verifica-se que são necessárias mais iterações (50 no geral) para obter uma solução com resíduos mais baixos e estabilizados. Na tabela 3.16 pode-se ter uma noção dos valores dos resíduos pesados atingidos. O resíduo de referência usado é diferente do resíduo usado para o cálculo na versão “trial” pois este resíduo está adaptado

para malhas grosseiras. Para isso e de acordo com o manual PHOENICS [8, Malin M. R.] o resíduo de referência é mudado para as “reference inflow quantities”.

O valor do resíduo pesado com que o programa para automaticamente as iterações é de 1%. Houve alguns resíduos especialmente nas simulações a sudeste para a velocidade U1 que ficaram algo acima do valor 1%, especialmente para a direcção 142.5°, mas a análise dos parâmetros iterados nas zonas dos aerogeradores e estações de medição, através da animação da evolução dos resíduos e gráficos dos “spot values”, revelam estabilização dos resultados na área de interesse.

$$resíduo\ pesado = \frac{res_{sum}}{ref_{residual}} \times 100\% \quad (3.10)$$

$$ref_{residual} = ref_{inflow}$$

Tabela 3.16: Resíduos, número de iterações e tempos de computação

	$resíduo\ pesado = \frac{res_{sum}}{ref_{inflow}} \times 100\%$						Iter.	Tempo (h:min:s)
	P1	U1	V1	W1	KE	EP		
105°	6.32E-02	1.29E00	2.30E-02	4.80E-3	6.53E-01	1.80E00	200+50	00:37:43+00:09:36
112.5°	2.14E-02	1.65E+01	8.10E-03	4.40E-01	3.71E-01	1.60E00	200+50	00:37:32+00:09:30
120°	1.45E-02	2.51E+01	6.49E-03	5.3E-01	2.99E-01	1.57E00	200+50	00:38:23+00:10:54
127.5°	3.66E-02	2.74E+01	9.83E-03	8.87E-01	4.00E-01	1.60E00	200+50	00:37:40+00:10:20
135°	4.99E-03	1.34E+01	2.11E-03	8.09E-02	1.18E-01	1.46E00	200+50	00:38:24+00:09:40
142.5°	4.68E-02	8.17E+01	1.51E-02	4.7E-02	6.20E-01	1.68E00	200+50	00:38:25+00:09:41
285°	1.29E-02	1.09E-01	5.51E-03	8.34E-01	4.18E-01	1.64E00	200+50	00:38:39+00:11:04
292.5°	1.83E-02	4.45E-01	9.04E-03	1.44E00	6.78E-01	1.98E00	200+50	00:38:28+00:10:05
300°	6.65E-03	3.48E-01	4.20E-03	9.08E-02	1.92E-01	1.50E00	200+50	00:38:01+00:10:06
307.5°	8.83E-04	7.65E-02	8.08E-04	2.89E-02	7.73E-02	1.45E00	200+50	00:37:57+00:11:09
315°	7.97E-03	1.55E00	4.10E-03	7.38E-02	3.02E-01	1.69E00	200+100	00:38:56+00:18:33
322.5°	1.88E-03	2.71E-01	1.22E-03	2.52E-02	2.29E-01	1.72E00	200+50	00:40:51+00:12:24

### 3.3.2.5 Análise do “layout” dos aerogeradores de acordo com os resultados numéricos

O parque em estudo é constituído por 13 aerogeradores (fig.3.2) e 3 estações de medição (P042, P384, P385). A análise da implementação dos aerogeradores é feita recorrendo à norma IEC 61400 [IEC]. O conjunto de valores a partir dos quais a implementação de um aerogerador é “questionável” são:

1. intensidade de turbulência >18%
2. shear factor <0.0 ou shear factor >0.20
3. inclinação do escoamento >8° ou inclinação do escoamento <-8°

São apresentados no apêndice D perfis verticais e tabelas dos resultados numéricos específicos nas zonas dos 13 aerogeradores com os seguintes parâmetros: velocidade horizontal, intensidade de turbulência, inclinação do escoamento e shear factor. A velocidade nos perfis verticais está adimensionalizada ( $V_h/V_{h\_85\text{ m}}$ ). As linhas a traço interrompido nos gráficos indicam o diâmetro do rotor e a linha a traço ponto a altura do “hub”.

A partir da tabela específica de cada aerogerador são construídas duas tabelas (tabela 3.17) com os resultados médios pesados de cada parâmetro de escoamento para as direcções sudeste e noroeste, os resultados são avaliados a partir destas tabelas e algumas vezes recorre-se às tabelas individuais para explicar alguns valores específicos. As frequências de direcção necessárias para a média pesada são baseadas na rosa dos ventos da estação de medição P042, a direcção de escoamento na estação de medição é calculada recorrendo à equação 3.1. A escolha desta estação de medição deve-se à maior representatividade temporal das medições em relação aos outros dois. Estas tabelas são importantes para avaliar as características de escoamento na zona dos aerogeradores de uma maneira global entrando com a importância de cada direcção de escoamento. Cada tabela contém resultados a 44 m a.n.s, 85 m a.n.s e 126 m a.n.s.

**Velocidade horizontal adimensionalizada:** A forma do perfil de velocidades é muito importante para avaliar o impacto da coluna de ar sobre o aerogerador. Perfis de velocidade invertidos não são bons para o funcionamento, especialmente pela torção e flexão imposta às pás. Para a análise dos perfis, o valor da velocidade pontual não tem grande importância mas sim a forma da variação da velocidade com a altura, para isso adimensionaliza-se a velocidade facilitando a leitura.

Os perfis verticais mais uniformes nas direcções sudeste encontram-se nos aerogeradores WTG6, WTG7, WTG8 e WTG13. Aliás, para os aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8, todos os perfis verticais encontram-se “ligeiramente” inclinados (ver exemplo fig. 3.13) para a frente o que é bom; se o aerogerador tem uma inclinação contrária a um perfil ligeiramente inclinado para a frente, aproveita mais a componente horizontal da velocidade optimizando o aproveitamento. Os perfis de velocidade mais críticos (perfis invertidos) a sudeste são para os aerogeradores WTG1, WTG2, e WTG3.

Em relação aos perfis nas direcções noroeste, o perfil mais uniforme é para o aerogerador WTG13, os restantes apresentam perfis ligeiramente invertidos.

Os aerogeradores WTG1 e WTG2 são os que registam maiores velocidades, cerca de 10 m/s para sudeste e 10.5 m/s para noroeste. As velocidade médias mais baixas registam-se nos aerogeradores WTG7, WTG6 e WTG8 na ordem dos 7.5 m/s a sudeste e 8.2 m/s a noroeste.

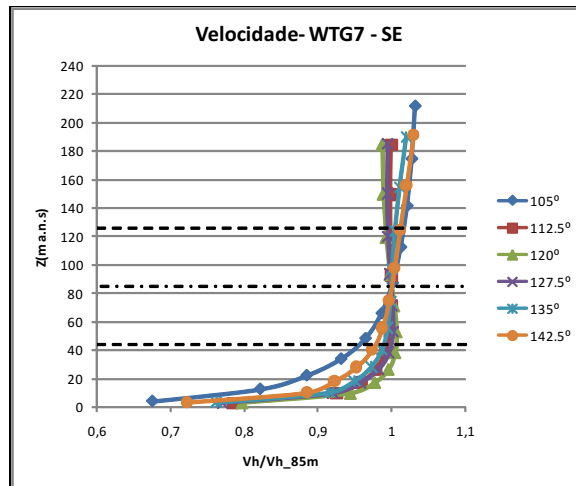


Figura 3.13: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG7

No aerogerador WTG3 para a direcção  $300^\circ$ , evidencia-se um perfil de velocidades bastante diferente do que para as restantes direcções a noroeste (fig. 3.14). Esta irregularidade do perfil também é verificada para a intensidade de turbulência, inclinação do escoamento e shear factor e só acontece para esta direcção de escoamento.

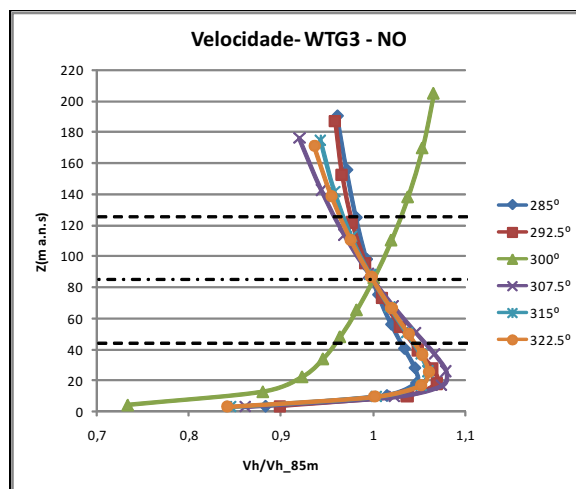


Figura 3.14: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG3

### Conclusão:

1. A maior parte dos perfis verticais não têm uma inclinação óptima (perfil invertido) para o melhor desempenho dos aerogeradores (fig. 3.14) especialmente nos aerogeradores WTG1 a WTG5 e WTG9 a WTG12, resultando em valores calculados do shear factor abaixo do limite inferior. Esta análise está condicionada a sudeste pela tendência do programa subestimar os valores de shear factor experimentais com valores numéricos abaixo de 0.
2. No intuito de solucionar o problema dos perfis verticais no aerogerador WTG3 para a direcção  $300^\circ$ , o ideal seria repetir a simulação testando diferentes malhas,

modelos de turbulência, etc. Com isto em princípio, conseguia-se verificar a origem do desfasamento dos perfis.

**Intensidade de turbulência:** Em relação à intensidade de turbulência os aerogeradores mais críticos são o WTG6, WTG7 e WTG8. A análise focar-se-á no WTG7 e WTG8 pois os seus valores são os mais altos.

No aerogerador WTG8 a intensidade de turbulência média para sudeste é 15.3 % a 85 m a.n.s. O valor de intensidade de turbulência específica mais alta registada neste aerogerador é na direcção 135° atingindo os 18.1 % a 44 m a.n.s (valor acima do limite superior) e 17 % a 85 m a.n.s. No caso noroeste, o valor da intensidade de turbulência média é de 13 % a 85 m a.n.s. O perfil de intensidade de turbulência (fig. 3.15) do aerogerador não é uniforme e no caso das direcções noroeste o perfil é muito parecido entre si nas várias direcções específicas.

O aerogerador WTG7 regista a segunda maior intensidade de turbulência média a sudeste, cerca de 14.7 % a 85 m a.n.s, o seu valor máximo específico no caso sudeste é atingido também a 135° situando-se nos 16.6 % a 44 m a.n.s e 16.1 % a 85 m a.n.s. No caso noroeste o valor médio é semelhante ao do aerogerador WTG8. Em relação ao perfil de intensidade de turbulência, este é muito semelhante ao do WTG8.

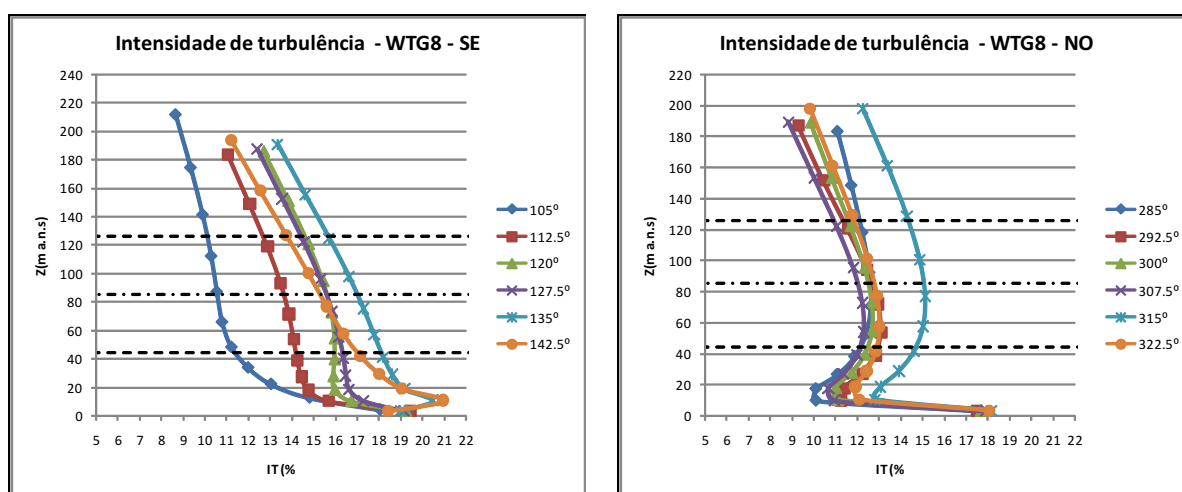


Figura 3.15: Perfis da intensidade de turbulência WTG8

### Conclusão:

1. A turbulência é maior na zona dos aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8 nos escoamentos a sudeste e a noroeste, mas em um só caso específico ultrapassa o valor limite. A maior intensidade de turbulência registada nestes aerogeradores para as direcções sudeste, deve-se ao facto de após a passagem do escoamento na cumeada de entrada, existir a tendência do aumento da turbulência na cumeada de saída onde estes estão implementados, que está a uma cota mais baixa (fig. 3.16). A noroeste

os três aerogeradores apresentam a mesma intensidade média de turbulência cerca de 13 % a 85 m a.n.s.

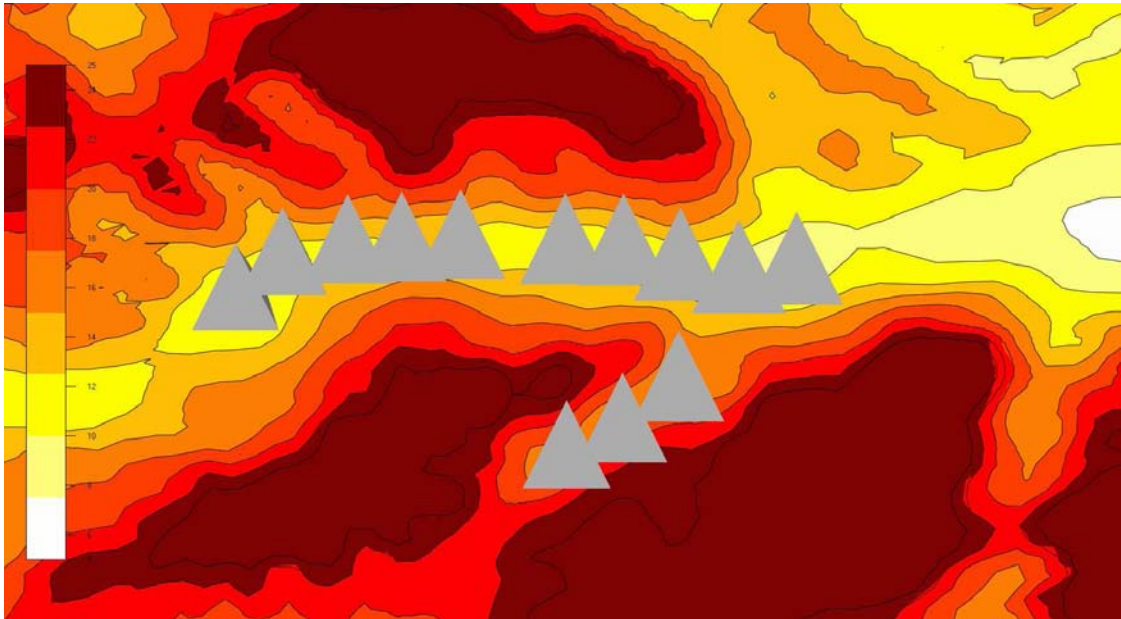


Figura 3.16: Intensidade de turbulência para o escoamento a 113°

2. Os valores de intensidade de turbulência tendem a ser maiores a 44 m a.n.s. Isto explica-se pelo maior efeito da rugosidade e topografia do terreno no escoamento.
3. Em relação aos perfis a maior parte não é uniforme, excepto para os aerogeradores WTG1 e WTG2 nas direcções sudeste.
4. Os aerogeradores com menor intensidade de turbulência registada são os WTG1, WTG2 e WTG3 (cota mais elevada) com intensidades médias na ordem dos 9.5 % a sudeste e 11.5 % a noroeste.
5. Pode-se considerar que de acordo com esta análise e de uma maneira geral, o “layout” dos aerogeradores em relação à influência da turbulência não oferece preocupações.

**Inclinação do escoamento<sup>3</sup>:** Em relação à inclinação do escoamento, o aerogerador mais crítico é o WTG6. No aerogerador WTG4, o valor médio da inclinação do escoamento está dentro do limite, mas existe uma direcção específica onde o limite não é respeitado.

Para o aerogerador WTG6 a inclinação média de uma maneira geral é mais baixa do que o valor limite de  $-8^\circ$  nas direcções sudeste e acima do valor limite de  $8^\circ$  a noroeste. O valor da inclinação específica mais baixa, atinge-se na direcção  $135^\circ$ , cujo valor é  $-9.9^\circ$ . O valor mais alto atinge-se na direcção  $322.5^\circ$ , cujo valor é  $11.4^\circ$ . Os perfis de inclinação do aerogerador WTG6 para o conjunto das direcções sudeste e noroeste estão apresentados na figura 3.17.

<sup>3</sup>Os valores de inclinação do escoamento analisados são à altura do “hub” 85 m a.n.s

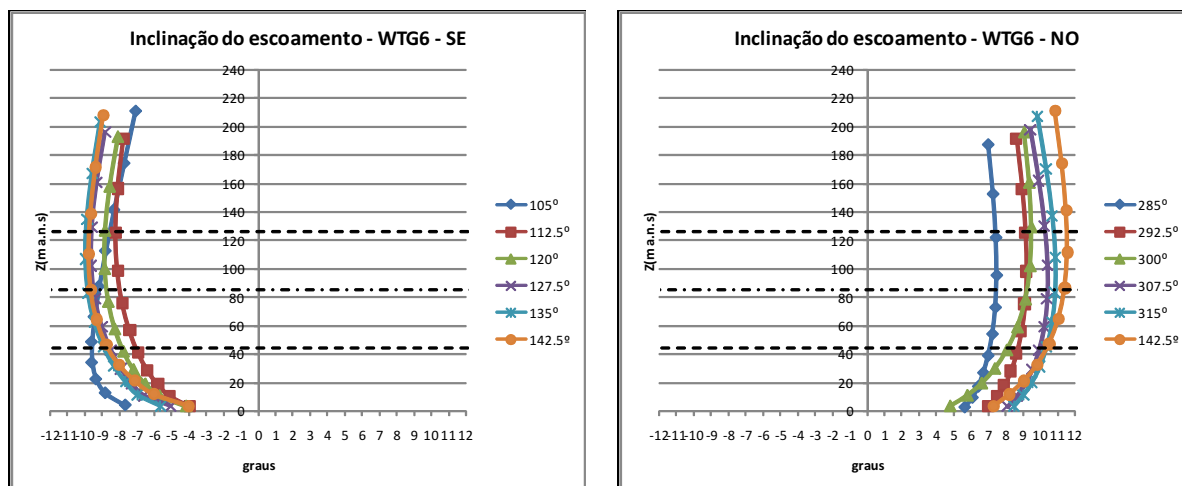


Figura 3.17: Perfis da inclinação do escoamento WTG6

No caso do aerogerador WTG4 o valor médio da inclinação é de  $5.3^\circ$  a sudeste e  $-4.2^\circ$  a noroeste. O valor específico acima do limite atinge-se na direcção  $105^\circ$  no valor de  $8.2^\circ$ .

### Conclusão:

1. Quando o escoamento entra pela direcção noroeste a sua tendência é subir a primeira cumeada (zona onde estão implementadas os aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8), logo os valores de inclinação são positivos, quando o escoamento entra por sudeste o contrário acontece pois a cumeada onde estão localizados os aerogeradores situa-se a jusante da cumeada de “entrada”.
2. Os aerogeradores com maior inclinação do escoamento vertical são o WTG6 e WTG7; o aerogerador WTG6 ultrapassa mesmo os limites definidos para o bom funcionamento das máquinas. Através dos perfis do WTG6 pode-se ter uma ideia de como este aerogerador está sempre a ser influenciado por inclinações de escoamento severas para o seu normal funcionamento .
3. Os aerogeradores colocados no topo do parque são os menos prejudicados pela inclinação do escoamento.

**Shear factor<sup>4</sup>:** A análise dos valores do shear factor mostra que existem bastantes valores negativos. Em nenhum caso se ultrapassa o limite superior de 0.2.

O aerogerador com o shear factor médio mais baixo é o WTG1 com um valor de -0.09 no caso sudeste e -0.11 no caso noroeste, ambos os valores estão abaixo do limite 0 necessário para funcionamento ideal dos aerogeradores.

O aerogerador com o shear factor médio mais alto é o WTG6 no valor de 0.03 nas direcções sudeste. Recorrendo às tabelas específicas (apêndice D) o valor máximo de shear factor

<sup>4</sup>Os valores de shear factor do escoamento analisados são à altura do “hub” 85 m a.n.s

específico para este aerogerador é de 0.09 e atinge-se na direcção 142.5°, valor abaixo do limite.

### Conclusão:

1. Os valores mais críticos do shear factor são obtidos para os aerogeradores da extremidade sul do parque :WTG1, WTG2 e WTG3.
2. O problema do shear factor não é ultrapassar o limite de 0.2 mas na maior parte das vezes estar abaixo do valor 0. Isto é consequência do elevado número de perfis de velocidade invertidos obtidos nas soluções numéricas.
3. Apesar do elevado número de aerogeradores com o shear factor negativo poucos ficam abaixo do limite inferior -0.1. Alguns fabricantes de aerogeradores, aceitam um shear factor na zona das máquinas com este valor.
4. O shear factor só obteve globalmente valores positivos (quantitativamente) para o aerogerador WTG6, WTG7 e WTG8 nas direcções sudeste.

Tabela 3.17: Características do vento na zona dos aerogeradores - média pesada - sudeste/noroeste

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.7	1.3	8.6	-0.05
T2	10.2	1.7	10.0	-0.05
T3	9.7	5.6	11.0	-0.04
T4	9.4	5.8	11.3	-0.03
T5	9.3	4.9	11.5	-0.02
T6	7.5	-8.4	15.0	0.03
T7	7.6	-4.3	15.0	0.01
T8	7.3	-0.4	16.0	0.04
T9	9.2	3.4	11.5	-0.03
T10	9.3	1.2	11.9	-0.04
T11	9.1	2.6	11.0	-0.02
T12	8.9	1.4	11.0	-0.02
T13	8.7	-1.8	10.4	0.00
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.2	0.6	8.8	-0.09
T2	9.8	1.5	9.6	-0.08
T3	9.4	4.9	10.4	-0.07
T4	9.1	5.3	10.9	-0.06
T5	9.1	4.4	11.1	-0.05
T6	7.6	-9.2	14.3	0.03
T7	7.7	-5.8	14.7	-0.01
T8	7.4	-2.6	15.3	0.01
T9	9.0	2.8	11.2	-0.06
T10	9.0	1.6	11.3	-0.06
T11	8.9	2.1	10.6	-0.05
T12	8.7	1.5	10.5	-0.04
T13	8.6	-1.7	10.2	-0.02
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.8	0.2	8.6	-0.11
T2	9.5	1.3	9.0	-0.09
T3	9.2	4.3	9.6	-0.08
T4	8.9	5.0	10.1	-0.07
T5	8.9	4.0	10.4	-0.07
T6	7.7	-9.2	13.1	0.04
T7	7.7	-6.5	13.6	0.01
T8	7.5	-3.8	14.2	0.01
T9	8.8	2.5	10.5	-0.07
T10	8.8	1.7	10.4	-0.08
T11	8.7	1.8	9.9	-0.07
T12	8.6	1.5	9.6	-0.06
T13	8.6	-1.6	9.5	-0.04

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.4	0.0	11.6	0.07
T2	10.8	-0.6	11.2	-0.06
T3	9.9	-1.4	11.6	0.04
T4	9.8	-4.5	12.7	-0.04
T5	9.8	-3.8	12.5	-0.05
T6	8.2	9.0	13.5	0.01
T7	8.5	5.0	13.3	-0.03
T8	8.3	1.1	12.9	0.03
T9	9.6	-2.8	12.2	-0.05
T10	9.5	-0.2	12.4	0.04
T11	9.5	-2.1	11.8	-0.04
T12	9.1	-0.3	11.0	-0.03
T13	8.3	3.0	10.7	0.01
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.7	0.6	11.7	-0.11
T2	10.3	0.1	11.2	-0.09
T3	9.6	-0.9	11.8	-0.05
T4	9.5	-4.2	12.6	-0.06
T5	9.5	-3.5	12.7	-0.07
T6	8.2	9.7	13.1	0.01
T7	8.3	6.4	13.1	-0.03
T8	8.2	3.2	13.0	-0.04
T9	9.3	-2.4	12.5	-0.07
T10	9.2	-0.3	12.4	-0.07
T11	9.2	-1.4	11.9	-0.07
T12	8.9	-0.4	11.1	-0.05
T13	8.4	2.8	10.8	0.01
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.3	0.9	10.8	-0.12
T2	10.0	0.6	10.3	-0.09
T3	9.4	-0.6	10.9	-0.05
T4	9.3	-3.9	11.6	-0.06
T5	9.2	-3.3	12.0	-0.07
T6	8.2	9.7	11.9	0.02
T7	8.2	7.1	11.9	-0.02
T8	8.0	4.3	11.9	-0.03
T9	9.0	-2.2	12.0	-0.08
T10	8.9	-0.5	11.8	-0.08
T11	9.0	-1.0	11.4	-0.08
T12	8.7	-0.3	10.8	-0.07
T13	8.3	2.6	10.6	-0.03

**Resultados FLUENT :** Para finalizar a secção dos resultados finais, é apresentada uma comparação gráfica dos resultados obtidos nos aerogeradores com o WINDSIM em relação aos do FLUENT para o mesmo problema (consultar apêndice H). Notam-se semelhanças qualitativas nos gráficos da velocidade e turbulência. Em relação às semelhanças quantitativas não existem semelhanças na maior parte dos casos. Deixa-se ao critério do leitor e como proposta de trabalho futuro, a realização de um estudo em que se avaliam a razão destas diferenças de resultados entre modelos.

# Capítulo 4

## Conclusões

No capítulo conclusões faz-se um resumo das conclusões mais importantes tiradas ao longo do trabalho.

### Modelação

1. O terreno em estudo revela grandes inclinações o que dificulta a convergência da solução. A malha tem dificuldades em manter-se ortogonal ao terreno.
2. A solução não converge para uma malha com 50 elementos na vertical e altura do domínio de 5000 m. A solução converge para uma malha de 40 elementos na vertical e altura do domínio de 4000m. Isto indica que existe uma sensibilidade à malha que por imperativos de tempo não pode ser testada.
3. Pela observação das rosas dos ventos para as três estações, as direcções mais importantes na perspectiva do aproveitamento energético localizam-se nos sectores sudeste e noroeste.

### Validação dos resultados

1. Os erros mais representativos do desempenho do software são os das direcções noroeste a 60 m de altura.
2. O programa correlaciona melhor as direcções do escoamento, seguidamente da turbulência e por fim a velocidade.
3. O programa correlaciona melhor a noroeste em relação a sudeste, isto deve-se à maior intensidade de turbulência registada na estação de medição de referência P384 a sudeste.

4. Os dados experimentais da estação de medição P042 são os mais difíceis de correlacionar.
5. A tendência do programa é subestimar o shear factor na estação de medição P385 a maior parte das vezes com valores abaixo de 0 para a direcção sudeste. Esta é a explicação para o elevado número de perfis invertidos registados na zona dos aerogeradores pois a estação de medição P385 está perto da maior parte destes. Logo algum cuidado deve-se ter na análise do shear factor numérico na zona dos aerogeradores para escoamentos vindos de sudeste.

## Campos de escoamentos

1. Os efeitos de recirculação são mais visíveis para as direcções sudeste e o programa tem mais dificuldade em modelar este fenómeno. Isto verifica-se na validação dos resultados.
2. Para todas as zonas do parque e em todas as direcções a turbulência manteve valores razoáveis para a instalação de um parque eólico.
3. A medida que o ângulo de escoamento de referência aumenta a sudeste a faixa de elevada inclinação do escoamento dentro do “V” diminui e cada vez mais a faixa de baixa inclinação tem influência nos aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8.
4. A medida que o ângulo de escoamento de referência a noroeste aumenta, a faixa de elevada inclinação dentro do “V” aumenta, atingindo cada vez mais os aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8.

## “Layout” dos aerogeradores

1. A maior parte dos perfis verticais não têm uma inclinação óptima para o melhor desempenho dos aerogeradores especialmente nos aerogeradores WTG1 a WTG5 e WTG9 a WTG12, resultando em valores calculados do shear factor abaixo do limite inferior. A análise a sudeste para os aerogeradores WTG9 até ao WTG13, está condicionada pela tendência do programa subestimar os valores de shear factor numérico com valores abaixo de 0 quando os experimentais indicam valores positivos.
2. No aerogerador WTG3 para a direcção  $300^\circ$  evidencia-se um perfil de velocidades bastante diferente do que para as restantes direcções noroeste. Esta irregularidade do perfil também é verificada para a intensidade de turbulência, inclinação do escoamento e shear factor e só acontece para esta direcção de escoamento. No intuito de solucionar o problema, o ideal seria repetir a simulação testando diferentes malhas,

modelos de turbulência, etc. Com isto em princípio conseguia-se verificar a origem do desfasamento dos perfis.

3. A turbulência é maior na zona dos aerogeradores WTG6, WTG7 e WTG8 nos escoamentos a sudeste, mas em um só caso específico ultrapassa o valor limite. O valor limite atinge-se na direcção  $135^\circ$  para o WTG8 com o valor de 18.1 % a 44 m a.n.s, a 85 m a.n.s atinge 17 %.
4. Os aerogeradores com maior inclinação do escoamento vertical são o WTG6 e WTG7; o aerogerador WTG6 ultrapassa mesmo os limites definidos para o bom funcionamento das máquinas ( $-8^\circ < \text{inclinação} < 8^\circ$ ).
5. Os valores mais críticos do shear factor são obtidos para os aerogeradores da extremidade sul do parque :WTG1, WTG2 e WTG3.

## **Avaliação da ferramenta numérica**

O WINDSIM revela-se um programa de fácil aprendizagem para um iniciado em mecânica dos fluidos computacional. A maneira como estão dispostos os módulos facilita a construção do modelo a simular. Para a compreensão aprofundada das opções disponíveis no programa é necessário ter algum conhecimento de um software genérico como o FLUENT ou STAR-CCM+ para se ter uma ideia mais aprofundada do modo de funcionamento do programa.

O WINDSIM é uma ferramenta otimizada para a simulação de escoamentos sobre montanhas pois toda a sua base está montada para este tipo de estudos. Existe uma grande facilidade na criação de malhas, definição das condições de entrada, tipo de condições de fronteira porque todos estes parâmetros estão organizados em menus de fácil aprendizagem.

Como programa específico que é, alguma das opções de modelação não são de fácil visualização. Existe a necessidade de conhecer o software PHOENICS (software de base) para poder mudar alguns parâmetros de modelação, como as constantes dos modelos de turbulência, sistemas de discretização, factores de relaxação, etc., que não estão nos módulos WINDSIM.

A existência de formatos de ficheiros próprios (ex: mapas do terreno, dados meteorológicos, “layouts” de aerogeradores, etc.) em detrimento de formatos mais generalistas dificulta a introdução dos dados no programa aumentando a necessidade de recorrer a softwares externos como o MATLAB para a respectiva conversão.

Finalmente, algum cuidado deve-se ter quando se decide implementar um aerogerador recorrendo só aos resultados do programa. Uma comparação dos resultados obtidos através de vários softwares pode ser muito vantajoso. A avaliação experimental através

das estações de medição e novas técnicas experimentais de avaliação do recurso eólico, será sempre a base para todas as abordagens numéricas ao estudo dos parques eólicos.

## Referências Web

[WINDSIM] <http://www.windsim.com>

[PHOENICS] <http://www.cham.co.uk>

[IEC] <http://www.iec.ch>

# Bibliografia

- [1] Patankar V. Suhas “Numerical Heat Transfer and Fluid Flow”, McGraw-Hill, 1980
- [2] Castro, Rui “Introdução à energia eólica”, IST, 2003 (edição 1)
- [3] Wallbank, Tristan “WindSim Validation Study”, Windsim, 2008
- [4] Hanjalic, K., Launder, B.E. “A Reynolds stress model or turbulence and its application to thin shear flows.”, Journal of Fluid Mechanics, 1972 (Vol 52/pp. 609-638)
- [5] Blazek, J. “Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications”, Elsevier, 2001
- [6] Ferry, M. “New Features of MIGAL solver”, MFRDC, 2002
- [7] Leroy, J. “Wind field simulations at Askervein hill”, Ecole Centrale de Nantes, 1999
- [8] Malin M. R. “PHOENICS Frequently-Asked Questions; a selection”, CHAM, 2006
- [9] Wilcox D. C. “Turbulence Modeling for CFD”, DCW Industries, Inc., 1994

# Apêndice A

## Cálculos preliminares - resultados

### WINDSIM

Campo de velocidades 3D (m/s)

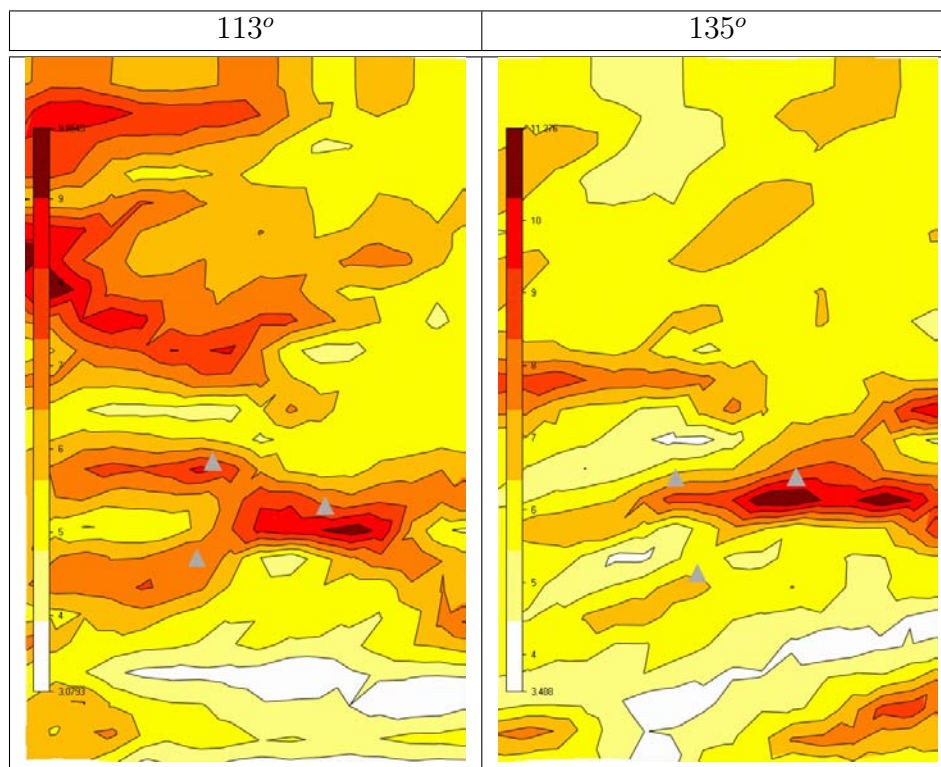


Figura A.1: Campo de velocidades 3D - versão “trial” - 113°e 135°, os triângulos designam a posição das estações de medição.

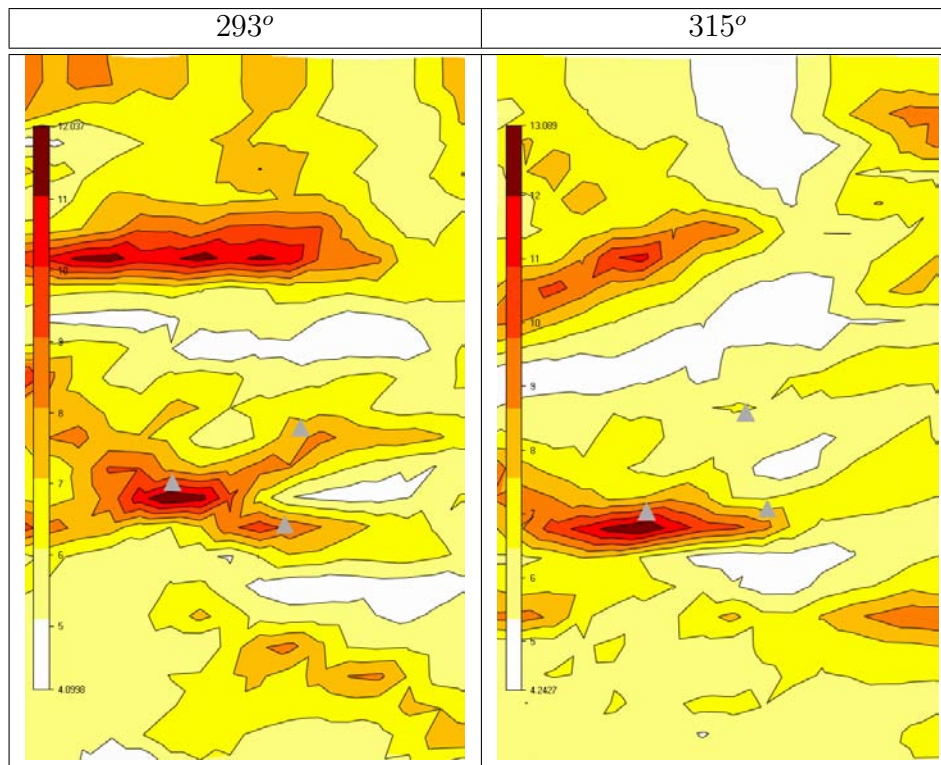


Figura A.2: Campo de velocidades 3D - versão “trial” - 293°e 315°, os triângulos designam a posição das estações de medição.

### Campo da intensidade de turbulência (%)

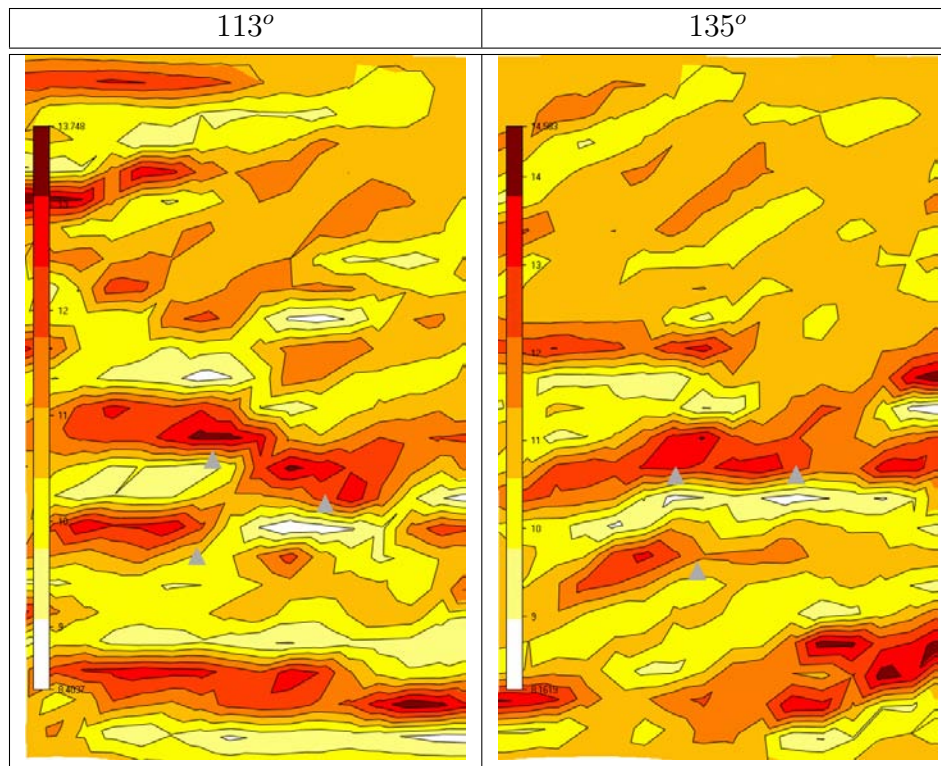


Figura A.3: Campo da intensidade de turbulência - versão “trial” - 113°e 135°, os triângulos designam a posição das estações de medição.

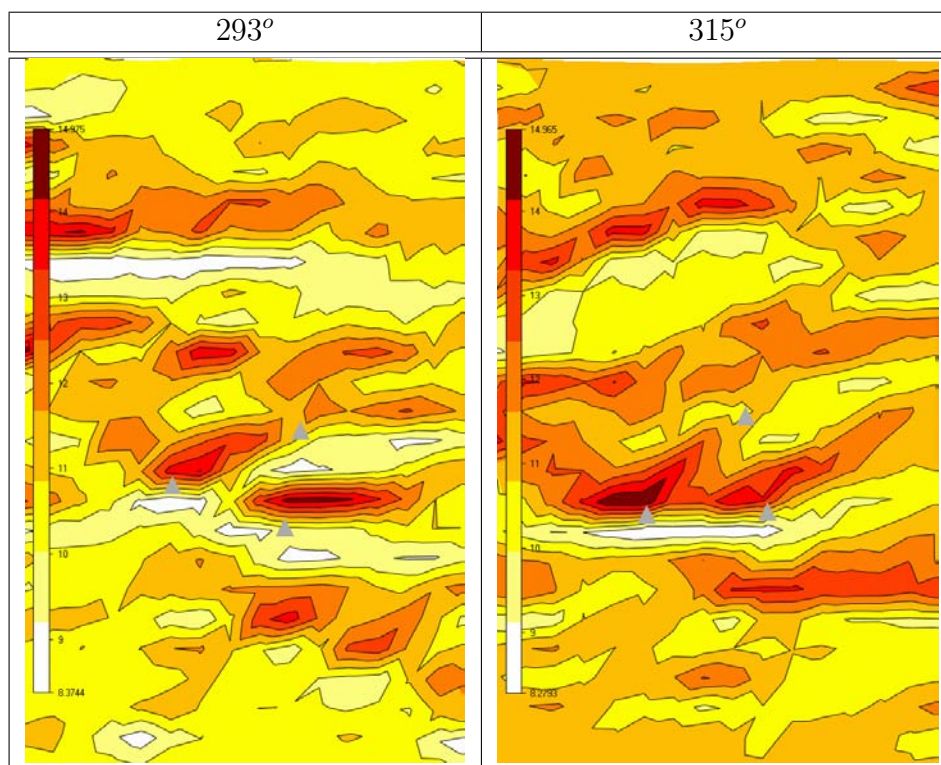


Figura A.4: Campo da intensidade de turbulência - versão “trial” - 293°e 315°, os triângulos designam a posição das estações de medição.

# FLUENT

## Campo de velocidades 3D (m/s)

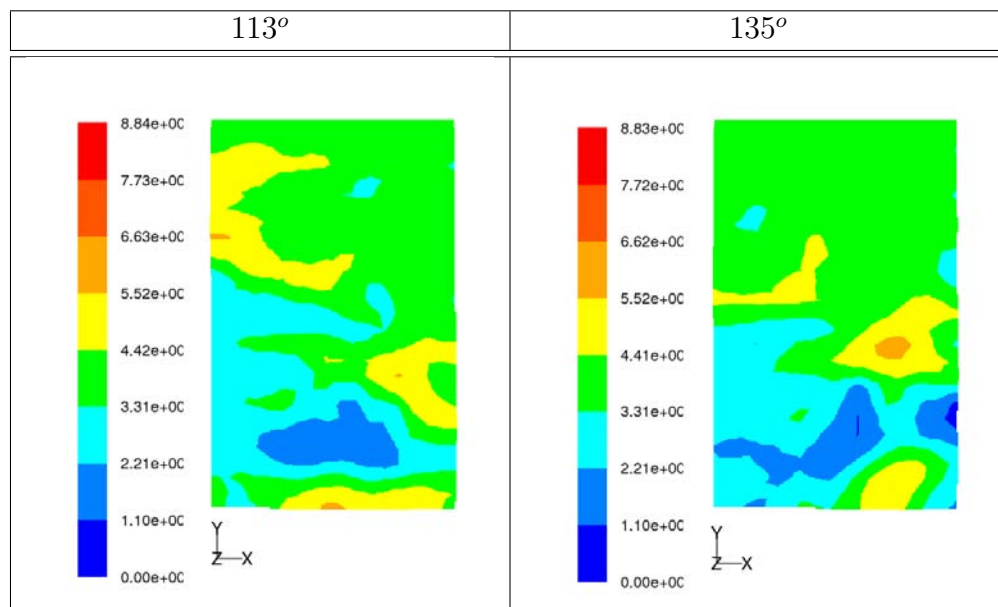


Figura A.5: Campo de velocidades 3D - FLUENT - 113°e 135°

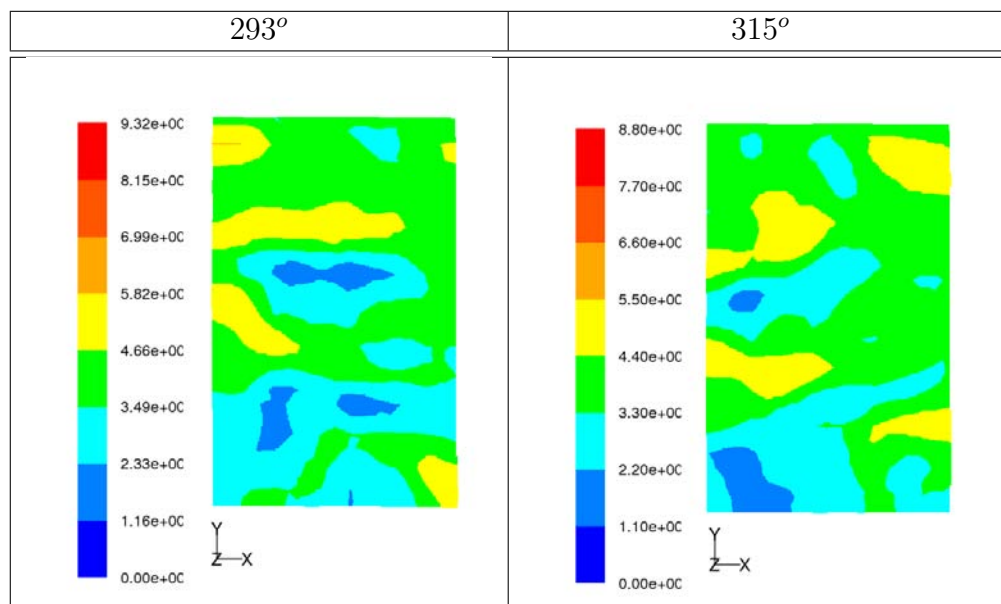


Figura A.6: Campo de velocidades 3D - FLUENT - 293°e 315°

### Campo da intensidade de turbulência (%)

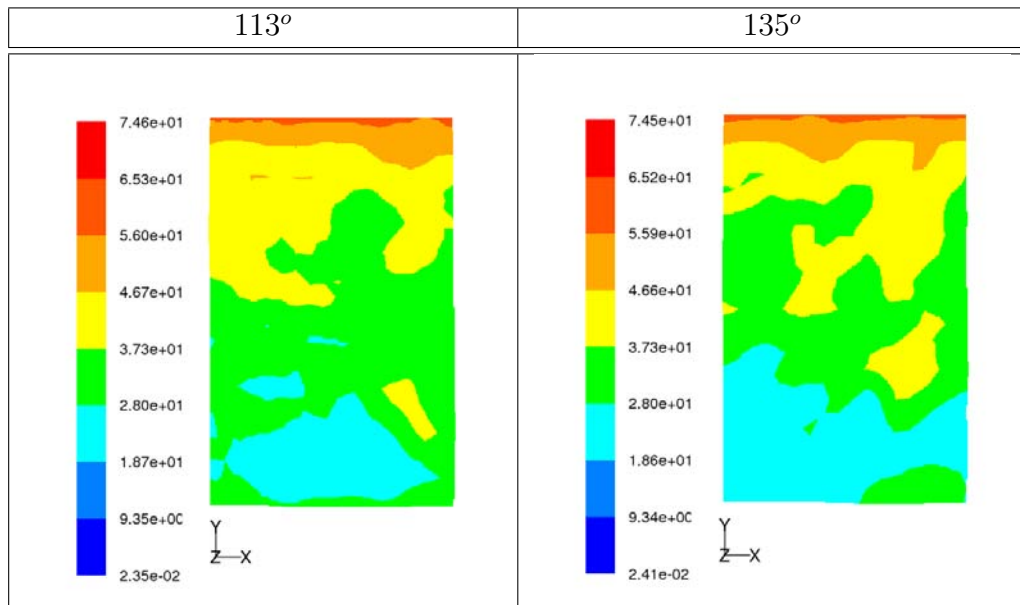


Figura A.7: Campo da intensidade de turbulência - FLUENT - 113°e 135°

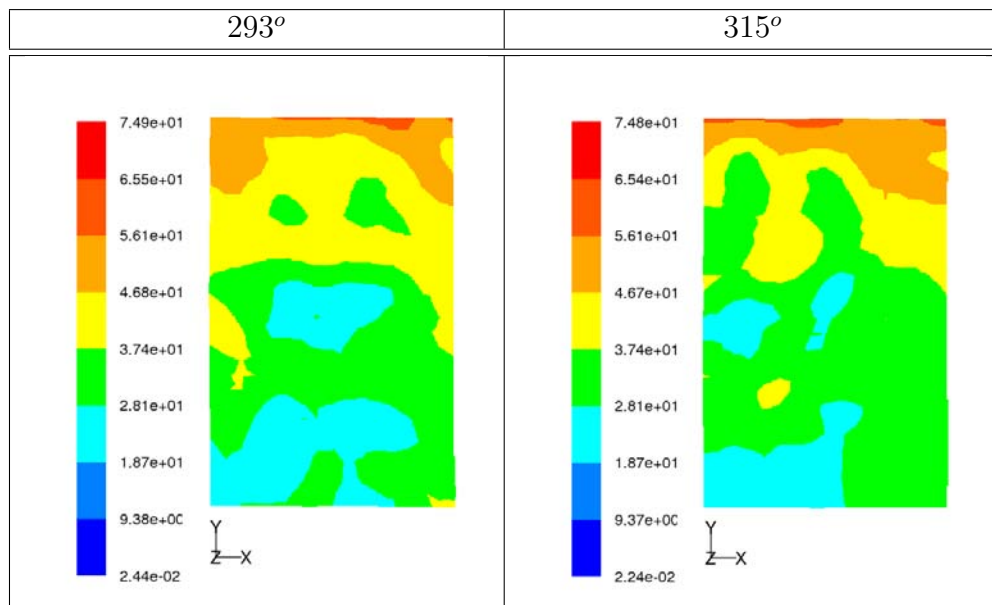


Figura A.8: Campo da intensidade de turbulência - FLUENT - 293°e 315°

# Apêndice B

## Validação do modelo - tabelas de erros

Tabela B.1: Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 105°, 112.5°, 120°

105°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	9.05	117.66	8.12	8.12	124.10	11.86	11.46	-5.19	-31.53
P384	7.01	95.58	11.33	7.01	95.49	16.38	-	-	-30.83
P385	7.98	114.21	9.51	7.84	132.00	12.80	1.76	-13.48	-25.70
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	7.37	97.41	10.90	7.39	97.84	14.56	-	-	-25.14
P385	8.21	112.86	9.15	7.91	130.02	12.21	3.82	-13.20	-25.06
112.5°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	11.16	122.28	9.59	8.31	121.71	10.89	34.30	0.47	-11.93
P384	7.32	102.85	13.29	7.32	102.86	15.62	-	-	-14.90
P385	10.00	118.95	10.79	7.95	132.34	11.57	25.79	-10.12	-6.74
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	7.59	104.16	13.16	7.58	104.71	12.85	-	-	2.44
P385	9.71	118.21	11.31	7.49	136.63	12.65	29.65	-13.49	-10.61
120°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	11.63	125.23	9.50	7.55	125.25	12.38	54.07	-0.02	-23.29
P384	6.59	110.05	14.77	6.56	110.44	14.32	-	-	3.15
P385	9.02	124.15	10.21	6.96	136.66	12.41	29.61	-9.15	-17.70
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	6.86	111.38	14.81	6.86	111.50	13.03	-	-	13.70
P385	8.91	123.69	10.69	6.98	137.65	12.61	27.68	-10.14	-15.21

Tabela B.2: Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 127.5°, 135°, 142.5°

127.5°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	10.92	129.41	10.45	7.56	126.68	11.84	44.47	2.15	-11.72
P384	5.64	118.80	16.17	5.69	118.50	17.03	-	-	-5.03
P385	9.05	129.31	9.80	6.88	139.76	12.90	31.56	-7.48	-23.99
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	6.03	119.95	15.73	6.08	119.78	13.43	-	-	17.10
P385	8.92	129.45	9.96	6.98	137.65	12.61	27.77	-5.96	-20.98
135°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	12.46	132.40	9.49	7.06	130.29	10.18	76.53	1.62	-6.73
P384	5.71	130.22	17.16	5.73	130.54	15.04	-	-	14.07
P385	9.40	133.31	11.36	6.58	145.90	12.04	42.90	-8.63	-5.65
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	6.04	130.35	17.17	6.08	130.32	14.72	-	-	16.66
P385	9.23	134.13	11.74	6.57	147.75	12.36	40.56	-9.22	-5.00
142.5°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	12.52	136.51	9.04	6.53	135.24	12.27	91.78	0.94	-26.28
P384	5.62	141.85	16.77	5.64	141.45	19.13	-	-	-12.33
P385	9.33	137.33	12.36	7.16	150.01	12.15	30.26	-8.45	1.74
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	6.02	141.02	16.26	6.02	141.17	19.36	-	-	-15.99
P385	9.08	138.50	12.98	6.87	152.10	11.86	32.21	-8.94	9.47

Tabela B.3: Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 285°, 292.5°, 300°

285°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	11.26	297.23	12.04	9.57	291.06	11.80	17.65	2.12	2.03
P384	7.11	278.40	12.23	7.08	278.68	13.32	-	-	-8.22
P385	8.86	297.97	13.33	8.39	296.05	12.59	5.58	0.65	5.86
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	7.32	279.67	12.28	7.34	279.90	12.99	-	-	-5.49
P385	8.70	295.59	14.11	8.37	294.74	12.52	3.89	0.29	12.69
292.5°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	11.71	301.55	12.04	10.62	292.19	9.91	10.28	3.20	21.50
P384	7.43	285.12	12.07	7.41	285.64	13.69	-	-	-11.85
P385	8.75	302.50	12.57	9.38	299.80	11.19	-6.68	0.90	12.34
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	7.55	286.16	12.04	7.50	286.57	12.38	-	-	-2.76
P385	8.70	301.02	13.27	9.24	297.80	11.01	-5.89	1.08	20.59
300°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	11.73	307.02	10.17	11.88	294.34	8.77	-1.27	4.31	15.94
P384	8.25	292.17	10.74	8.22	292.37	11.95	-	-	-10.09
P385	10.39	305.79	9.93	11.12	303.29	8.96	-6.54	0.82	10.85
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	8.32	293.60	10.49	8.33	293.24	11.32	-	-	-7.33
P385	10.15	304.87	10.56	9.24	297.80	11.01	9.84	2.38	-4.00

Tabela B.4: Erros relativos específicos nas estações de medição para as alturas 30 m e 60 m - 307.5°, 315°, 322.5°

307.5°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	11.44	311.34	10.13	10.94	298.05	9.20	4.59	4.46	10.13
P384	6.97	297.08	12.50	6.93	297.42	14.52	-	-	-13.90
P385	9.22	309.84	10.13	10.12	307.15	9.71	-8.91	0.88	4.37
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	7.05	298.65	12.76	6.98	298.39	12.84	-	-	-0.60
P385	9.02	309.60	11.24	9.24	297.80	11.01	-2.34	3.96	2.13
315°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	12.59	315.41	9.98	11.17	301.72	8.56	12.74	4.54	16.57
P384	6.53	305.11	12.78	6.48	305.30	15.61	-	-	-18.12
P385	9.51	313.84	9.99	9.13	311.39	9.13	4.21	0.79	9.44
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	6.64	306.61	12.91	6.59	306.17	12.95	-	-	-0.29
P385	9.26	313.75	10.89	9.24	297.80	11.01	0.21	5.36	-1.07
322.5°									
h=30 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P042	10.09	318.05	10.46	11.54	308.11	9.20	-12.59	3.23	13.72
P384	7.14	314.94	11.38	7.06	314.41	16.27	-	-	-30.03
P385	10.28	319.93	8.13	11.46	315.70	9.20	-10.30	1.34	-11.60
h=60 m	Vh_num (m/s)	Dir_num (°)	IT_num(%)	Vh_exp (m/s)	Dir_exp (°)	IT_exp (%)	ER_Vh (%)	ER_dir (%)	ER_IT (%)
P384	7.30	316.16	11.13	7.22	316.51	13.77	-	-	-19.17
P385	9.98	320.30	8.31	8.98	296.83	11.60	11.17	7.91	-28.39

Tabela B.5: Erros absolutos do shear factor para a estação de medição P384

	P384	Vh_exp_60 m	Vh_exp_30 m	SF_num	SF_exp	EA_SF	Nº de medições
SE	105°	7.39	7.09	0.07	0.06	-0.01	120
	112.5°	7.58	7.22	0.05	0.07	0.02	175
	120°	6.86	6.52	0.06	0.07	0.02	191
	127.5°	6.08	5.64	0.10	0.11	0.01	171
	135°	6.08	5.74	0.08	0.08	0.00	179
	142.5°	6.02	5.87	0.10	0.04	-0.06	103
NO	285°	7.34	7.16	0.04	0.04	-0.01	190
	292.5°	7.50	7.33	0.02	0.03	0.01	300
	300°	8.33	8.05	0.01	0.05	0.04	228
	307.5°	6.98	6.59	0.02	0.08	0.07	307
	315°	6.59	6.11	0.02	0.11	0.09	258
	322.5°	7.22	6.54	0.03	0.14	0.11	75

Tabela B.6: Erros absolutos do shear factor para a estação de medição P385

	P385	Vh_exp_60 m	Vh_exp_30m	SF_num	SF_exp	EA_SF	Nº de medições
SE	105°	8.17	8.06	0.04	0.02	-0.02	49
	112.5°	9.70	9.54	-0.04	0.02	0.07	86
	120°	8.94	8.81	-0.02	0.02	0.04	136
	127.5°	8.91	8.77	-0.02	0.02	0.04	167
	135°	9.24	9.21	-0.03	0.00	0.03	216
	142.5°	9.05	9.07	-0.04	0.00	0.04	294
NO	285°	8.67	8.88	-0.03	-0.03	-0.01	535
	292.5°	8.70	9.08	-0.01	-0.06	-0.05	690
	300°	10.12	10.44	-0.03	-0.04	-0.01	462
	307.5°	9.02	9.52	-0.03	-0.08	-0.05	498
	315°	9.22	9.74	-0.04	-0.08	-0.04	363
	322.5°	9.91	10.46	-0.04	-0.08	-0.04	124

Tabela B.7: N<sup>o</sup> e pesos específicos das medições usadas para as várias direcções

SE	30 m	Peso (%)	60 m	Peso (%)
105°	61	8.8	120	12.8
112.5°	90	12.9	175	21.4
120°	108	15.5	191	22.9
127.5°	135	19.4	171	18.1
135°	173	24.8	179	17.9
142.5°	130	18.7	103	9.1
NE	30 m	Peso (%)	60 m	Peso (%)
285°	115	10.5	190	14.0
292.5°	215	19.6	300	22.1
300°	212	19.3	228	16.8
307.5°	291	26.5	307	22.6
315°	210	19.1	258	19.0
322.5°	54	4.9	75	5.5

Tabela B.8: N<sup>o</sup> e pesos globais das medições usadas

	30 m	Peso alt./dir. (%)	60 m	Peso alt./dir. (%)	Peso da direcção (%)
SE	697	38.9	939	40.9	40.0
NO	1097	61.1	1358	59.1	60.0
Peso da altura (%)	43.9		56.1		

# Apêndice C

## Mapas de contornos

Campo de velocidades 2D (m/s)

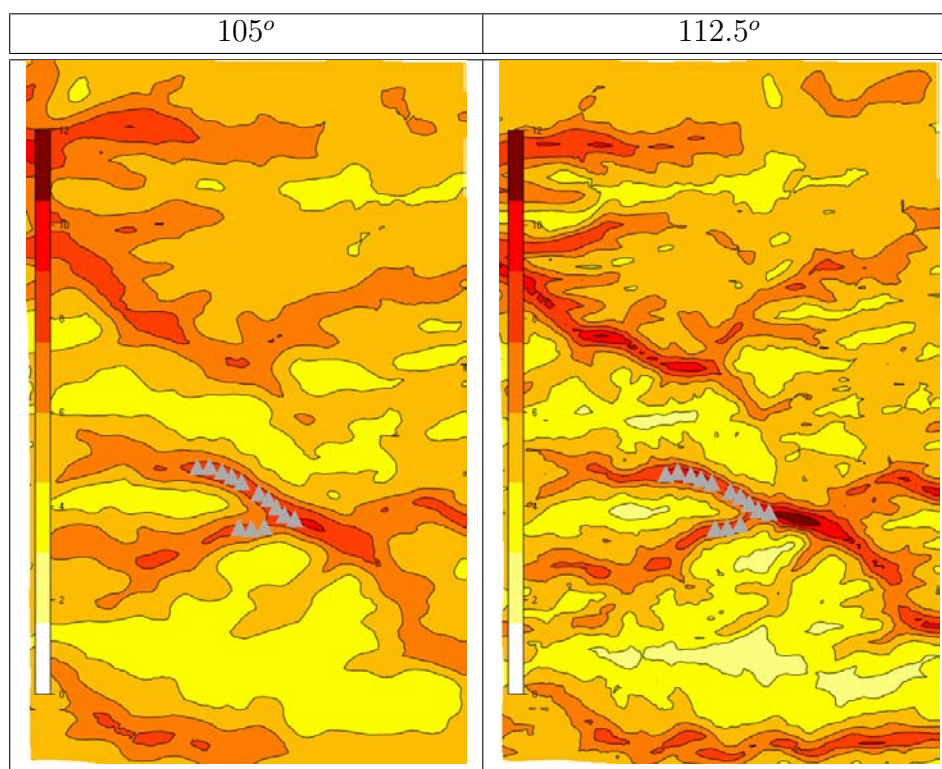


Figura C.1: Campo de velocidades 105°, 112.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

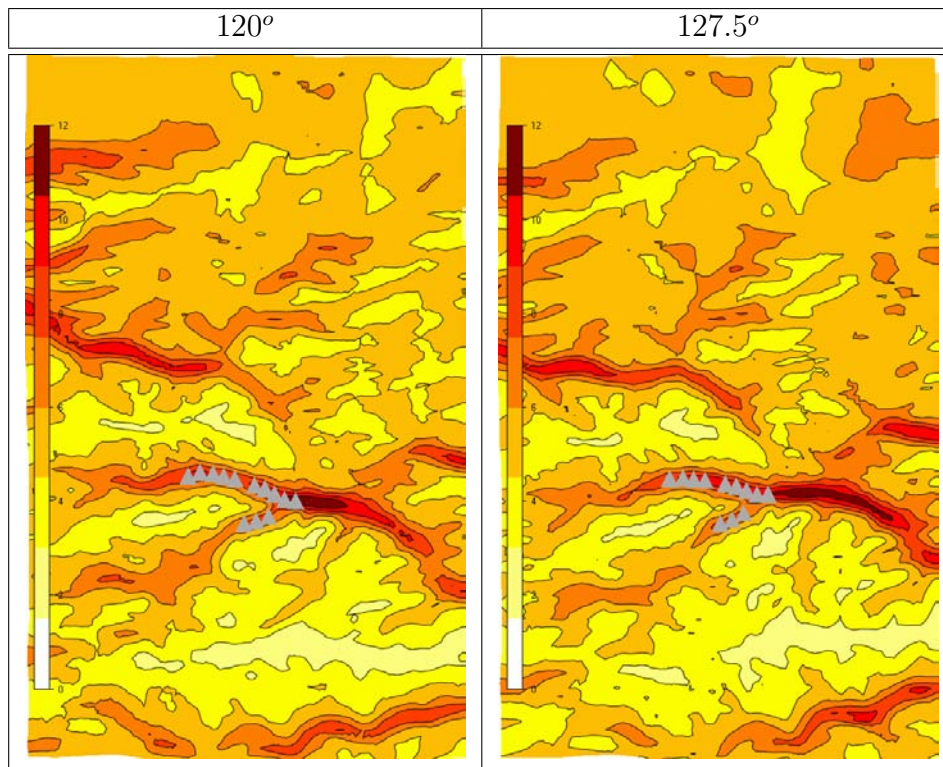


Figura C.2: Campo de velocidades 120°, 127.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

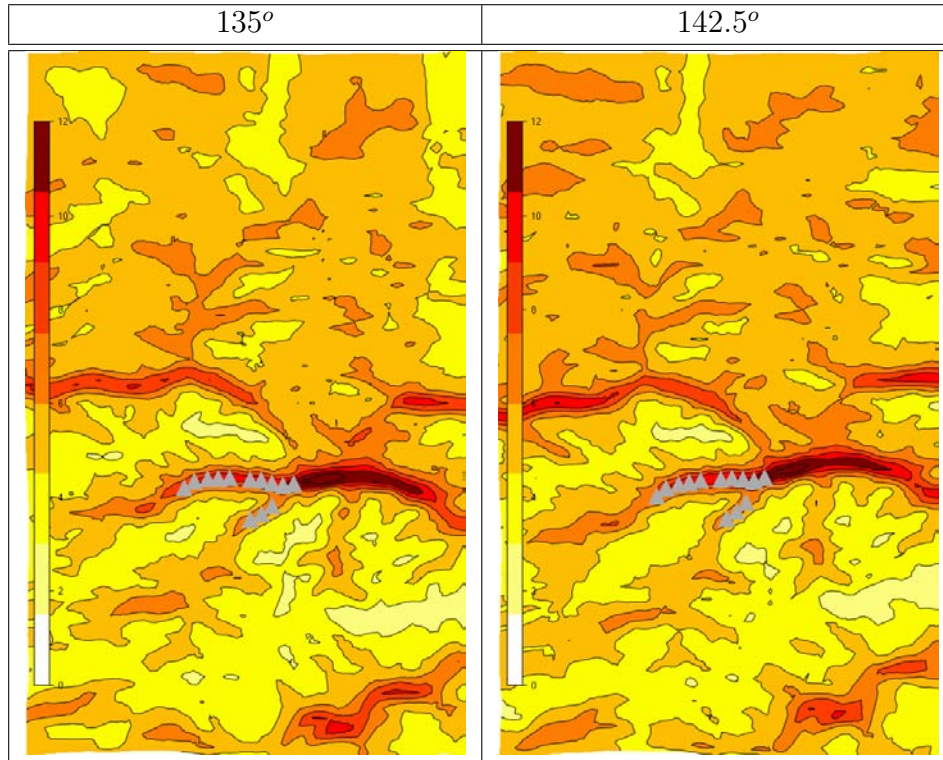


Figura C.3: Campo de velocidades 135°, 142.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

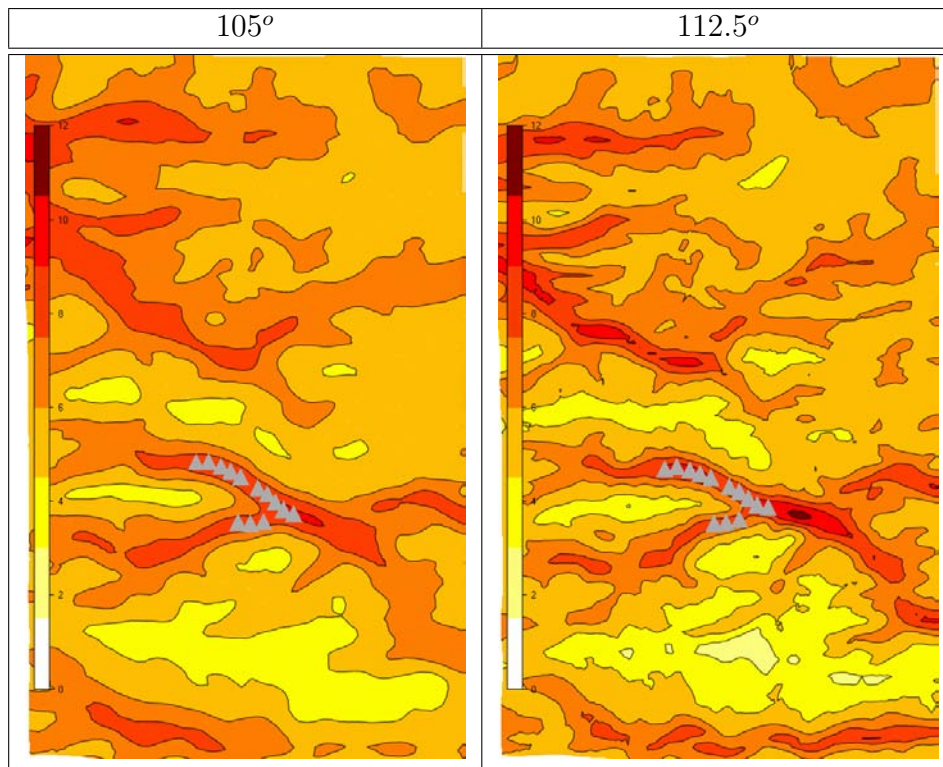


Figura C.4: Campo de velocidades 105°, 112.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

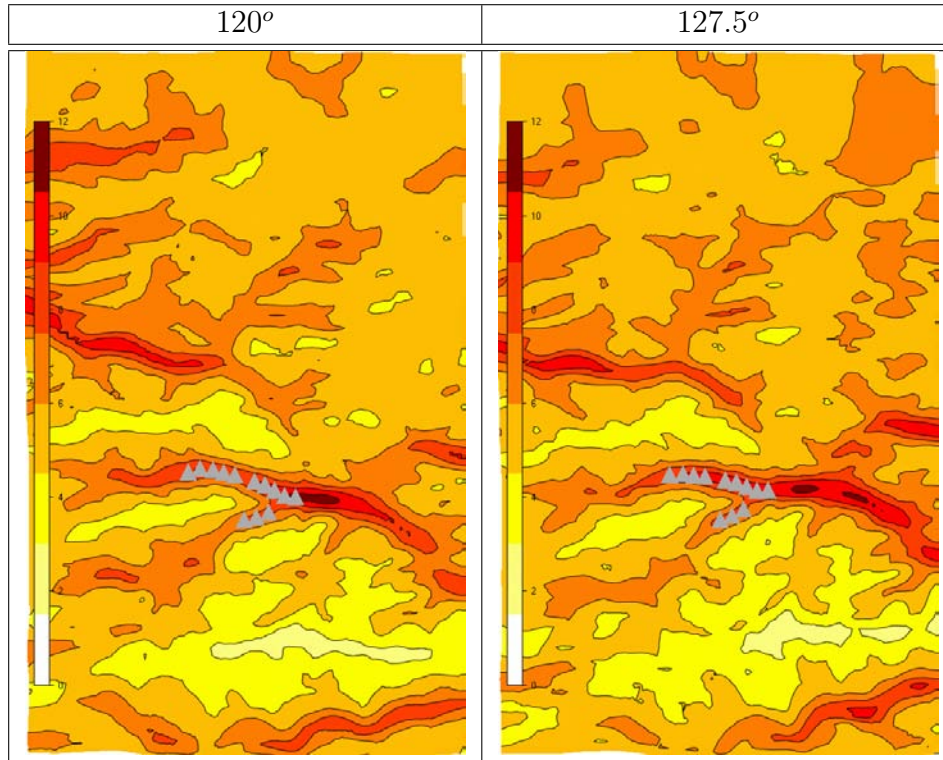


Figura C.5: Campo de velocidades 120°, 127.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

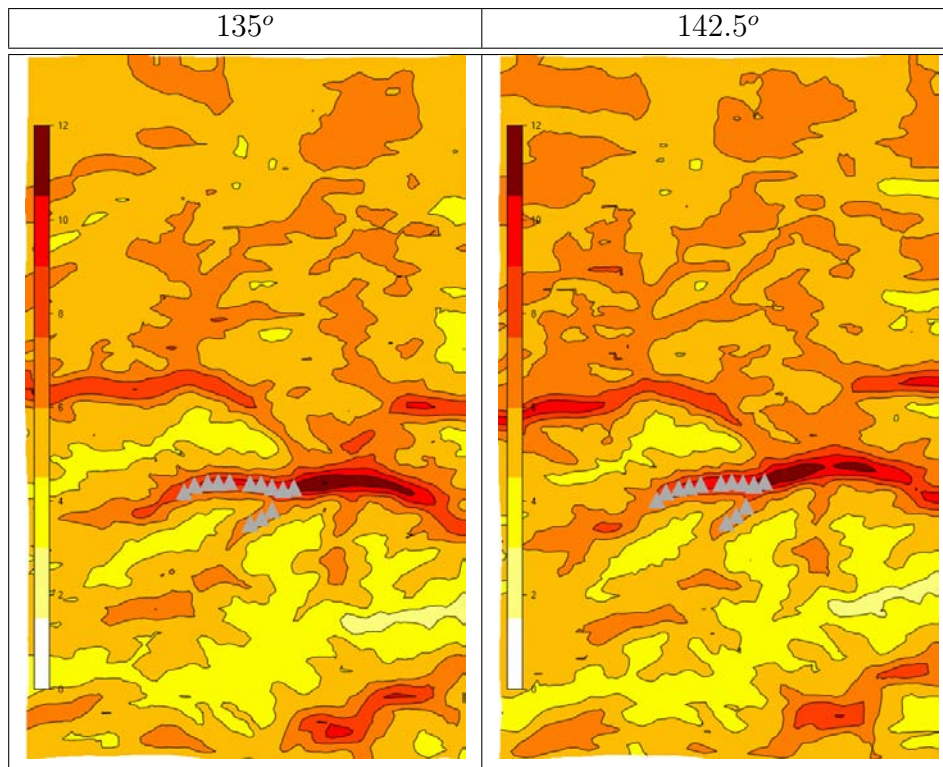


Figura C.6: Campo de velocidades 135°, 142.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

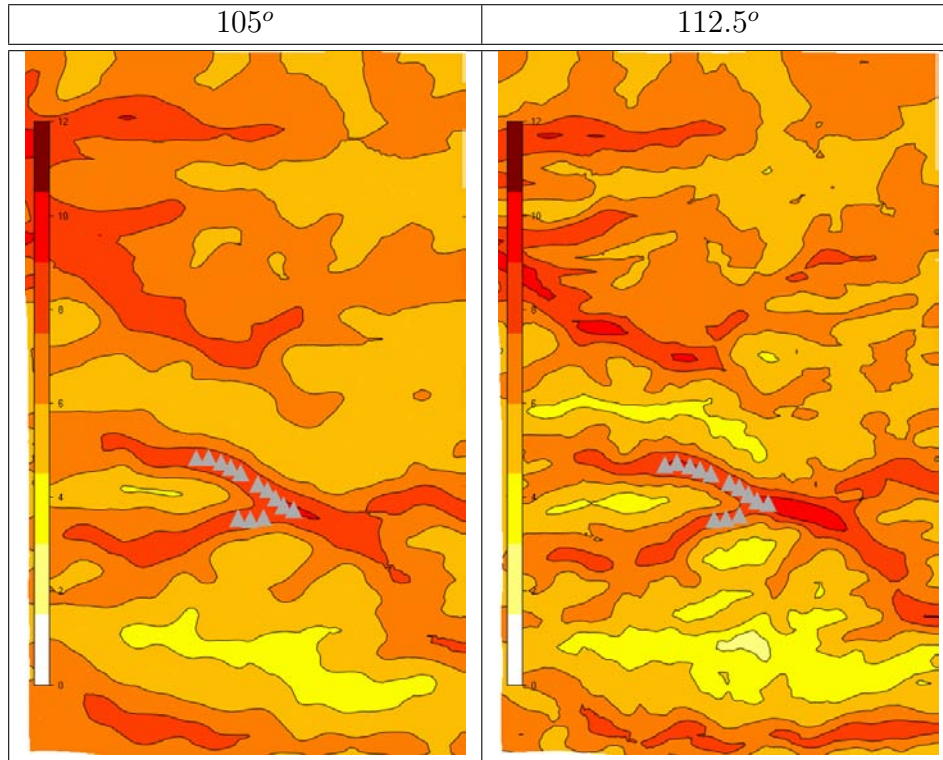


Figura C.7: Campo de velocidades 105°, 112.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

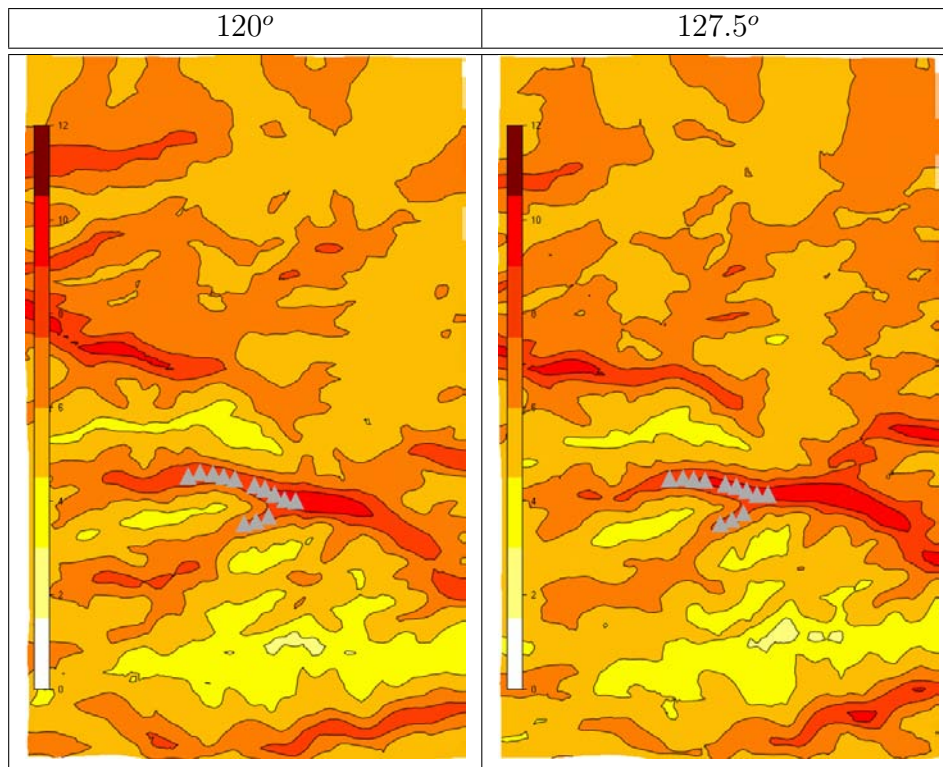


Figura C.8: Campo de velocidades 120°, 127.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

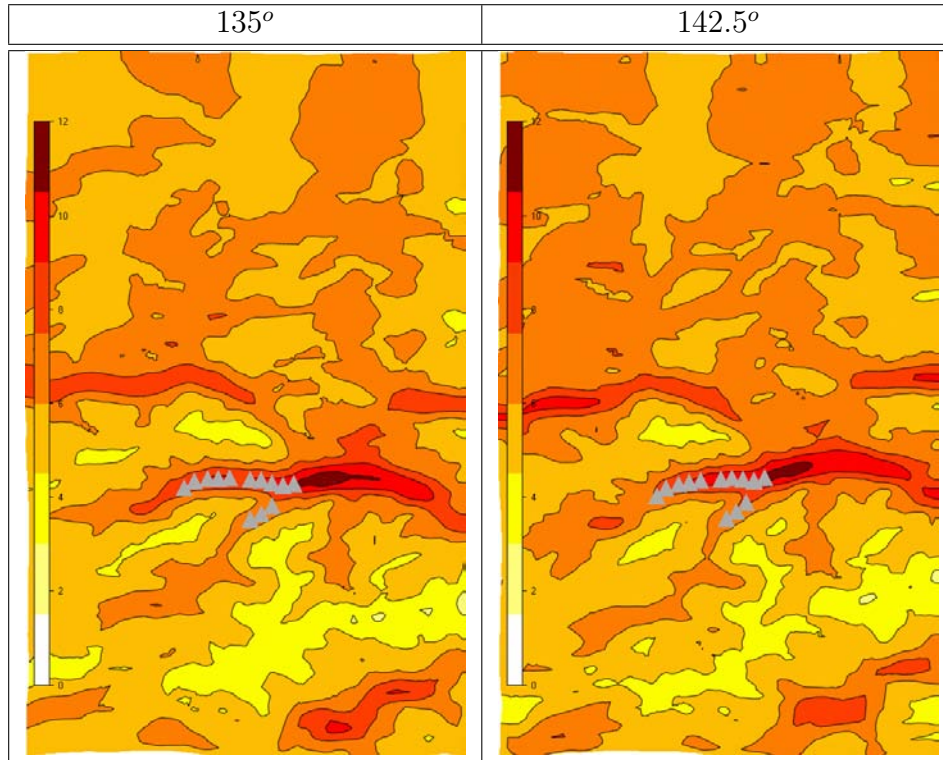


Figura C.9: Campo de velocidades 135°, 142.5° (h=126m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

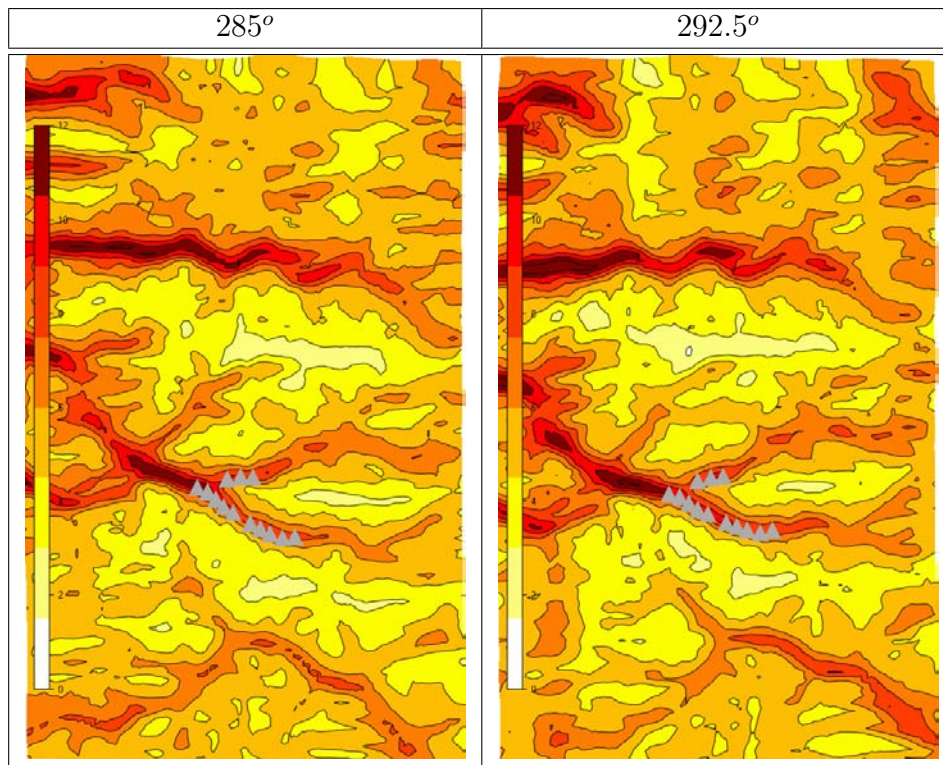


Figura C.10: Campo de velocidades 285°, 292.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

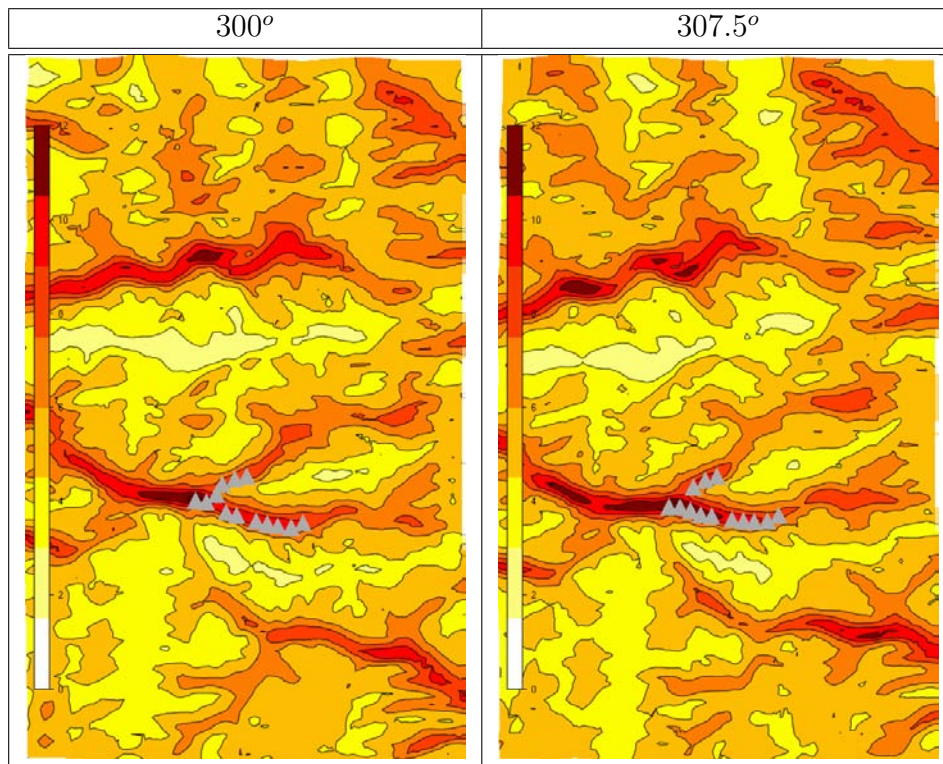


Figura C.11: Campo de velocidades 300°, 307.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

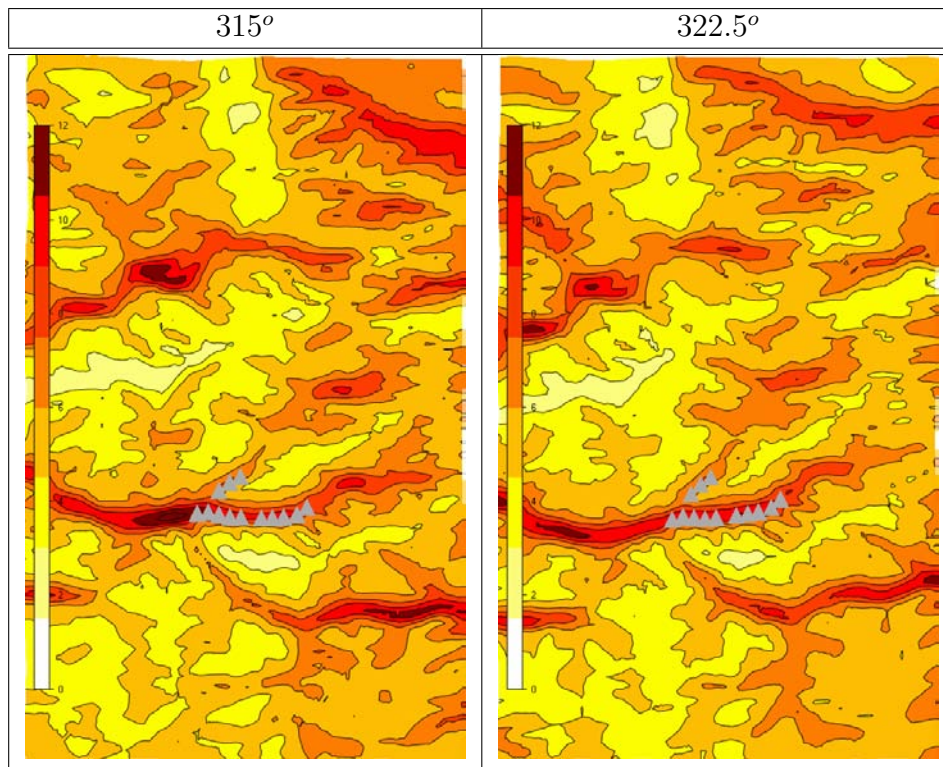


Figura C.12: Campo de velocidades 315°, 322.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

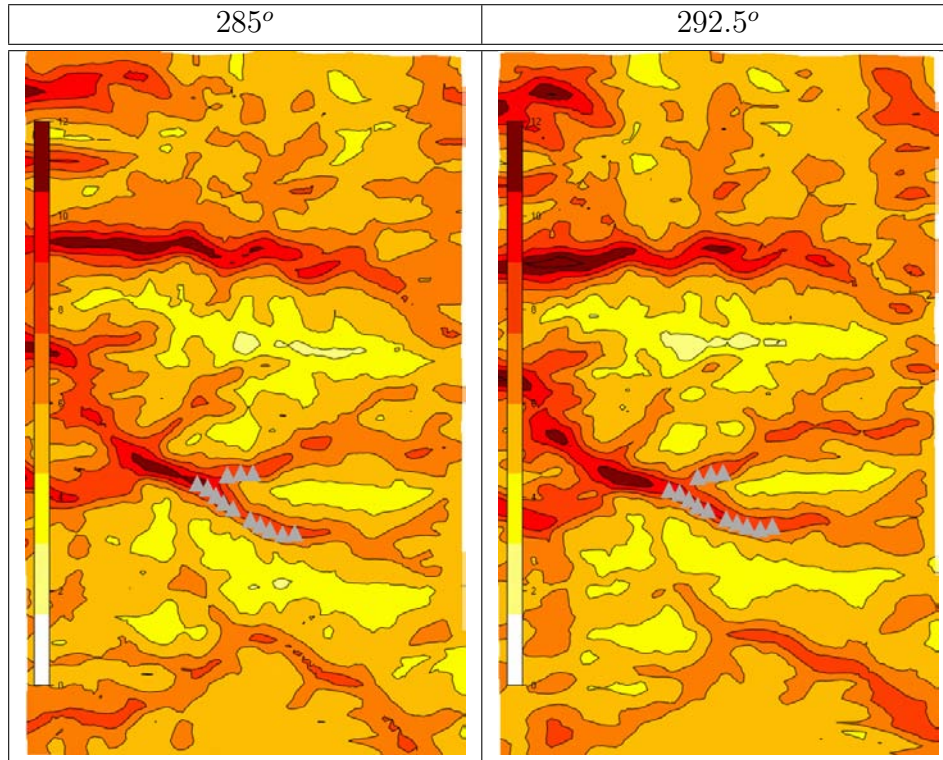


Figura C.13: Campo de velocidades 285°, 292.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

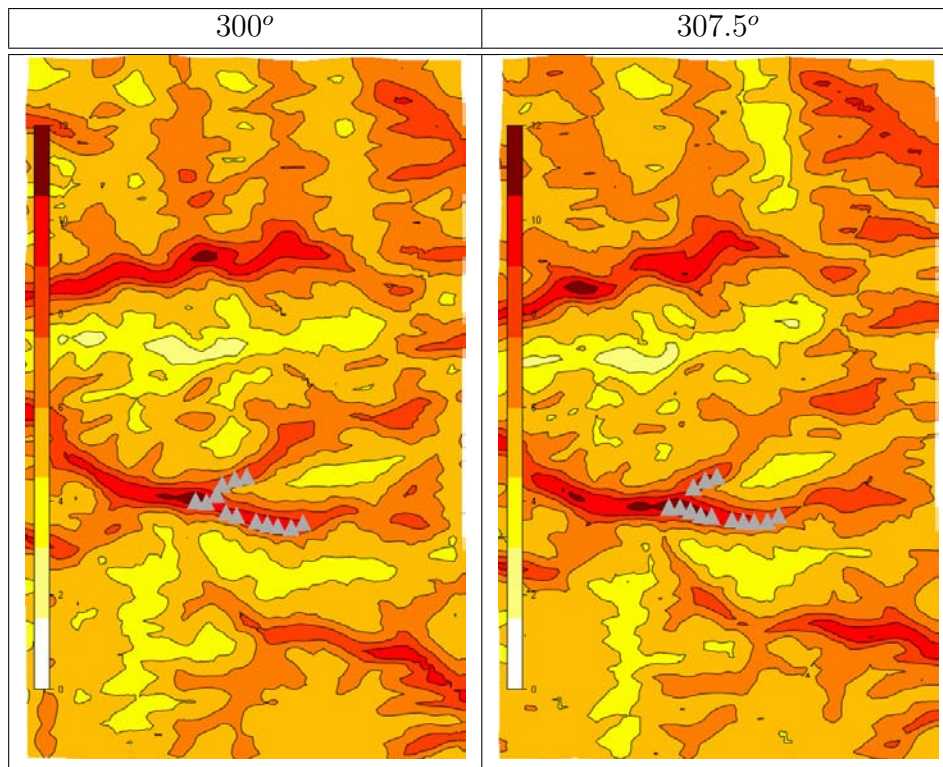


Figura C.14: Campo de velocidades 300°, 307.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

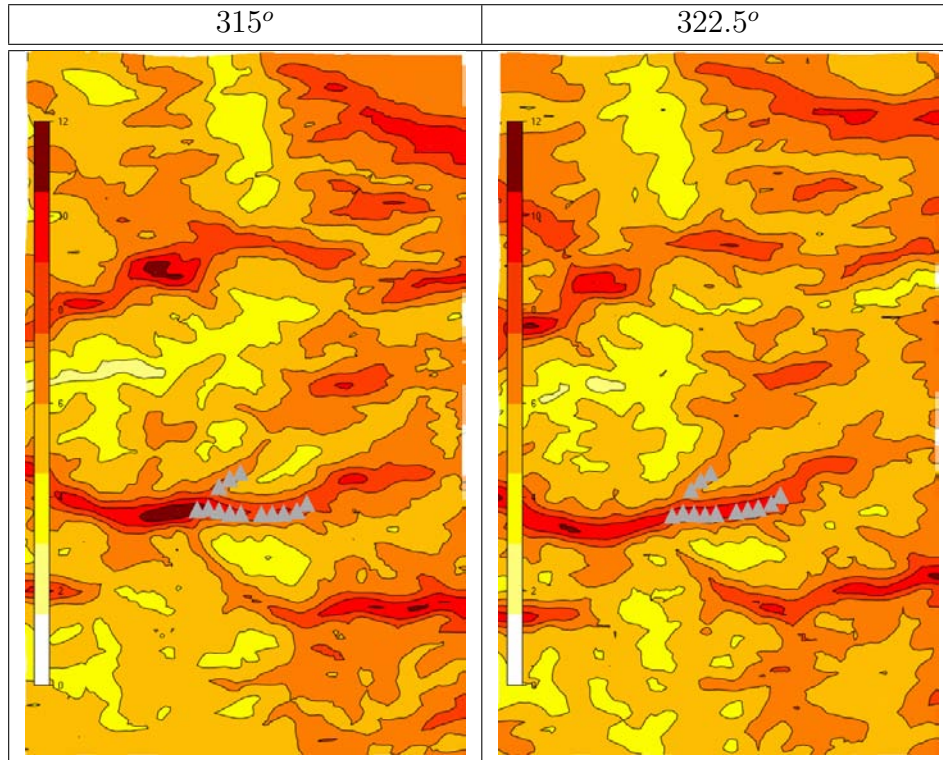


Figura C.15: Campo de velocidades 315°, 322.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

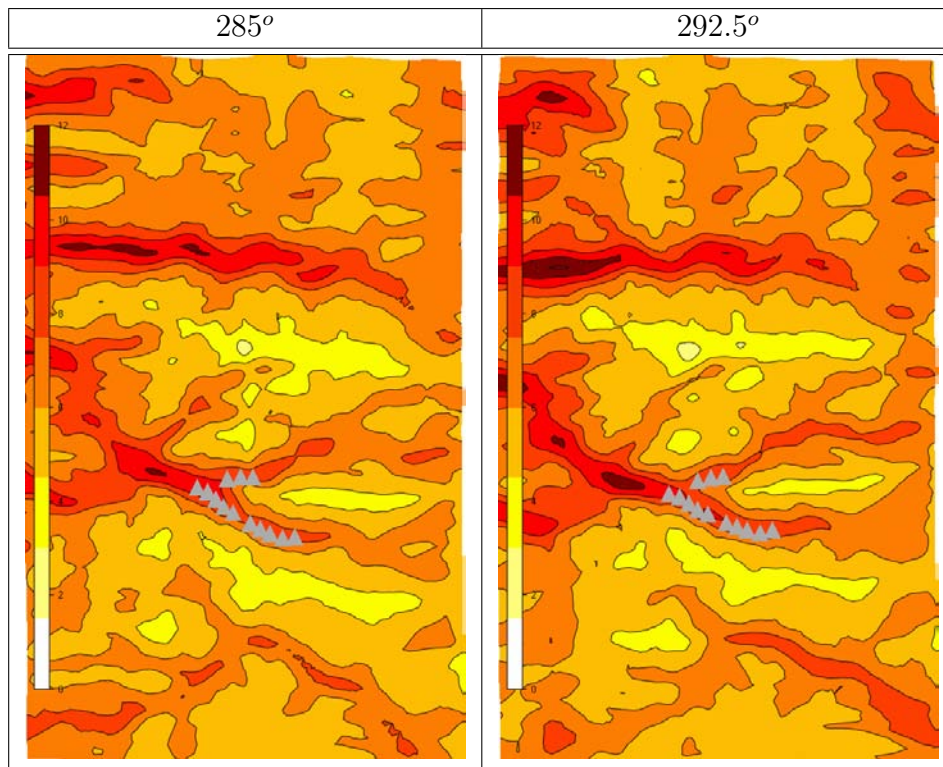


Figura C.16: Campo de velocidades 285°, 292.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

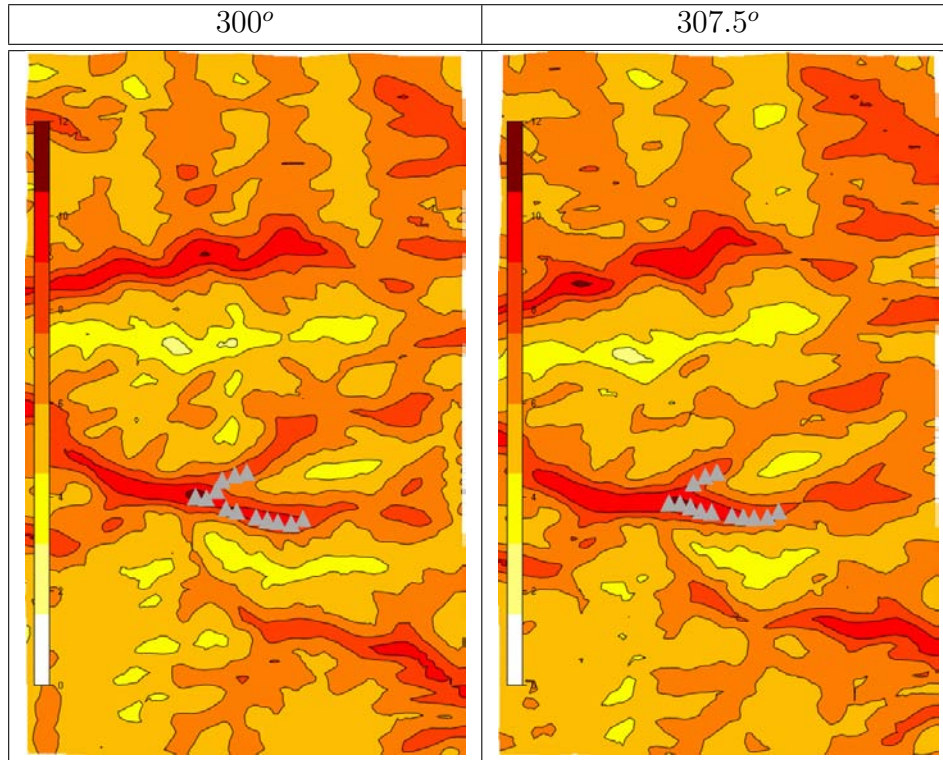


Figura C.17: Campo de velocidades 300°, 307.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

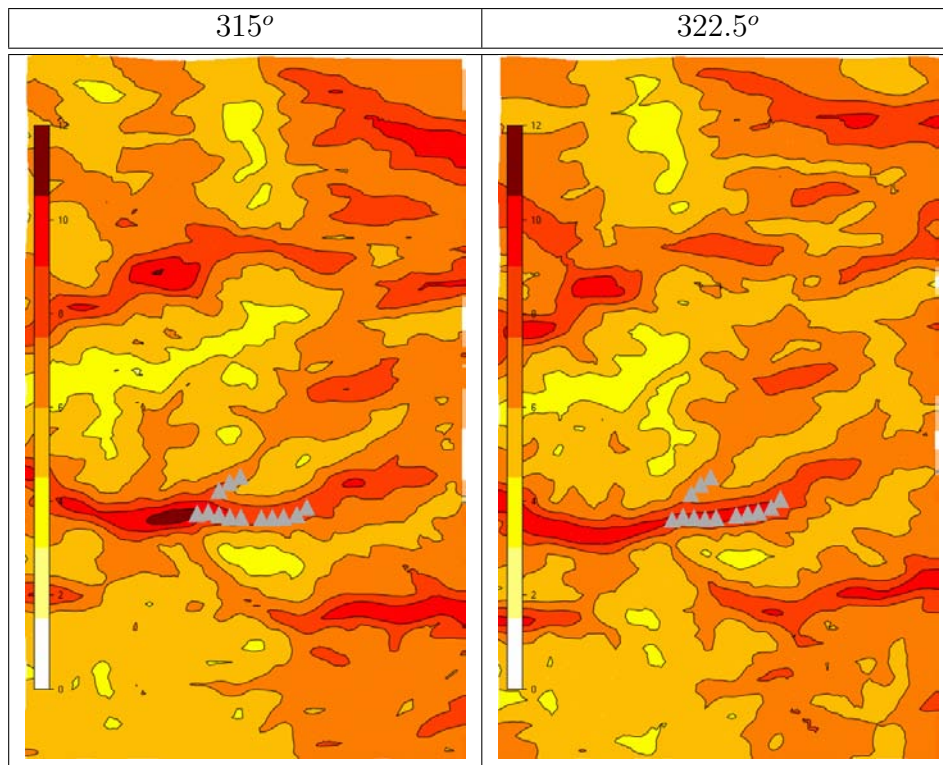


Figura C.18: Campo de velocidades 315°, 322.5° (h=126m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

### Campo da intensidade de turbulência (%)

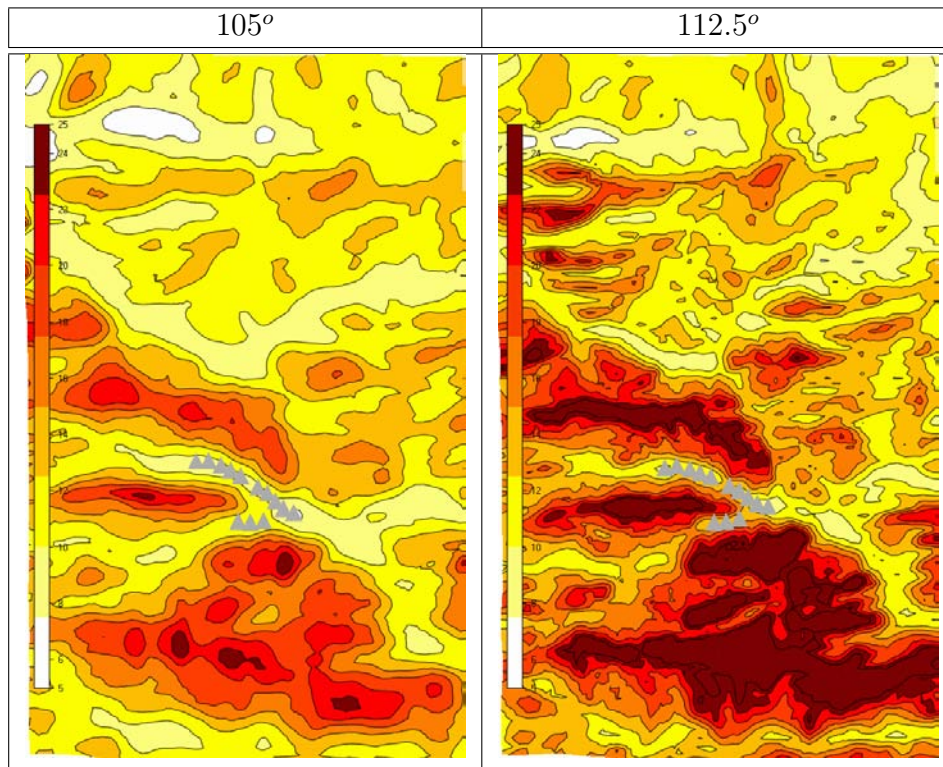


Figura C.19: Campo da intensidade de turbulência 105°, 112.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

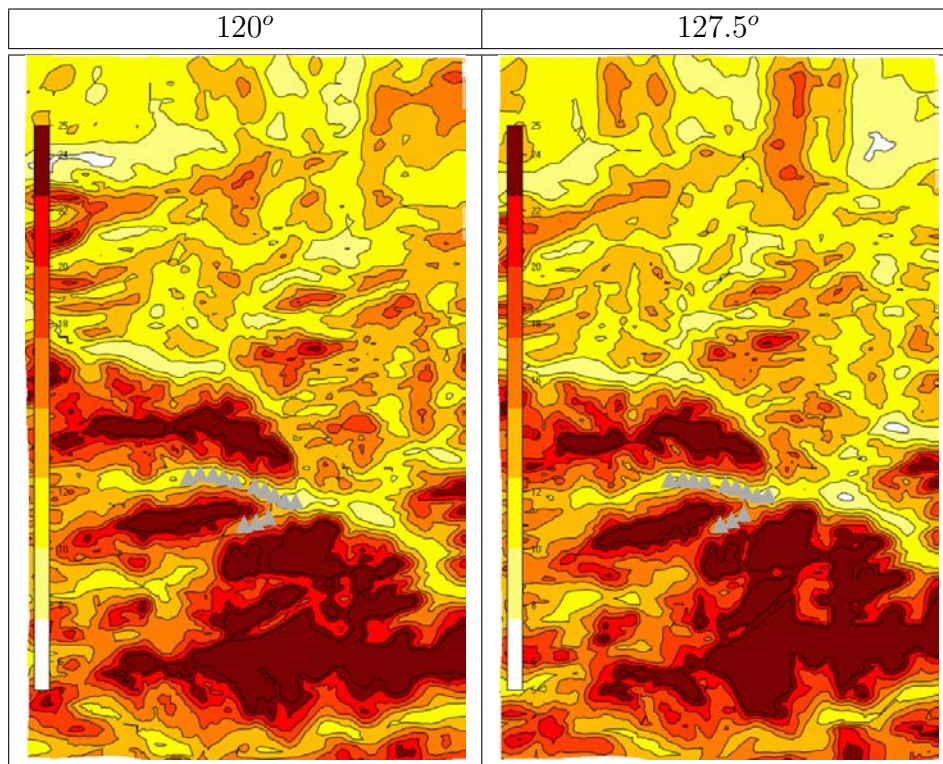


Figura C.20: Campo da intensidade de turbulência 120°, 127.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

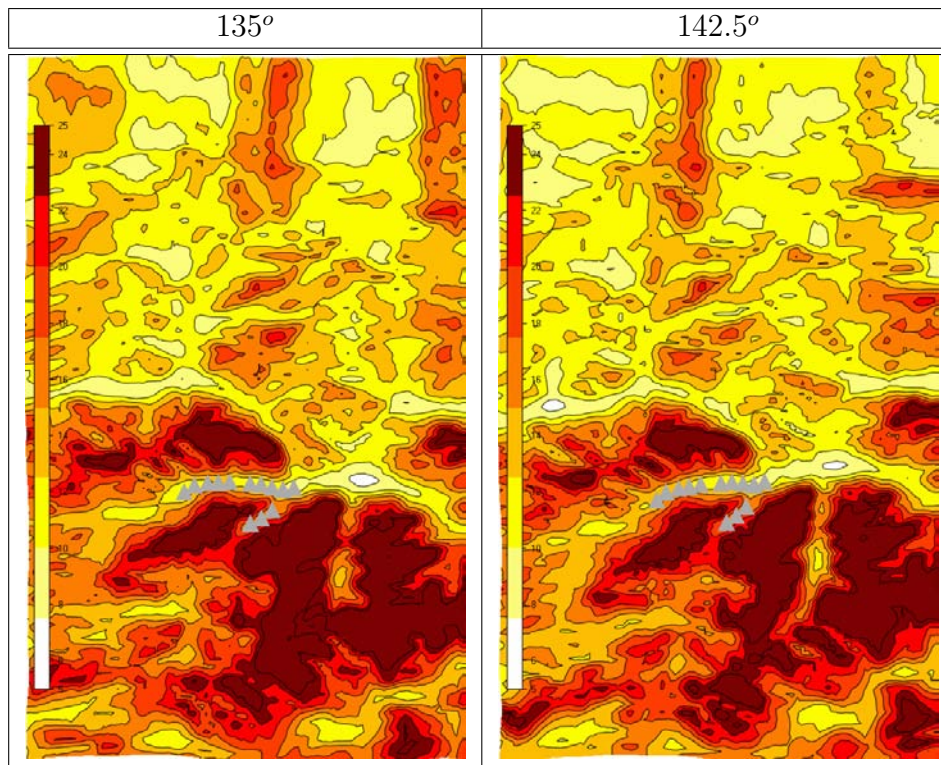


Figura C.21: Campo da intensidade de turbulência 135°, 142.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

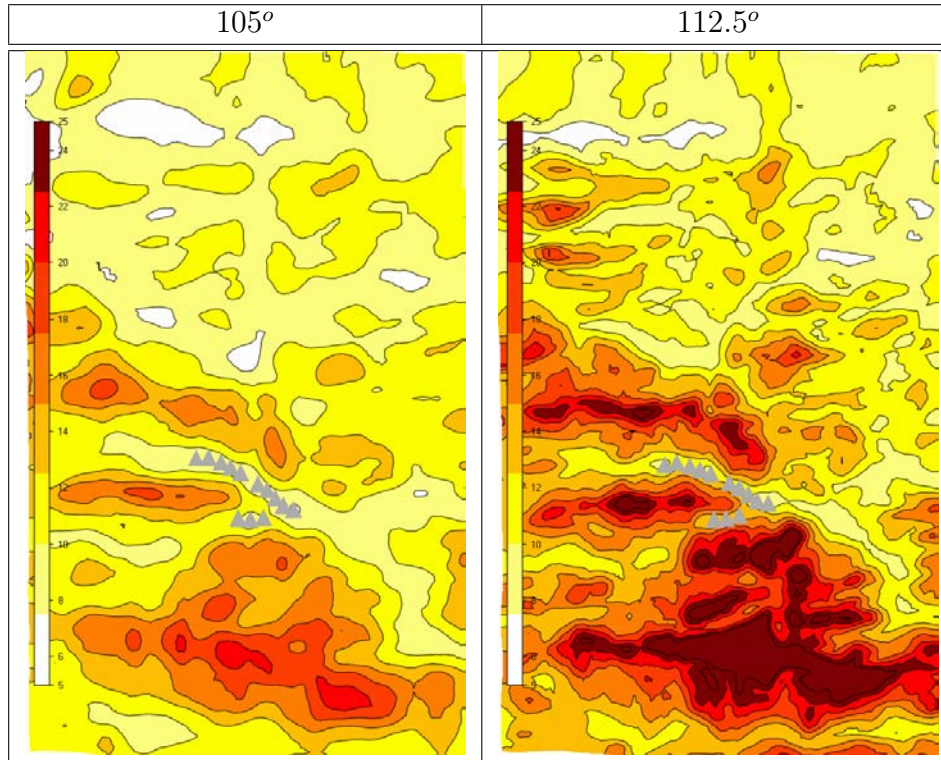


Figura C.22: Campo da intensidade de turbulência 105°, 112.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

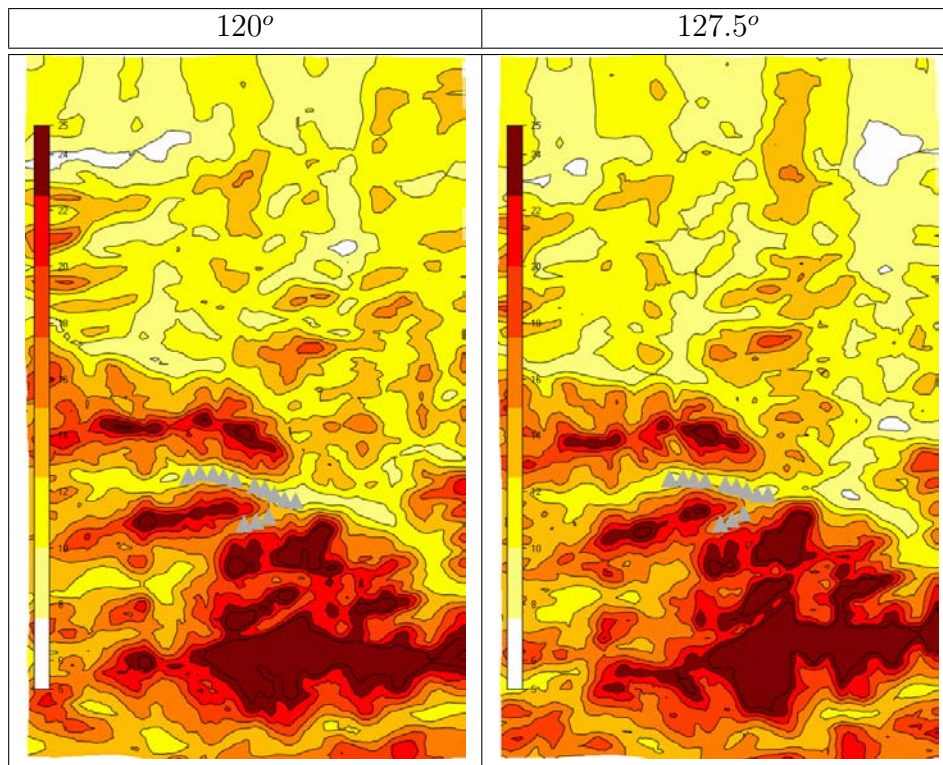


Figura C.23: Campo da intensidade de turbulência 120°, 127.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

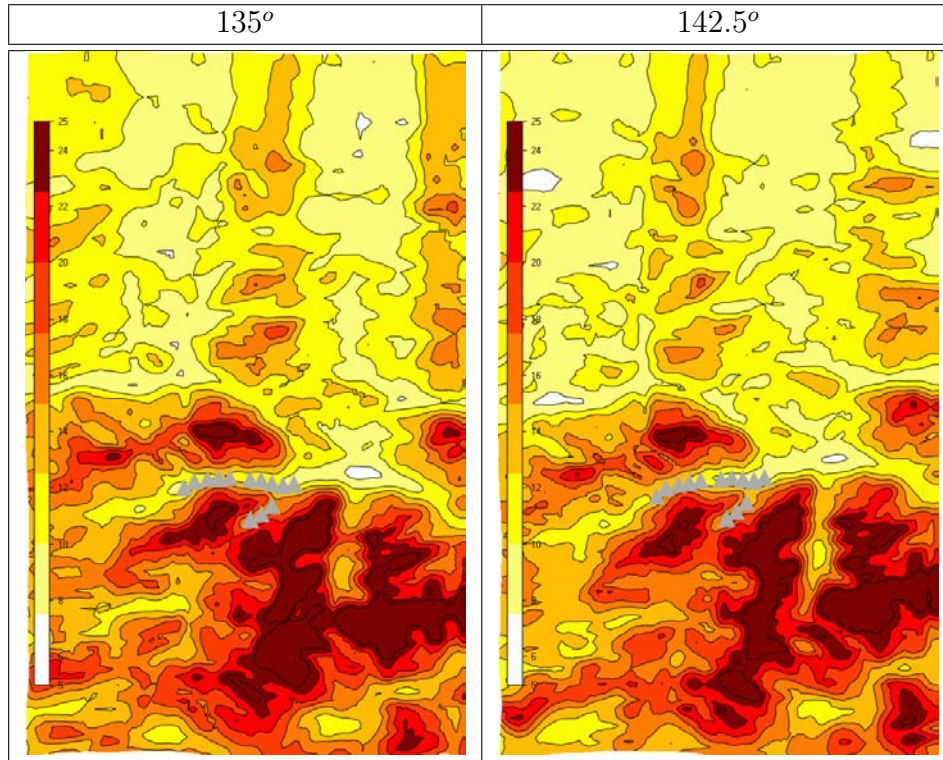


Figura C.24: Campo da intensidade de turbulência 135°, 142.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

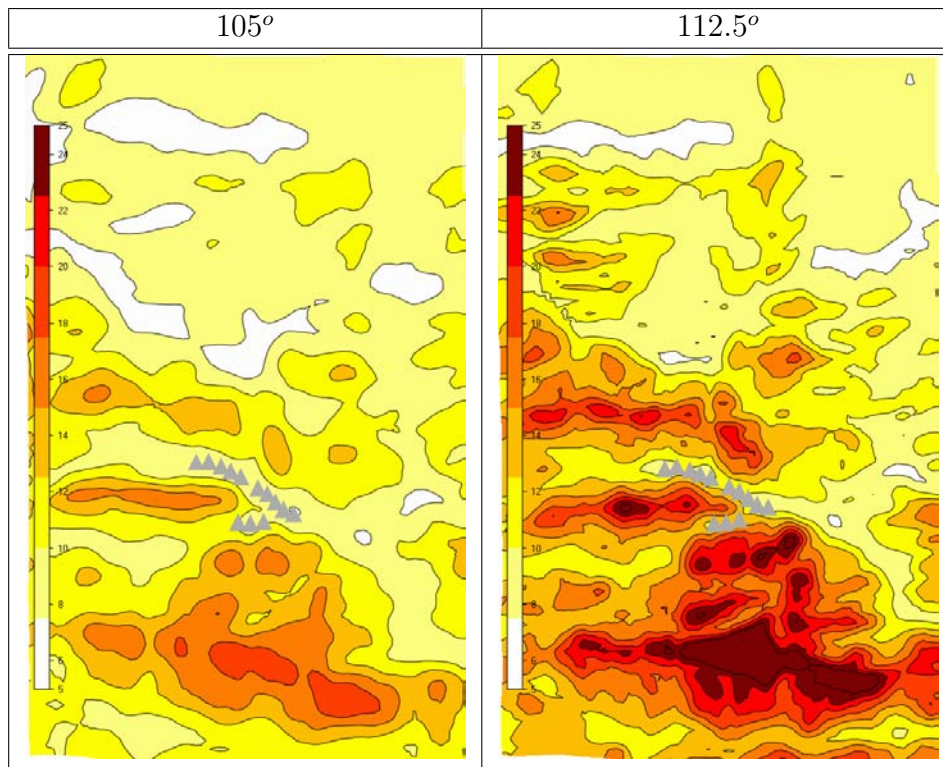


Figura C.25: Campo da intensidade de turbulência 105°, 112.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

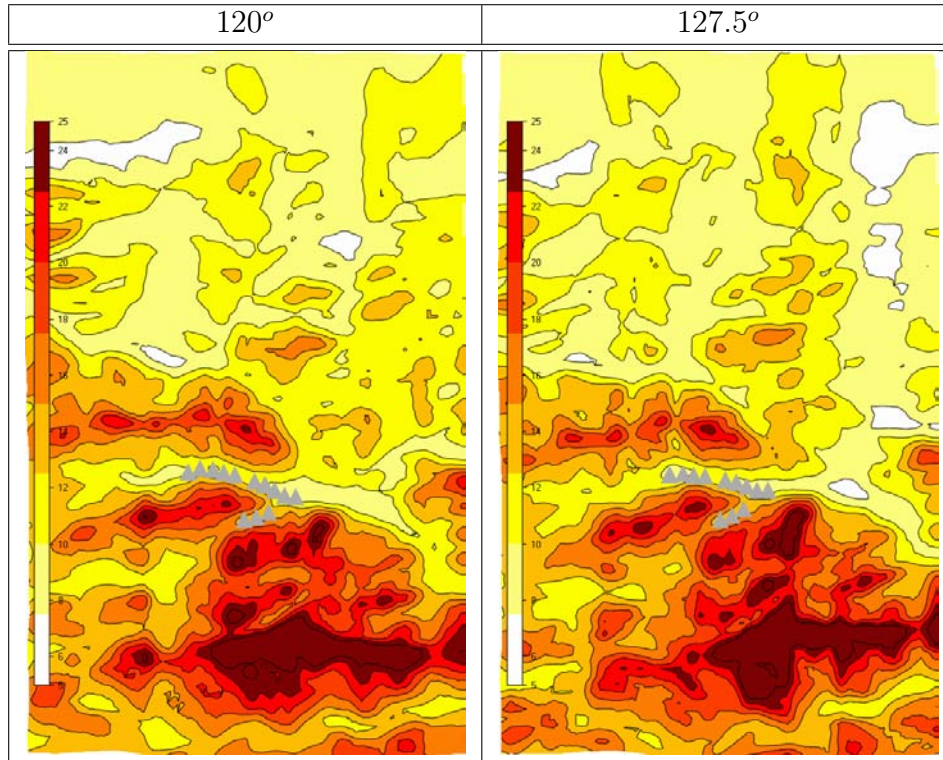


Figura C.26: Campo da intensidade de turbulência 120°, 127.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

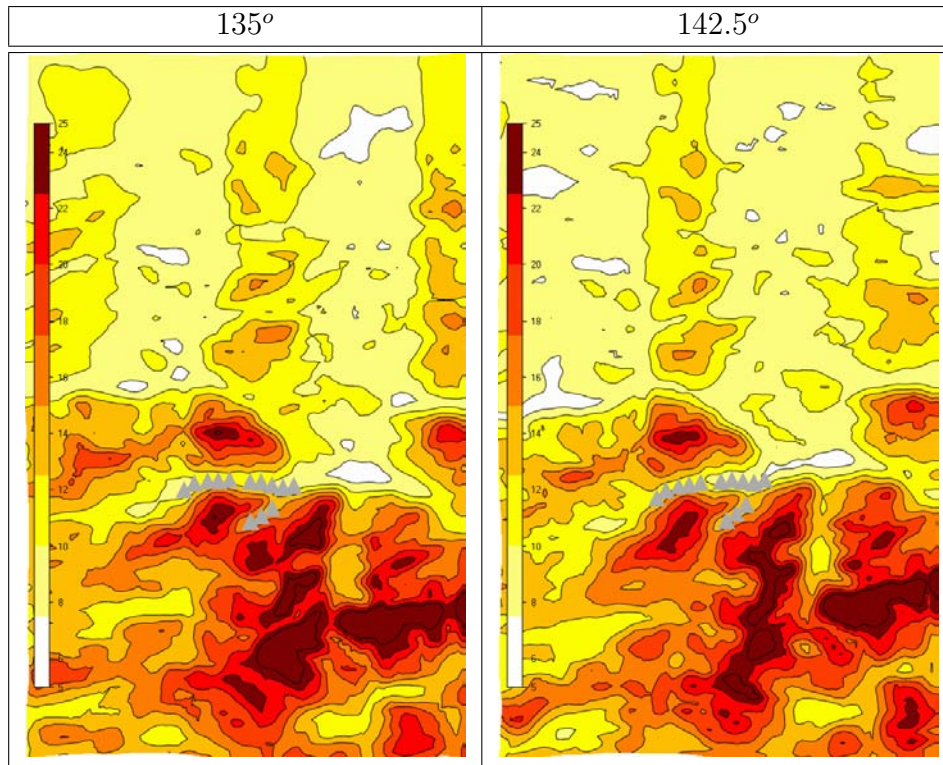


Figura C.27: Campo da intensidade de turbulência 135°, 142.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

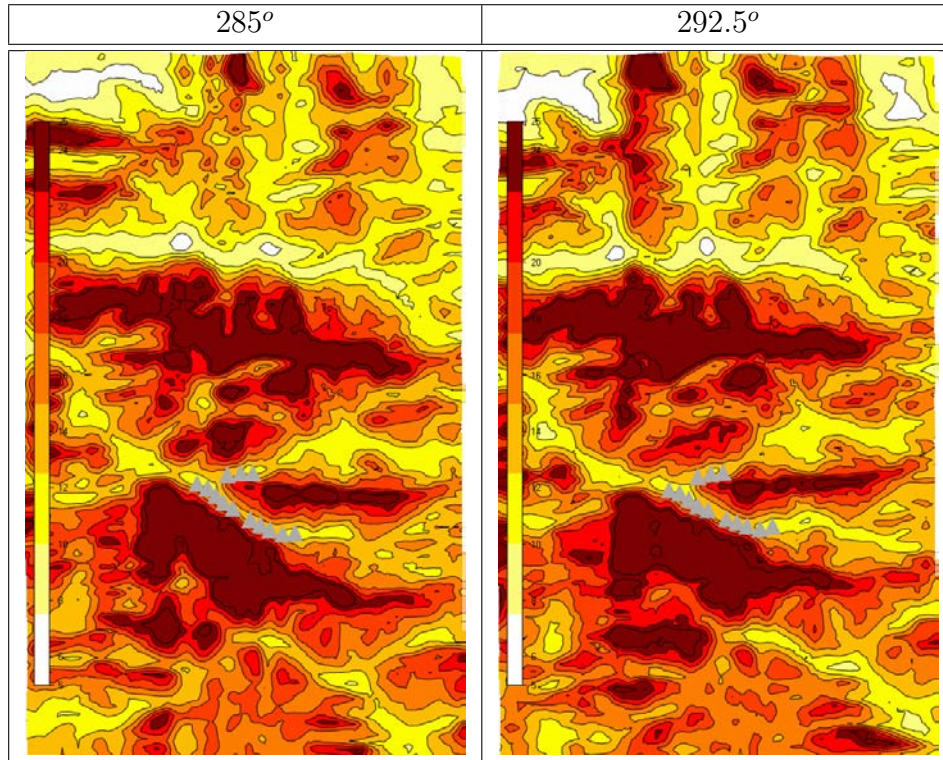


Figura C.28: Campo da intensidade de turbulência 285°, 292.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

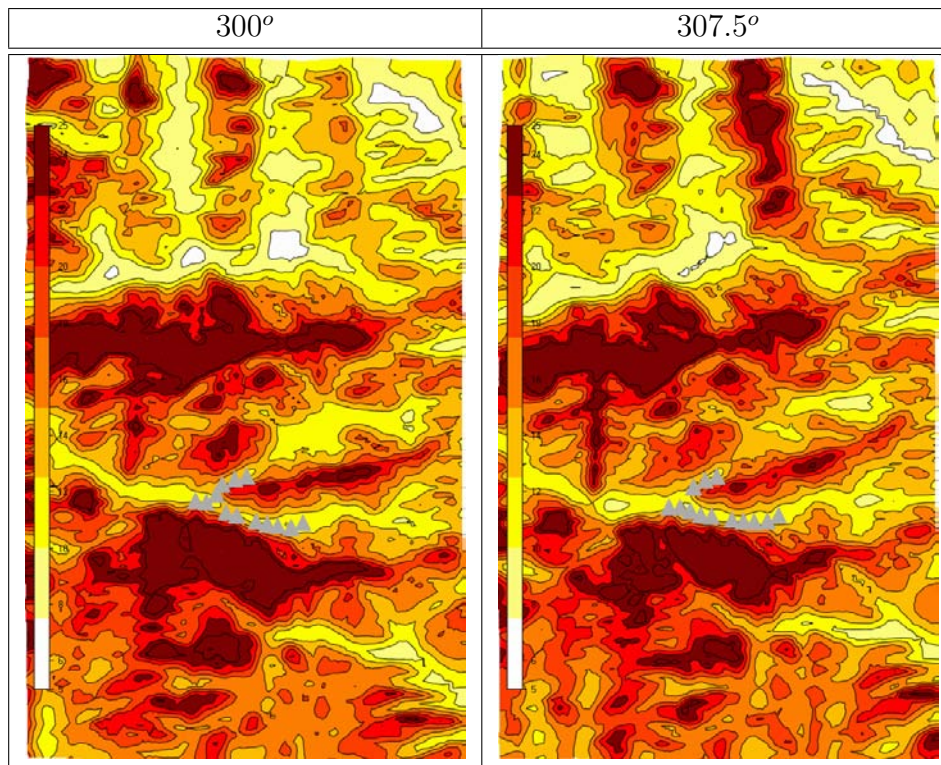


Figura C.29: Campo da intensidade de turbulência 300°, 307.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

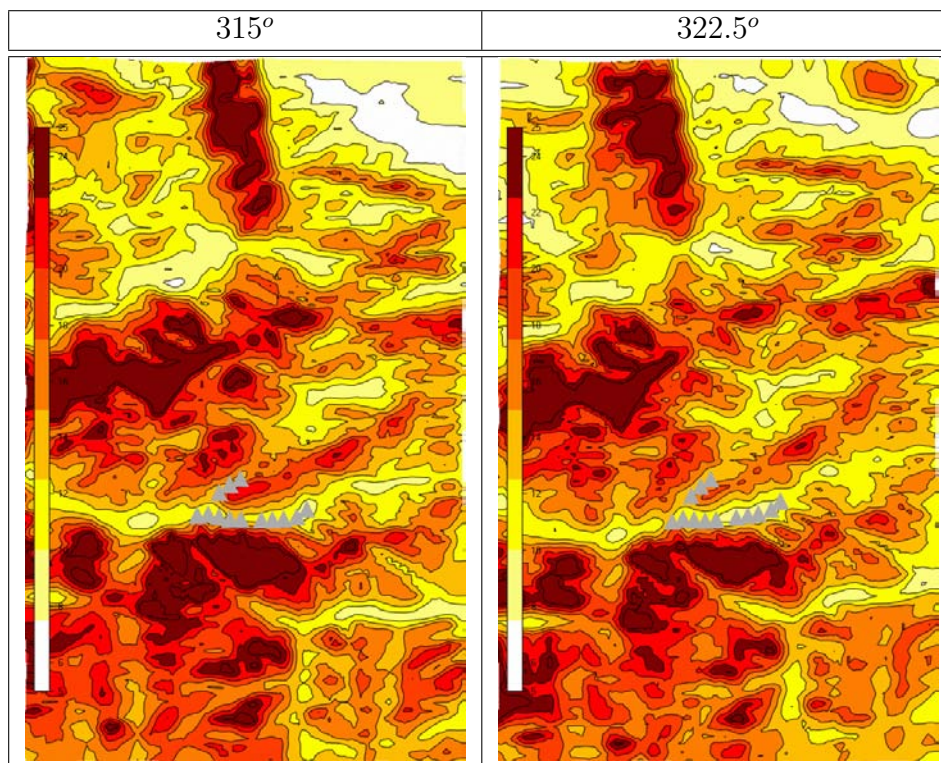


Figura C.30: Campo da intensidade de turbulência 315°, 322.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

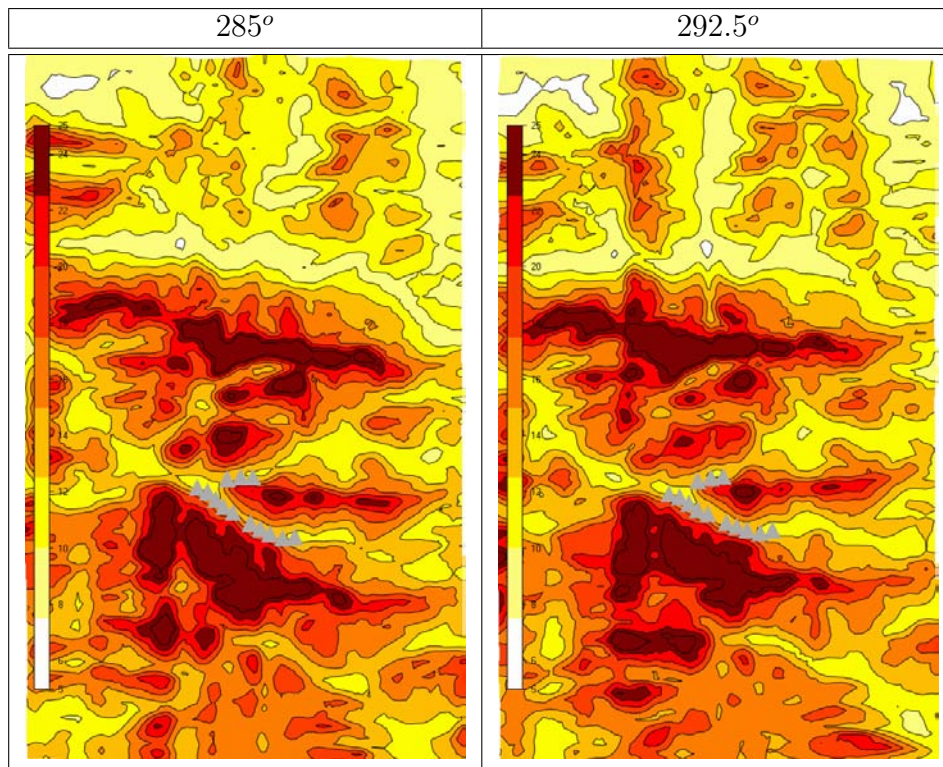


Figura C.31: Campo da intensidade de turbulência 285°, 292.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

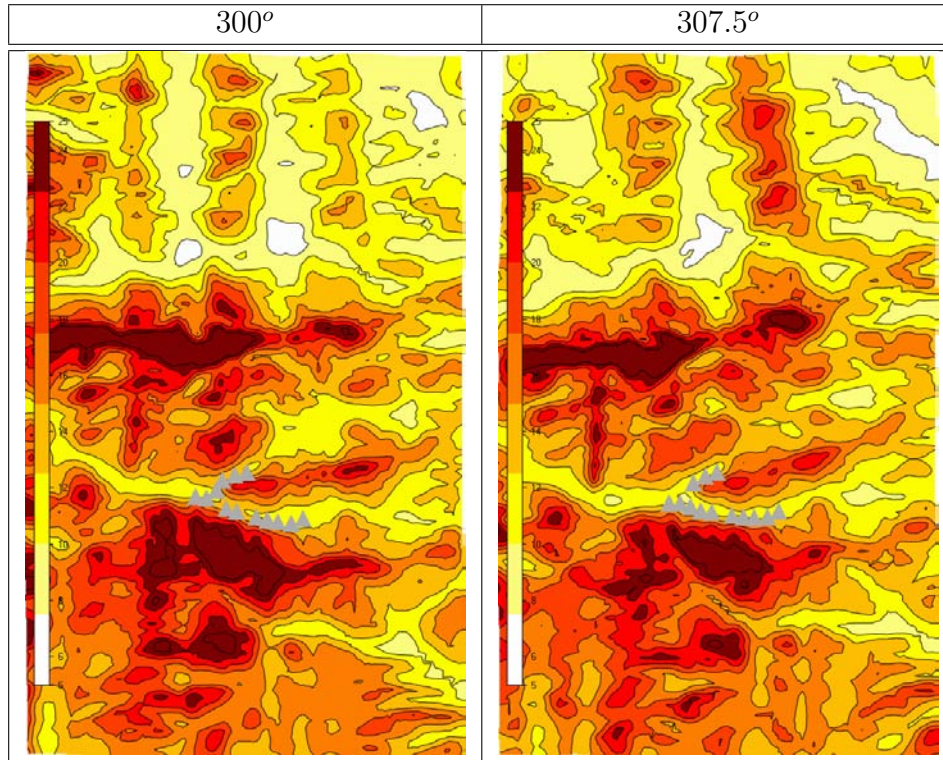


Figura C.32: Campo da intensidade de turbulência 300°, 307.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

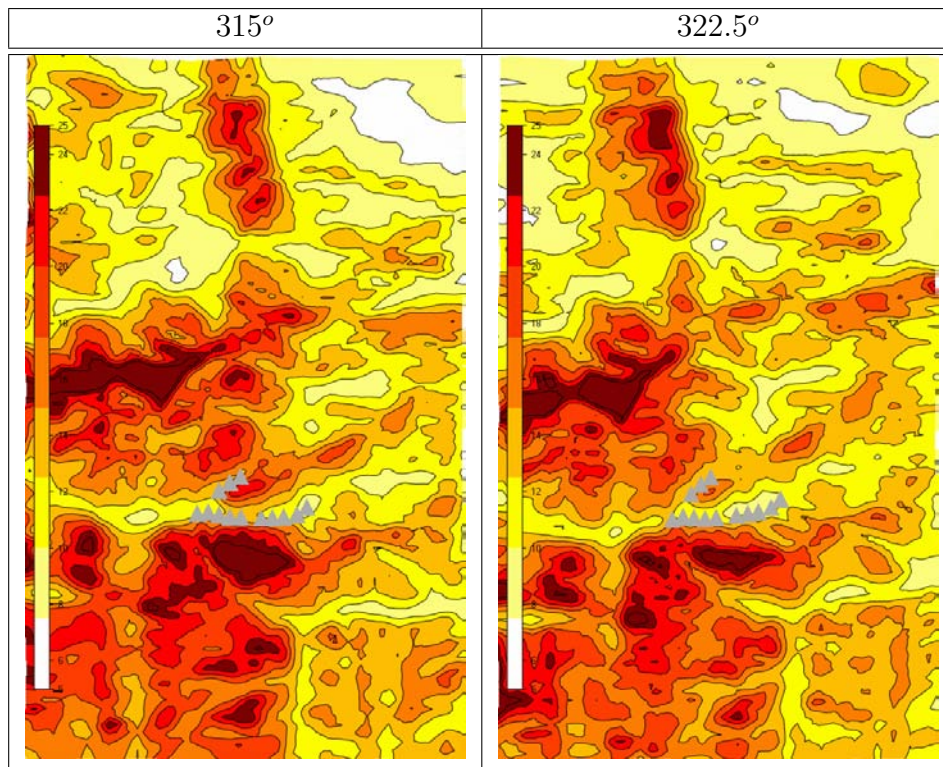


Figura C.33: Campo da intensidade de turbulência 315°, 322.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

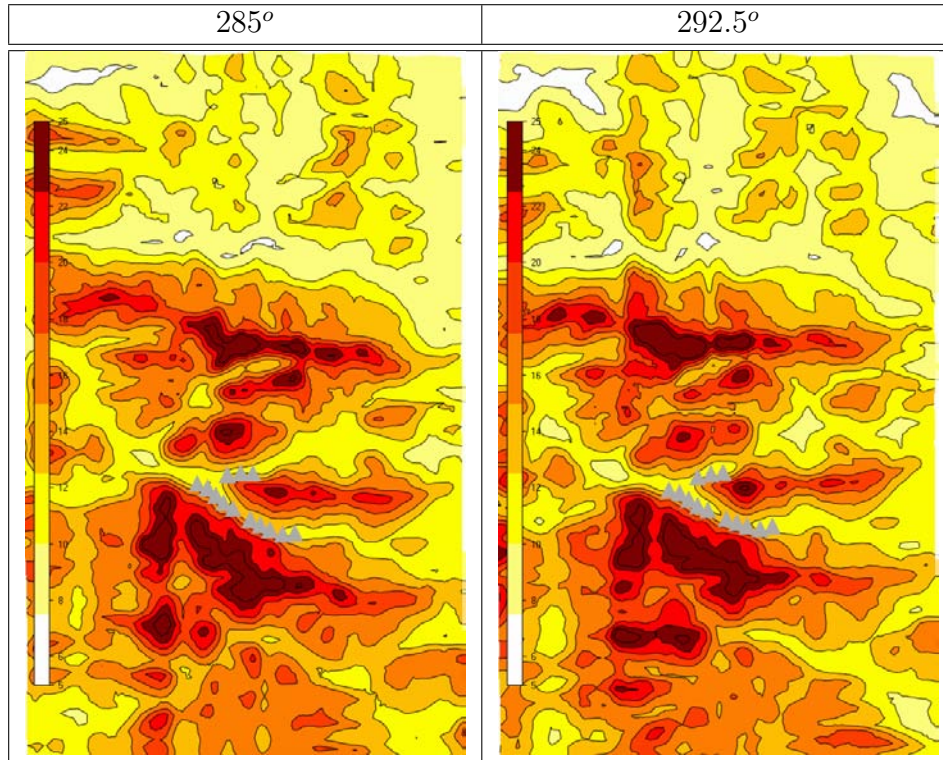


Figura C.34: Campo da intensidade de turbulência 285°, 292.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

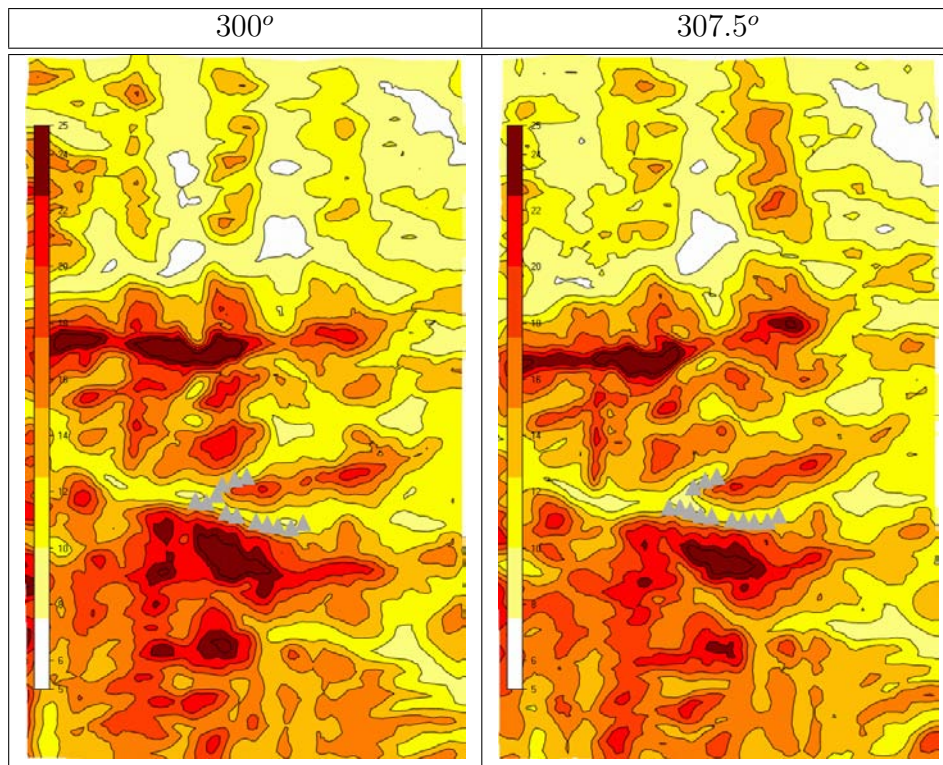


Figura C.35: Campo da intensidade de turbulência 300°, 307.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

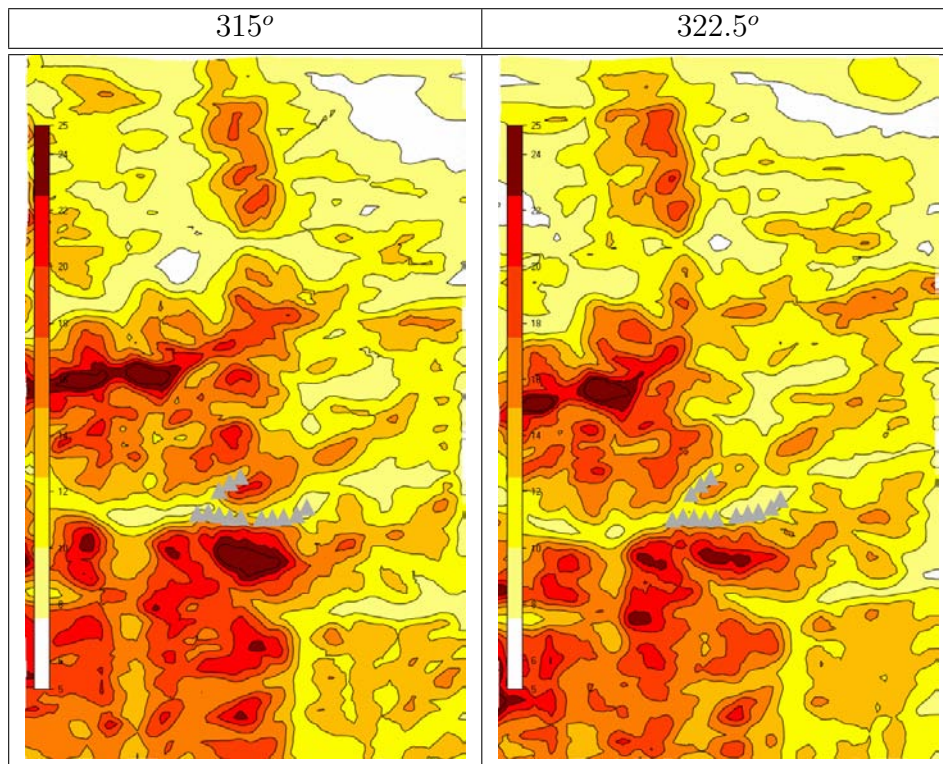


Figura C.36: Campo da intensidade de turbulência 315°, 322.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

### Inclinação do escoamento (graus)

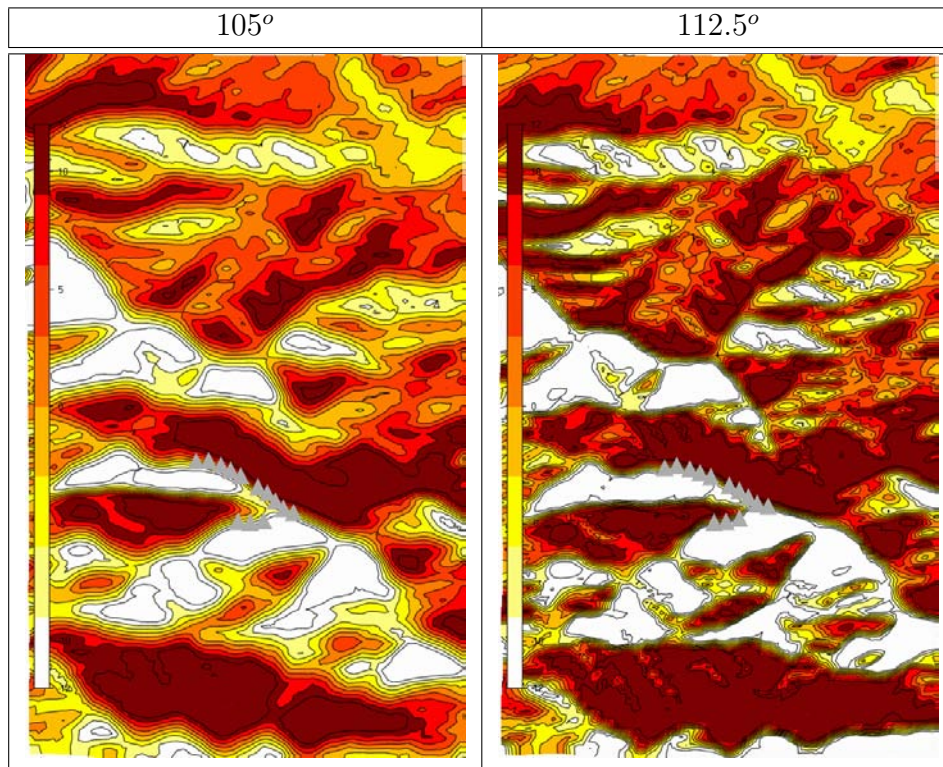


Figura C.37: Campo da inclinação do escoamento 105°, 112.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

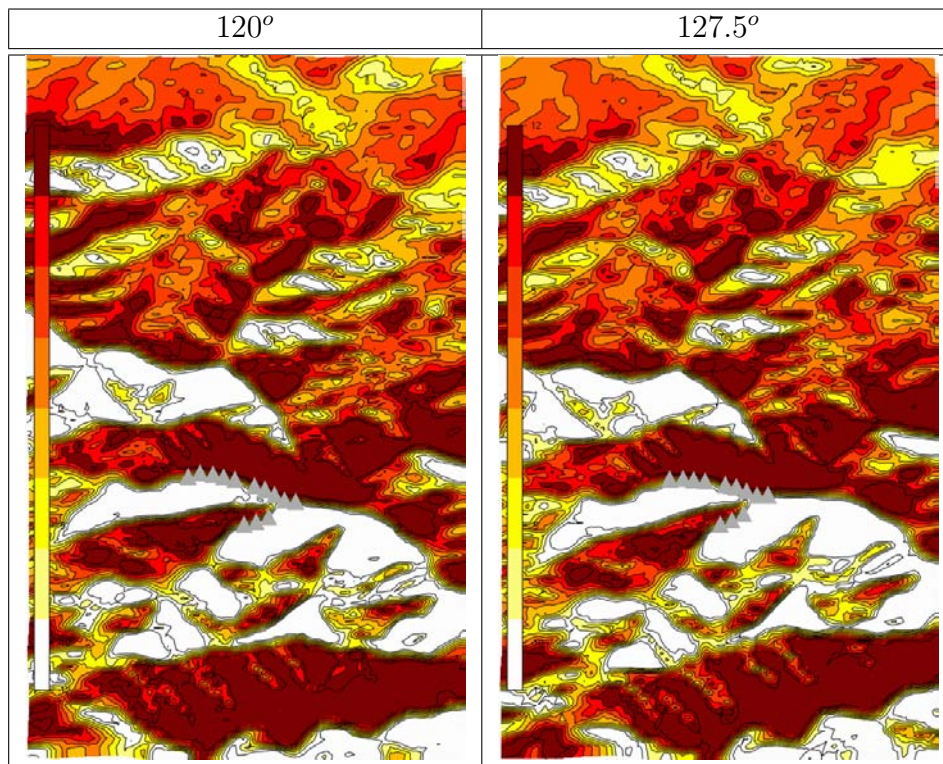


Figura C.38: Campo da inclinação do escoamento 120°, 127.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

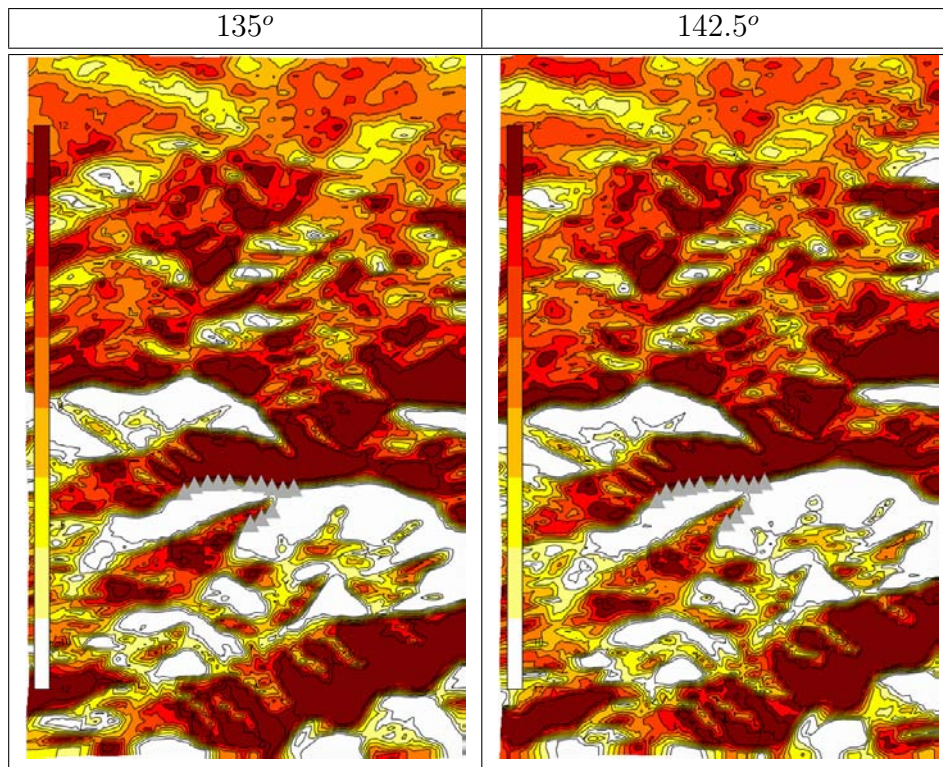


Figura C.39: Campo da inclinação do escoamento 135°, 142.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

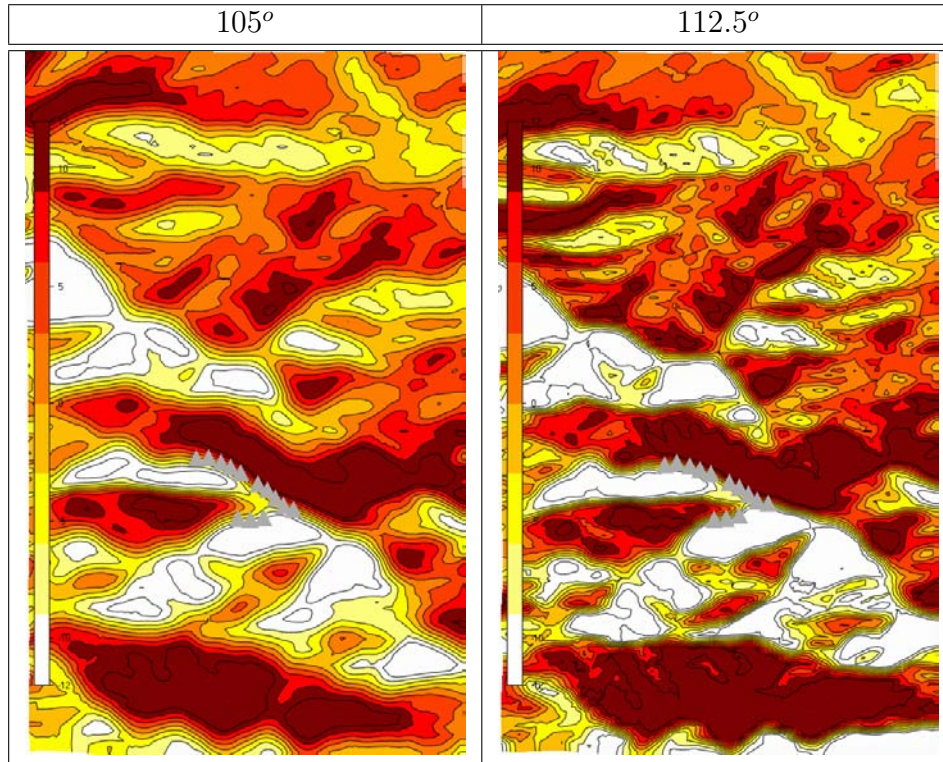


Figura C.40: Campo da inclinação do escoamento 105°, 112.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

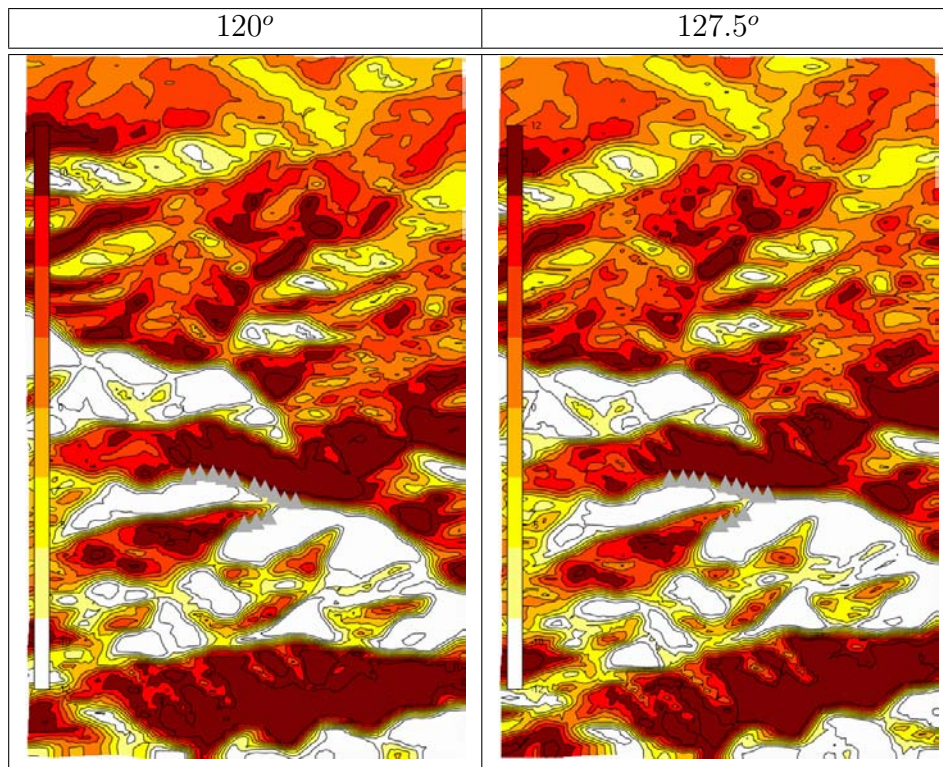


Figura C.41: Campo da inclinação do escoamento 120°, 127.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

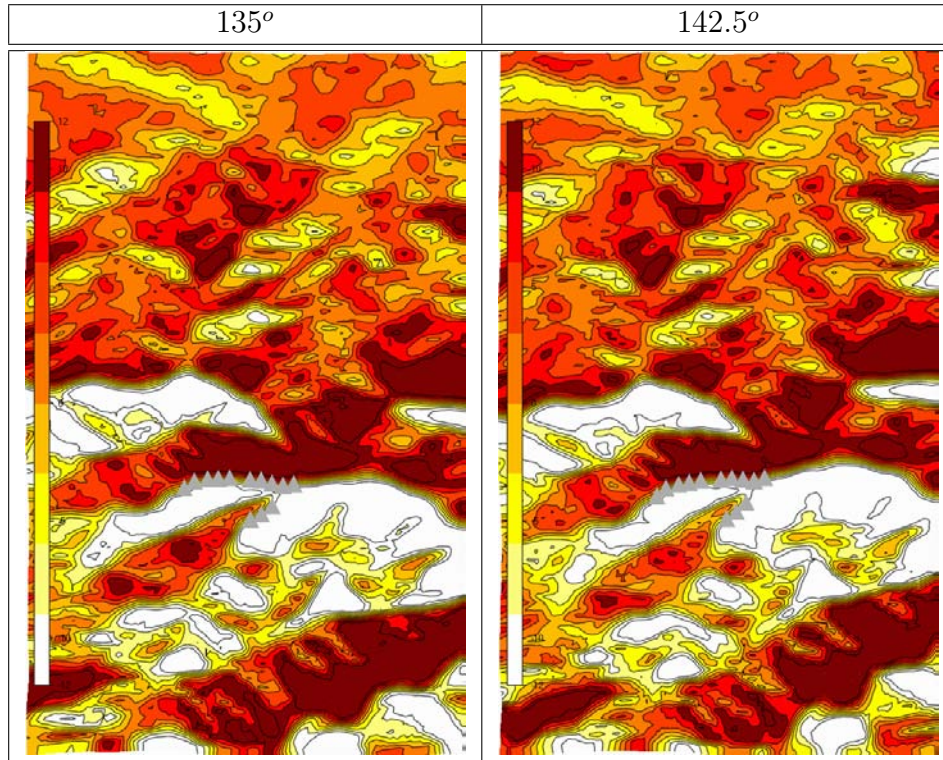


Figura C.42: Campo da inclinação do escoamento 135°, 142.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

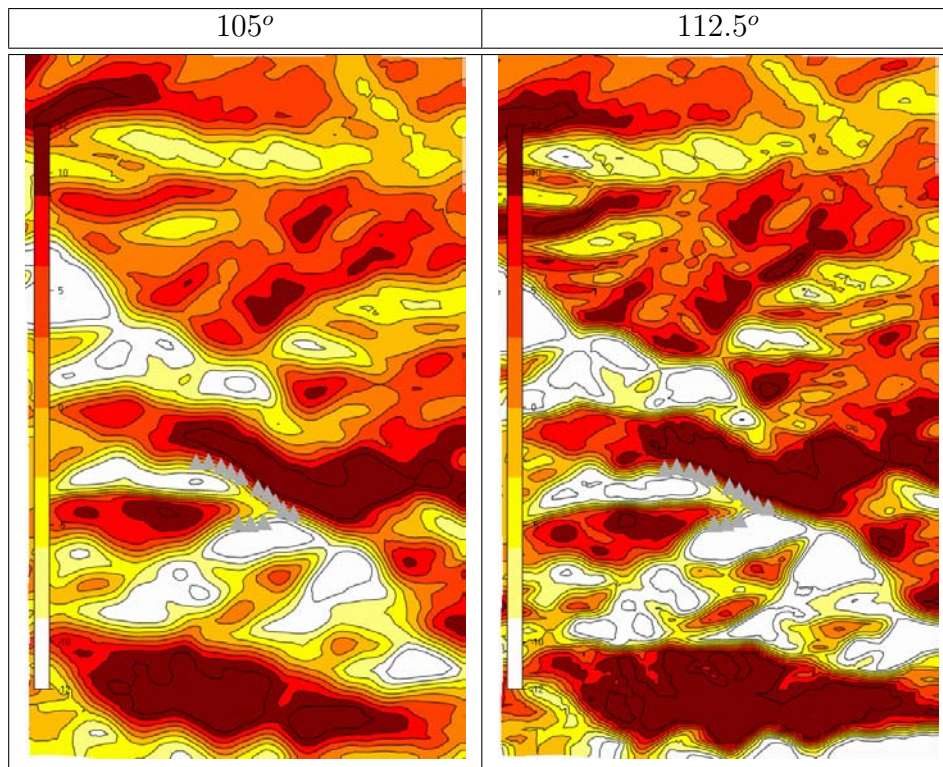


Figura C.43: Campo da inclinação do escoamento 105°, 112.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

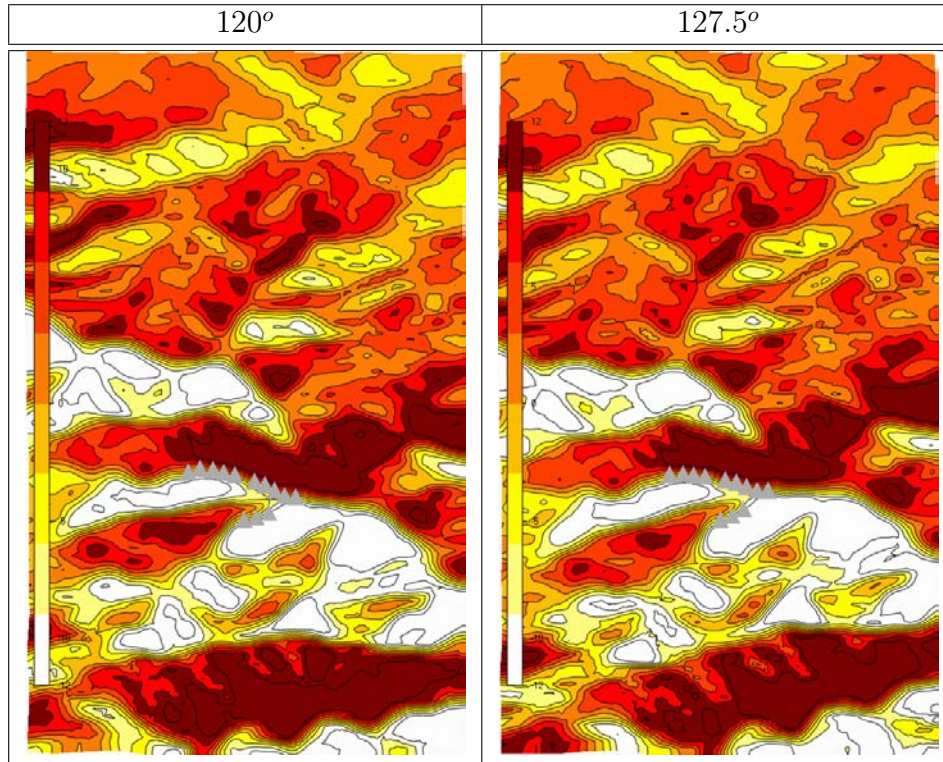


Figura C.44: Campo da inclinação do escoamento 120°, 127.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

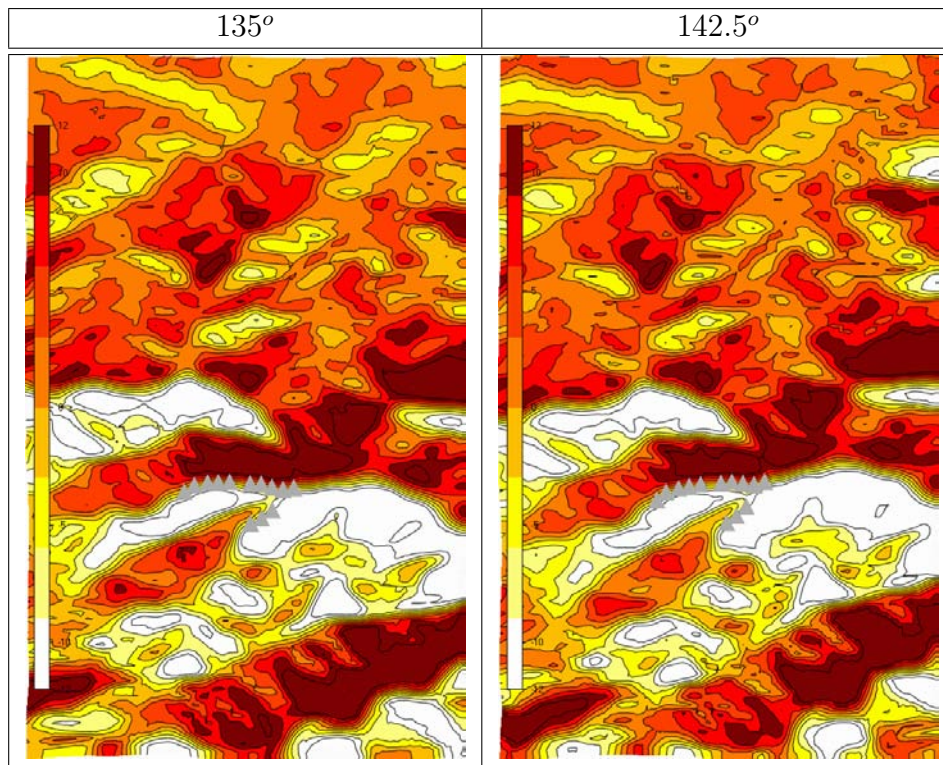


Figura C.45: Campo da inclinação do escoamento 135°, 142.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

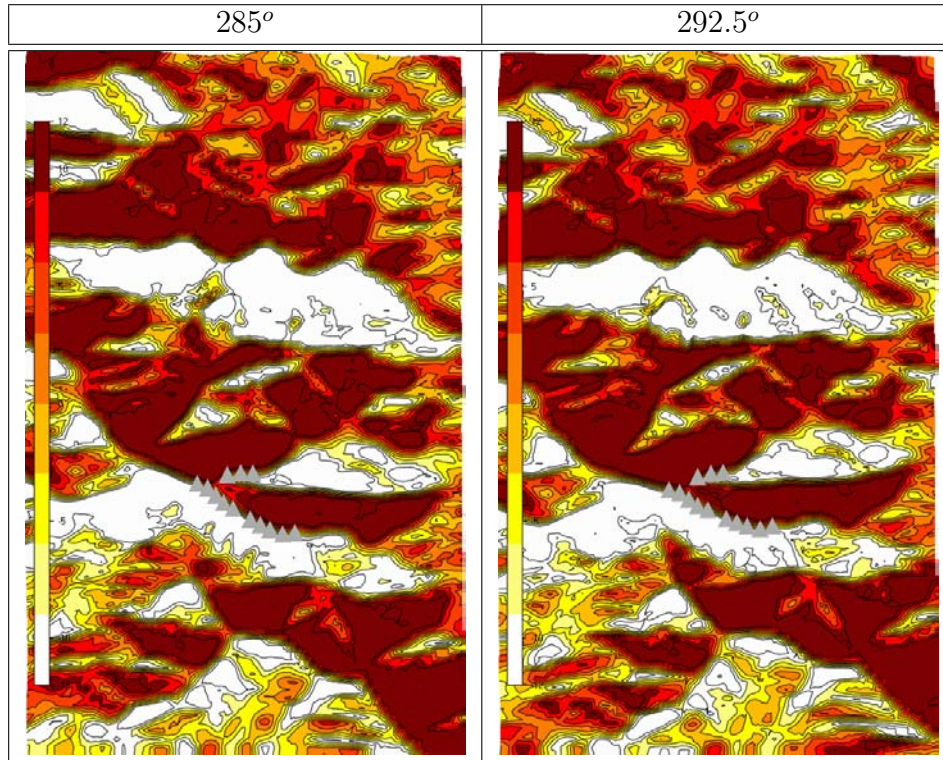


Figura C.46: Campo da inclinação do escoamento 285°, 292.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

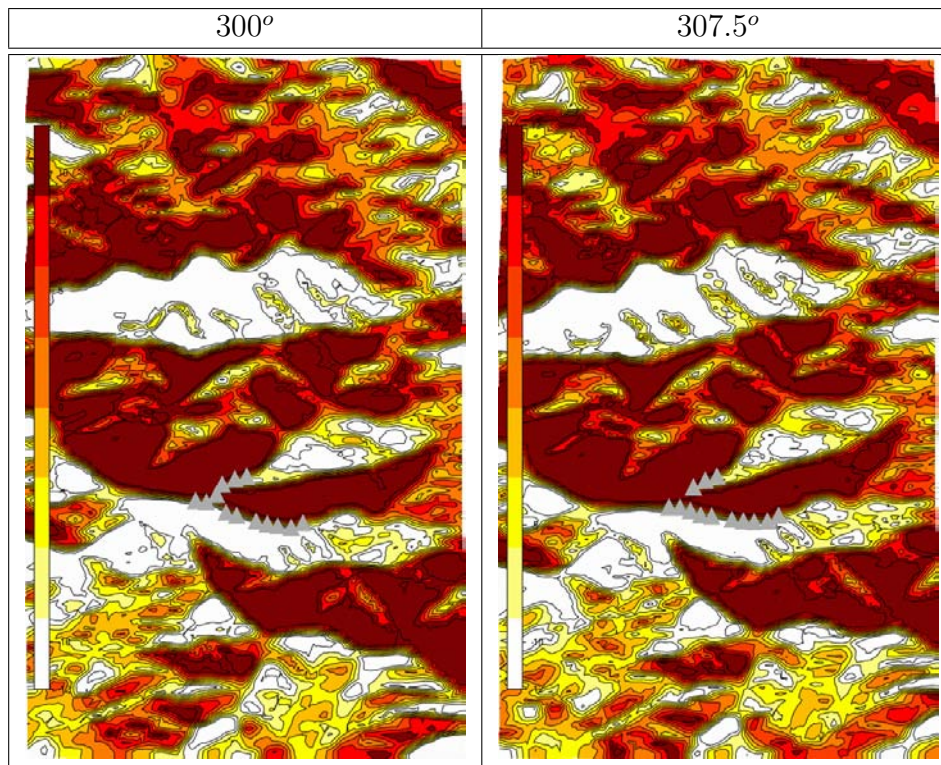


Figura C.47: Campo da inclinação do escoamento 300°, 307.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

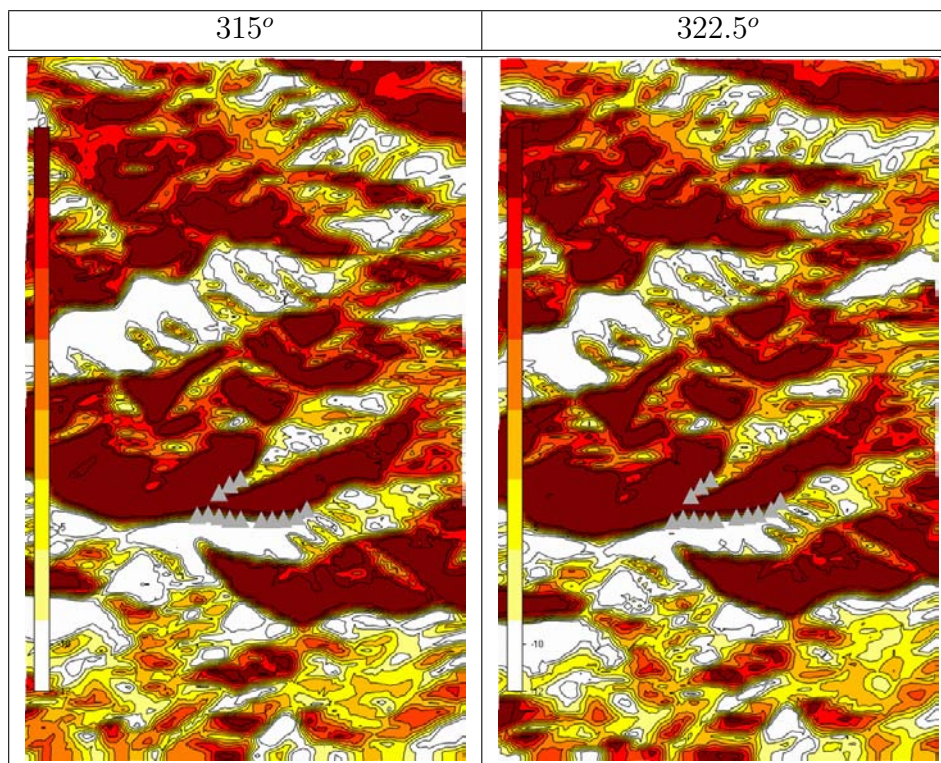


Figura C.48: Campo da inclinação do escoamento 315°, 322.5° (h=44 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

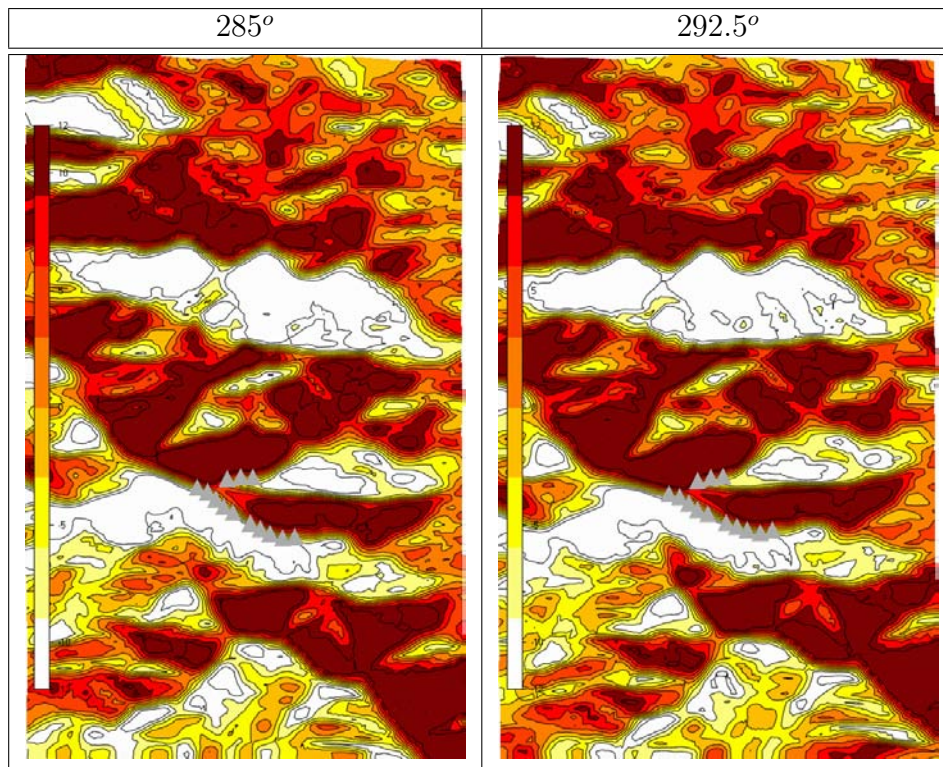


Figura C.49: Campo da inclinação do escoamento 285°, 292.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

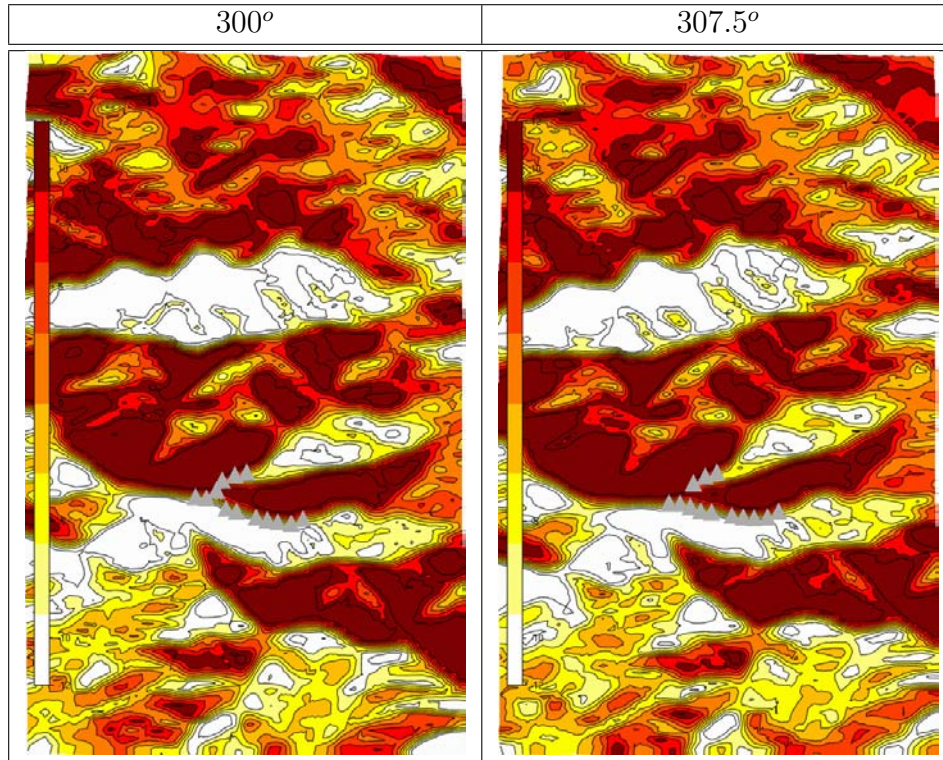


Figura C.50: Campo da inclinação do escoamento 300°, 307.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

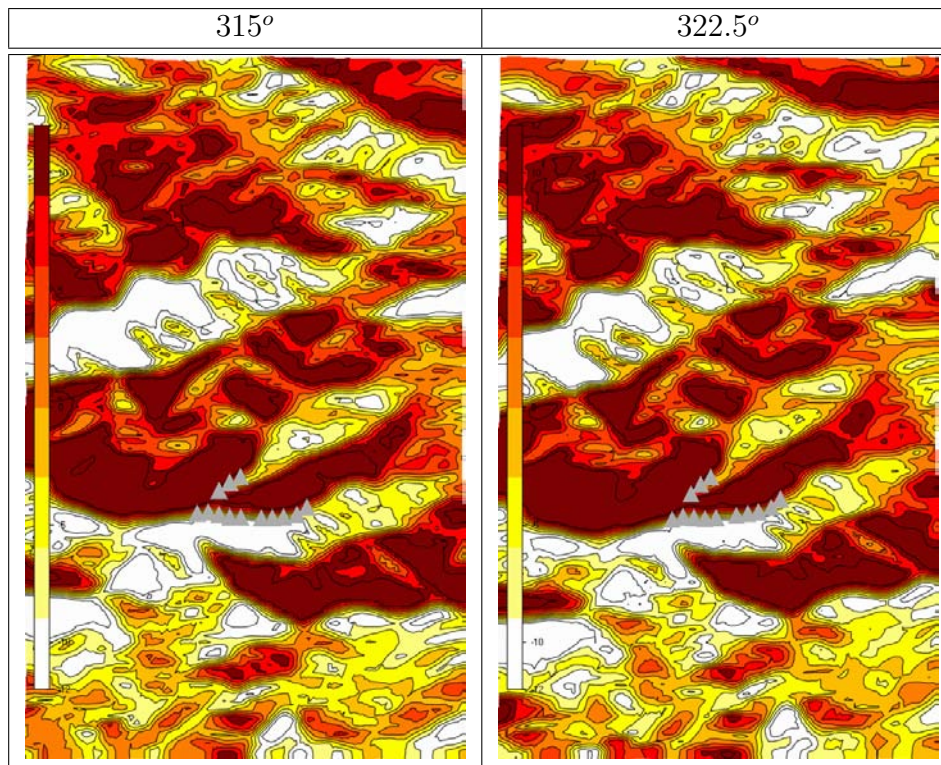


Figura C.51: Campo da inclinação do escoamento 315°, 322.5° (h=85 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

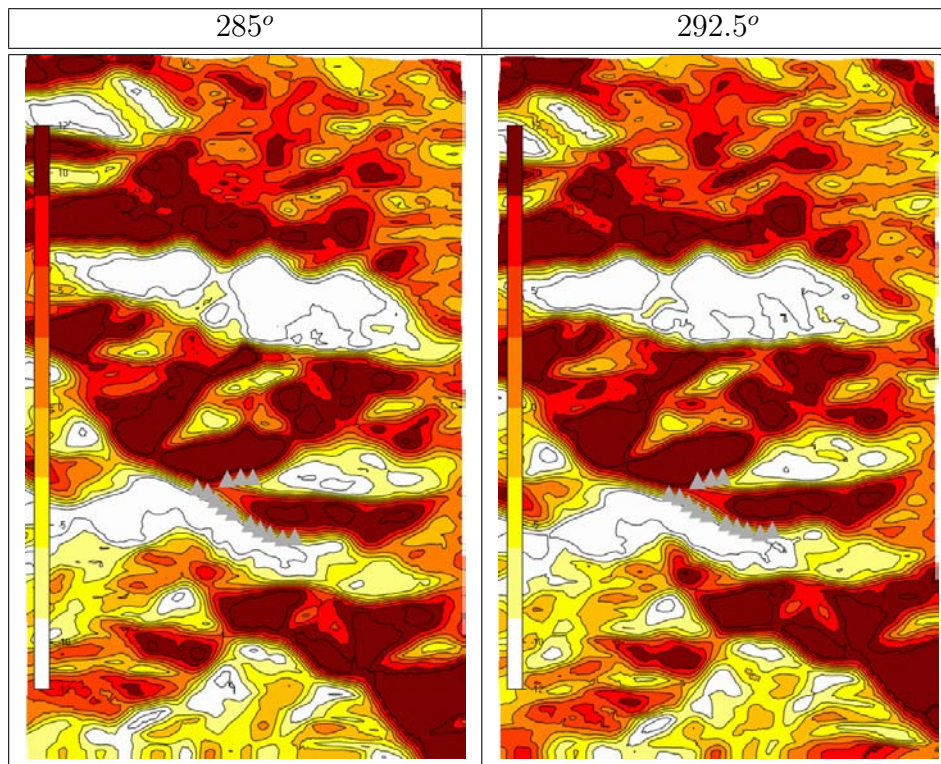


Figura C.52: Campo da inclinação do escoamento 285°, 292.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

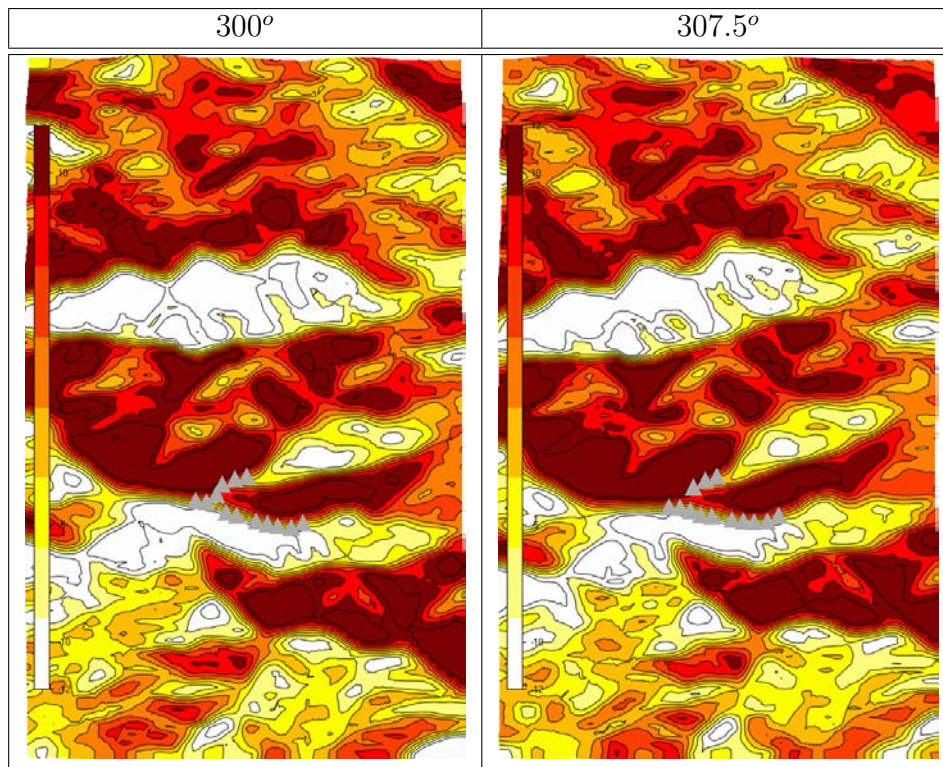


Figura C.53: Campo da inclinação do escoamento 300°, 307.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

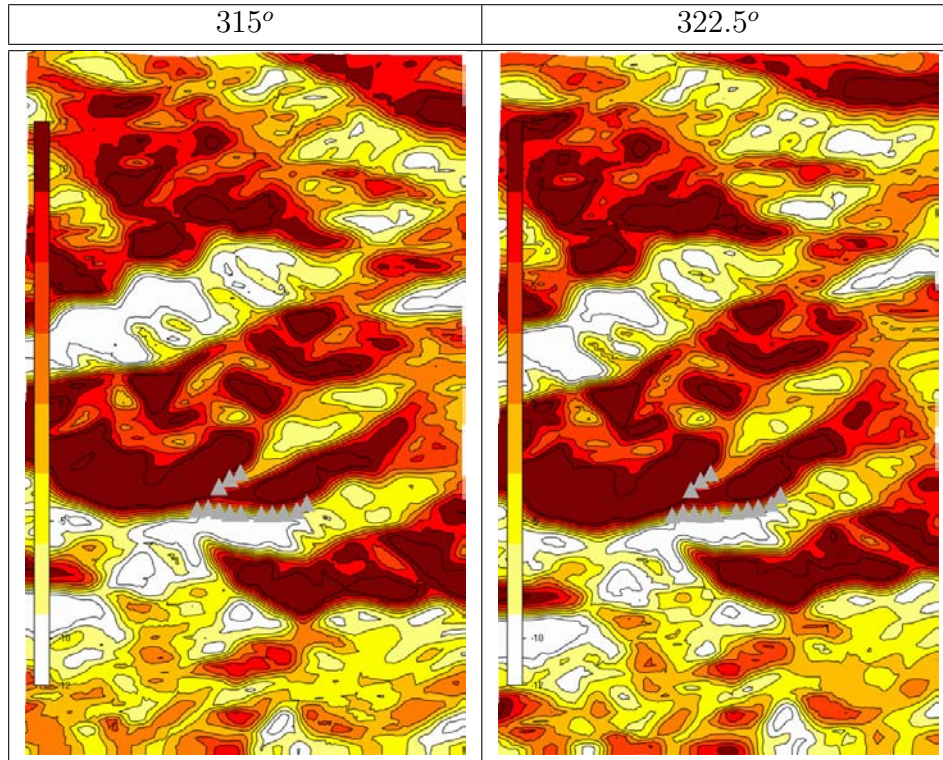


Figura C.54: Campo da inclinação do escoamento 315°, 322.5° (h=126 m a.n.s), os triângulos designam a posição dos aerogeradores.

# Apêndice D

## Aerogeradores - perfis verticais e tabelas

Velocidade horizontal adimensionalizada ( $V_h/V_{h\_85m}$ )

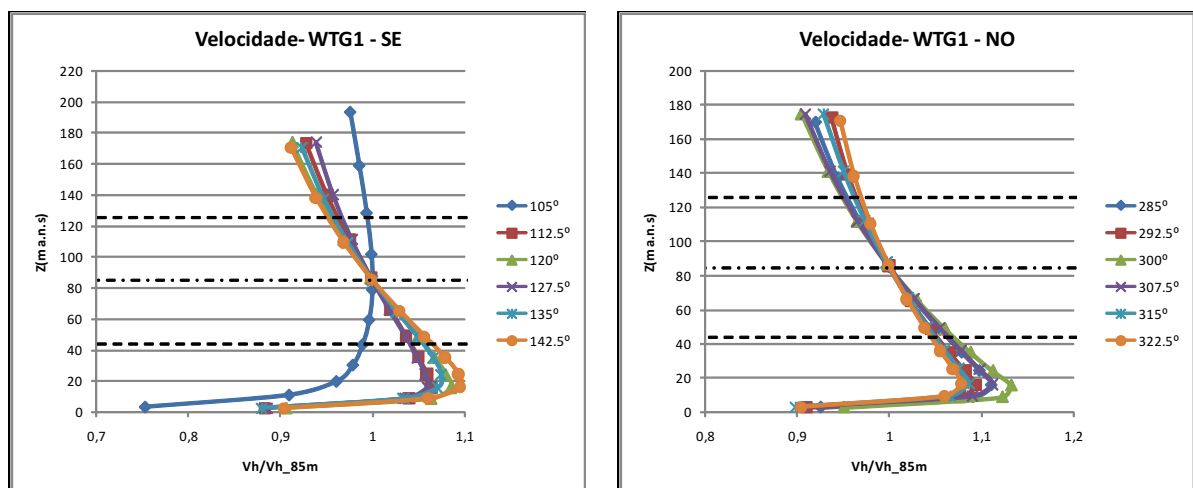


Figura D.1: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG1

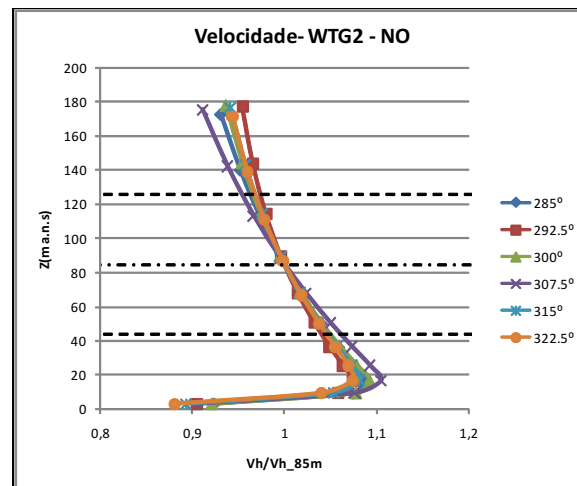
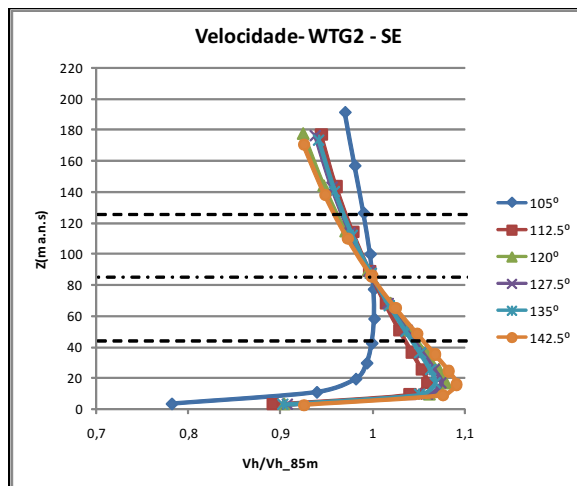


Figura D.2: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG2

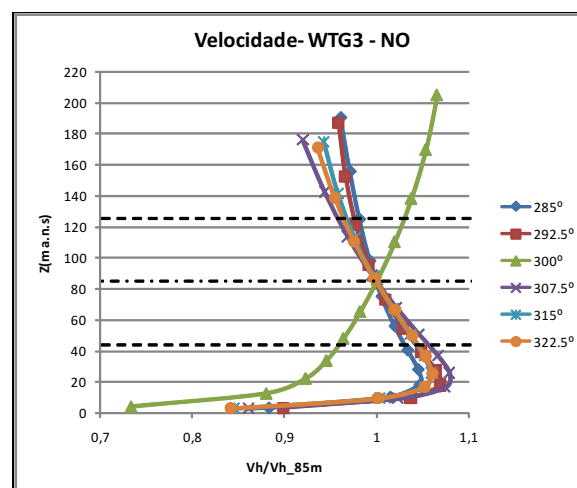
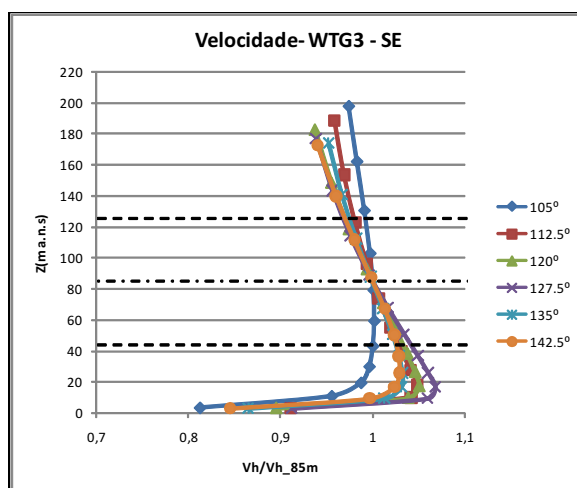


Figura D.3: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG3

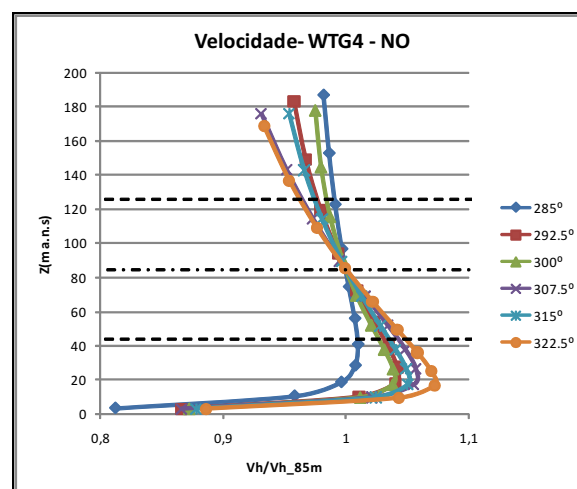
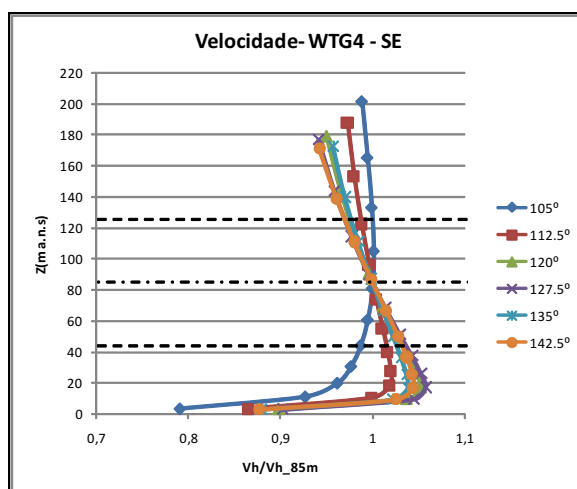


Figura D.4: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG4

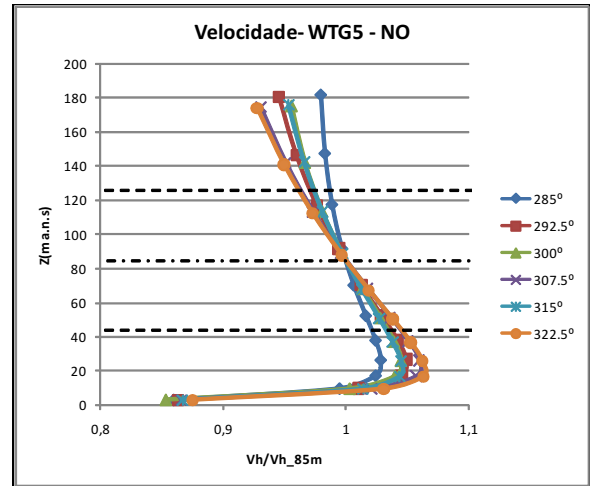
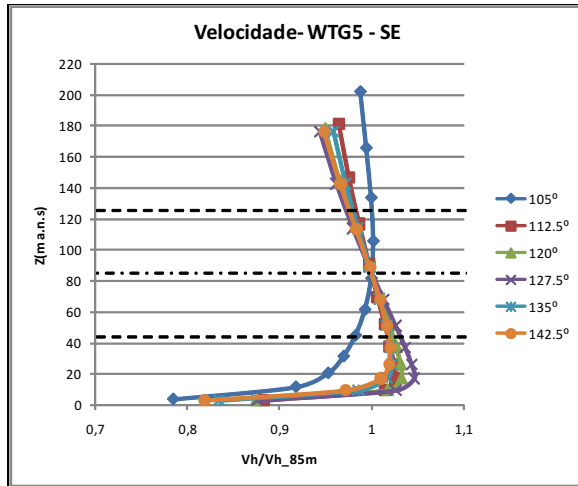


Figura D.5: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG5

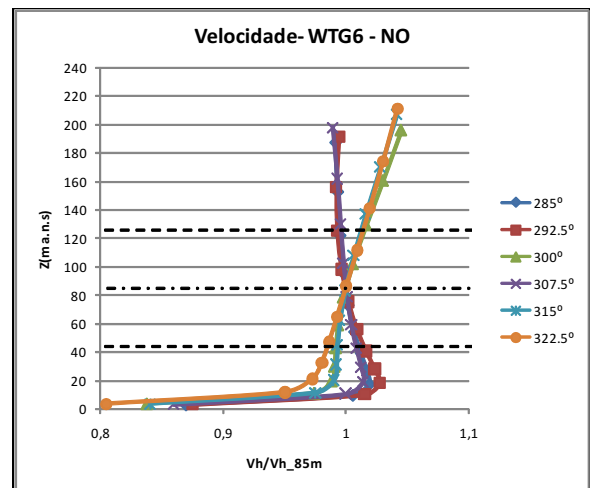
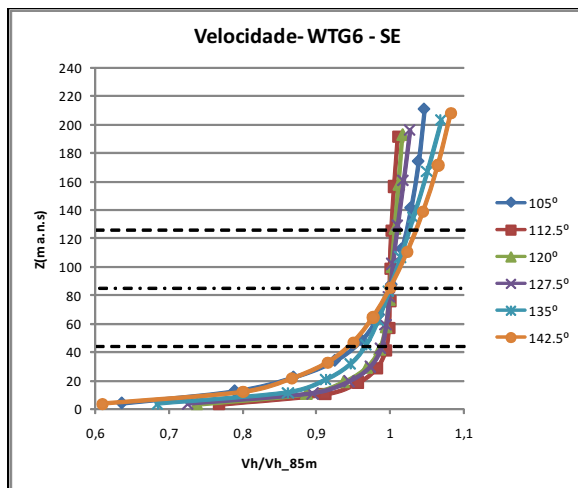


Figura D.6: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG6

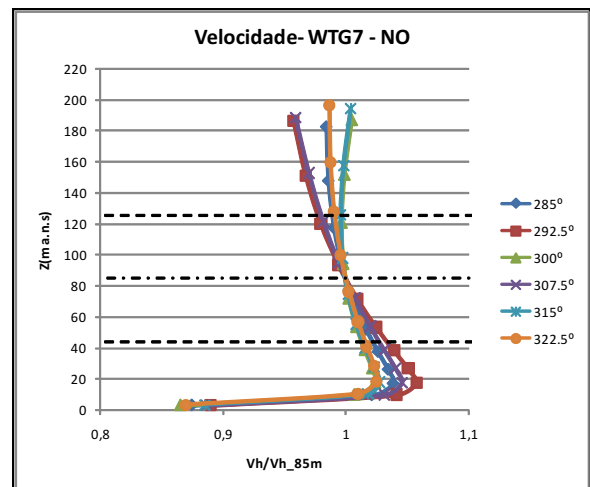
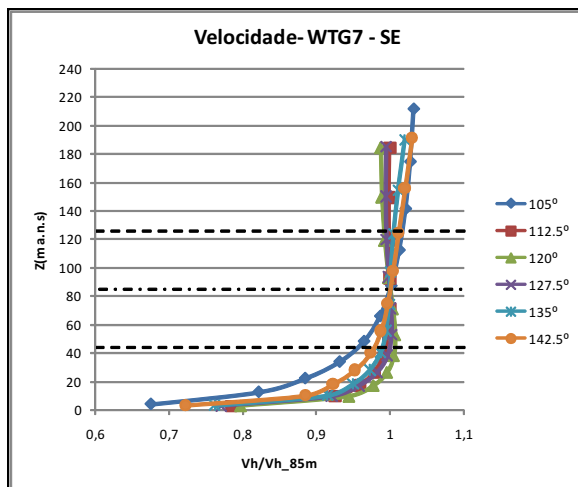


Figura D.7: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG7

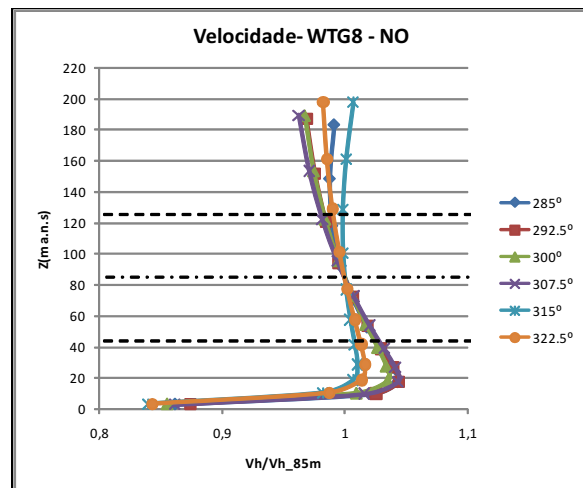
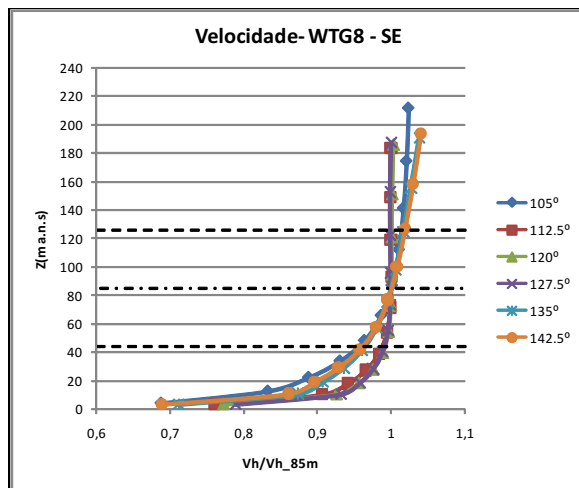


Figura D.8: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG8

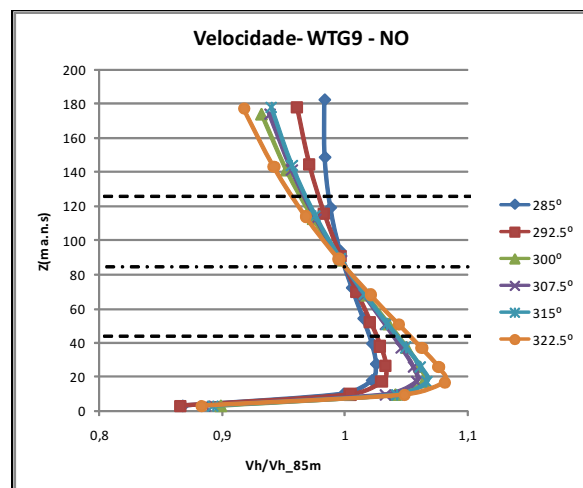
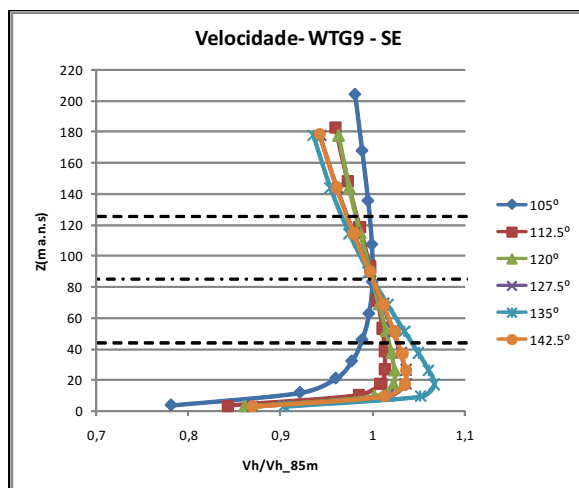


Figura D.9: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG9

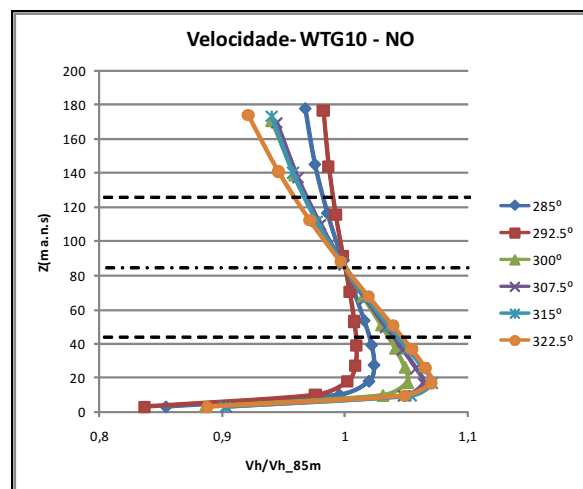
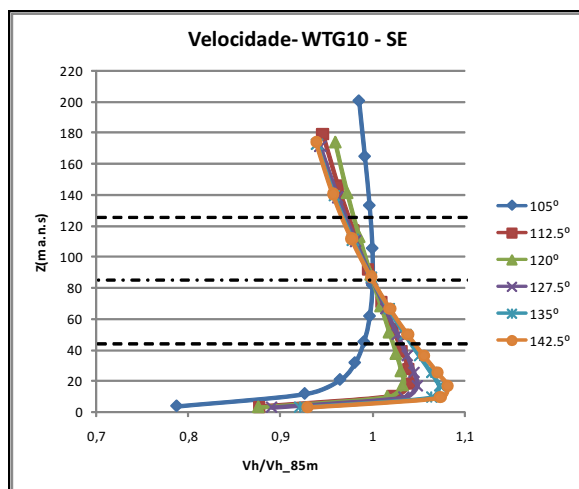


Figura D.10: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG10

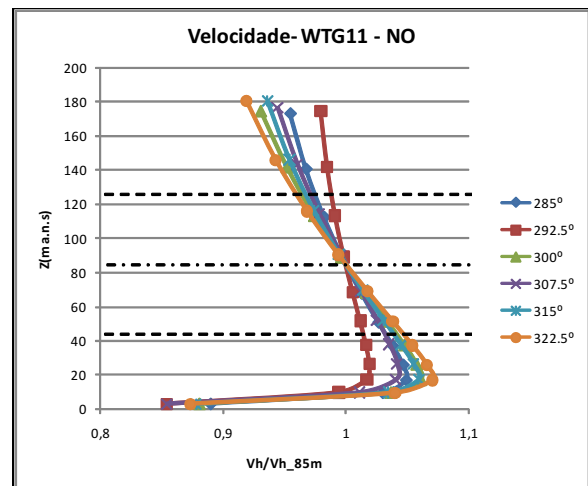
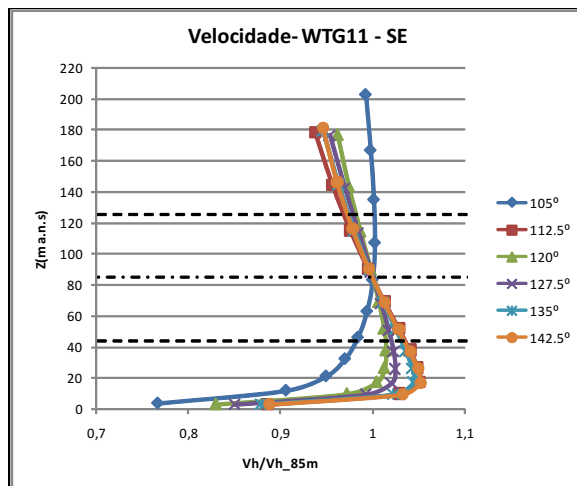


Figura D.11: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG11

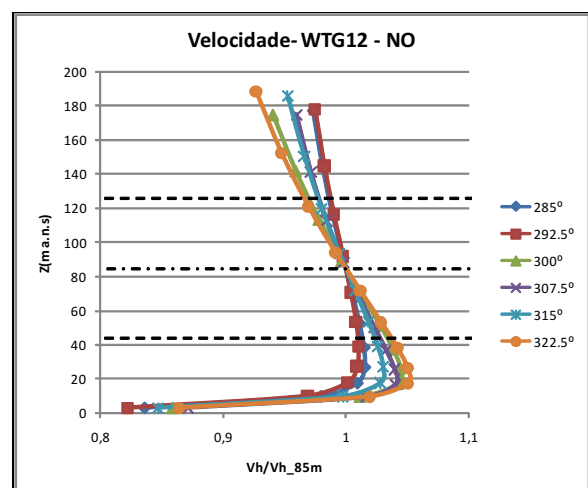
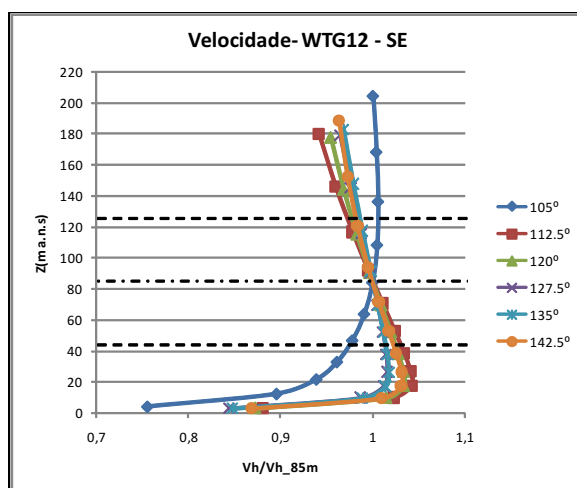


Figura D.12: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG12

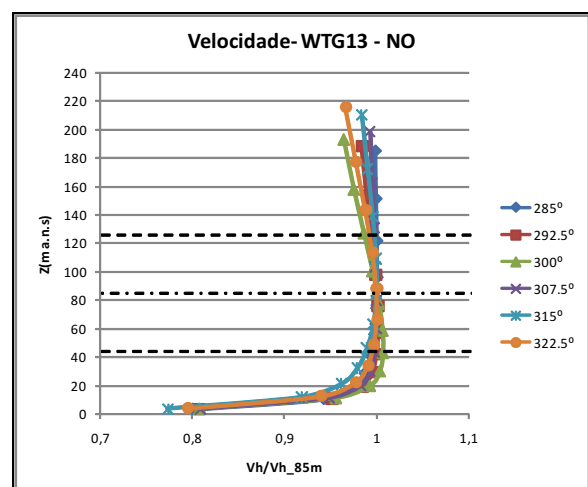
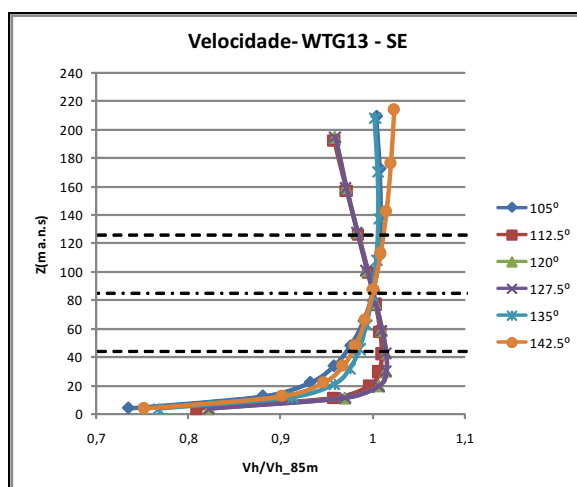


Figura D.13: Perfis de velocidade adimensionalizados WTG13

## Intensidade de turbulência

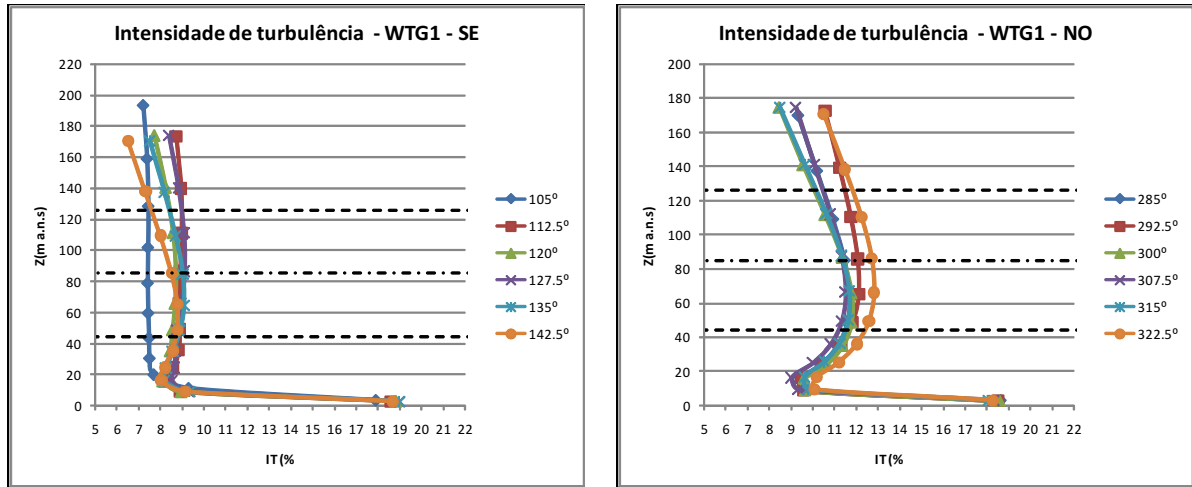


Figura D.14: Perfis da intensidade de turbulência WTG1

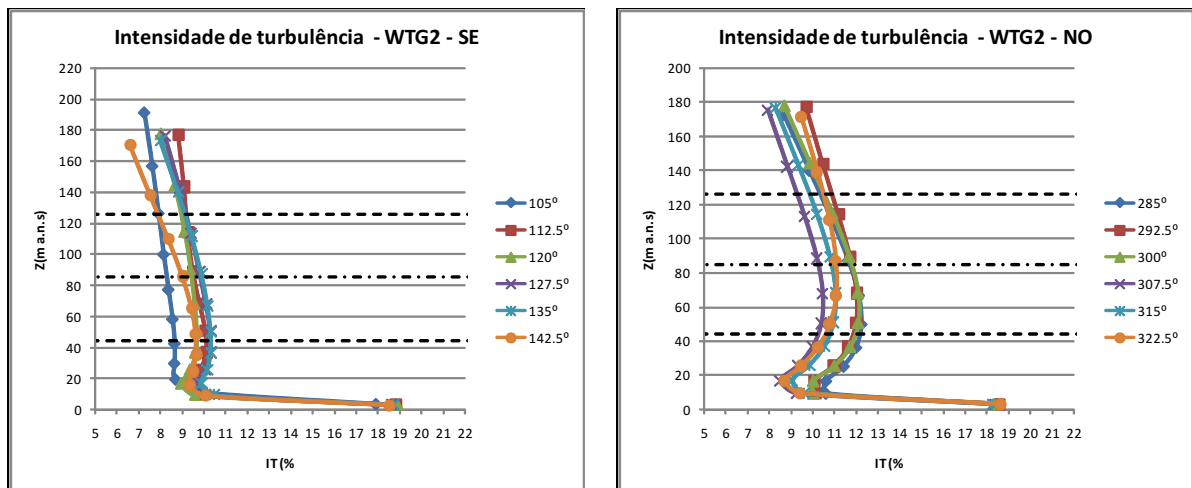


Figura D.15: Perfis da intensidade de turbulência WTG2

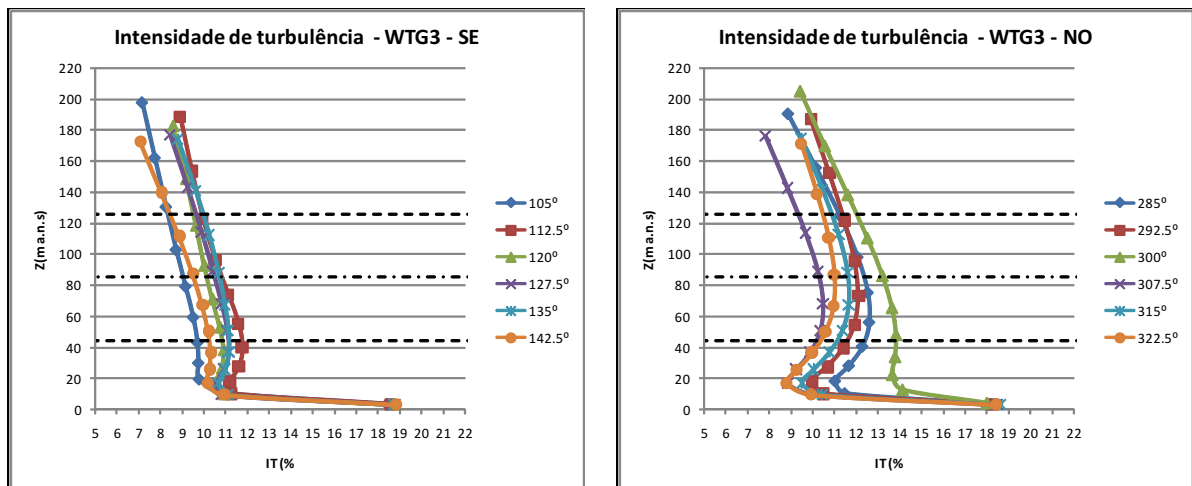


Figura D.16: Perfis da intensidade de turbulência WTG3

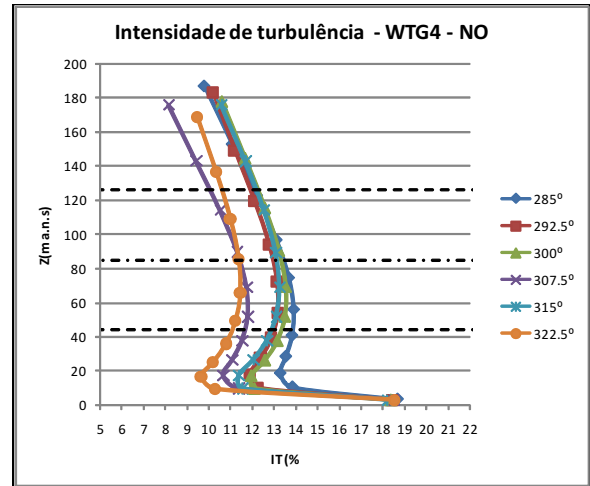
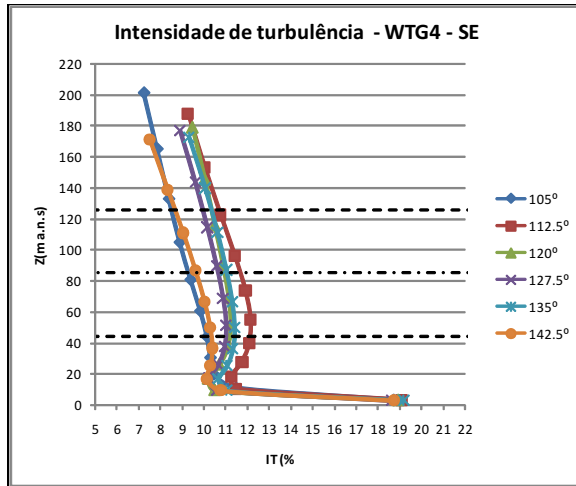


Figura D.17: Perfis da intensidade de turbulência WTG4

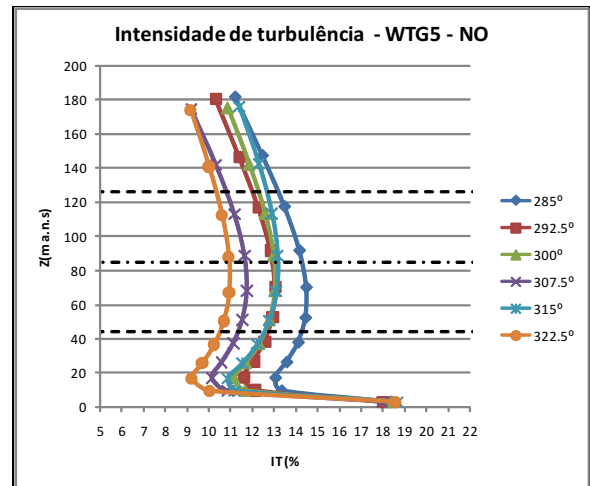
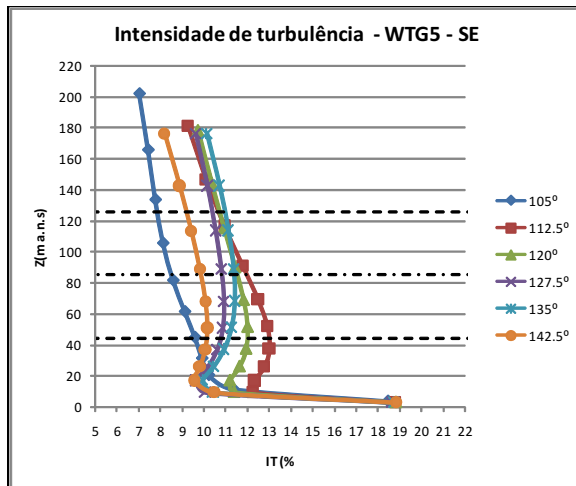


Figura D.18: Perfis da intensidade de turbulência WTG5

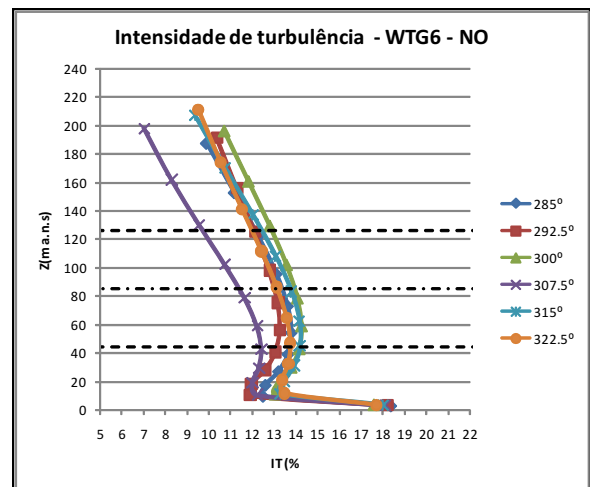
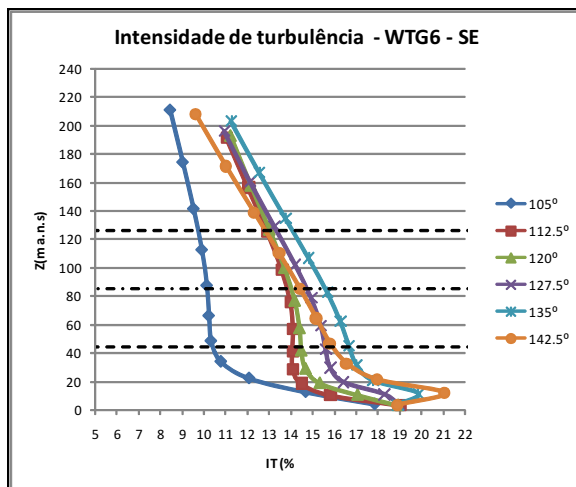


Figura D.19: Perfis da intensidade de turbulência WTG6

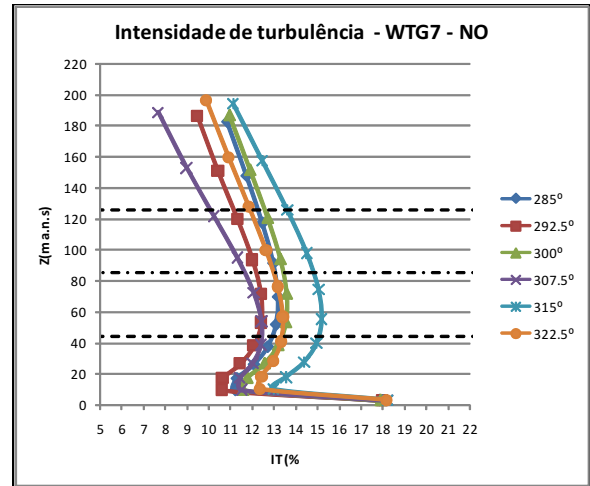
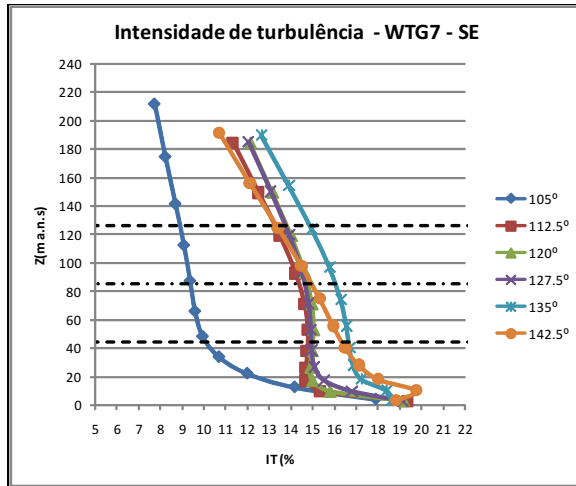


Figura D.20: Perfis da intensidade de turbulência WTG7

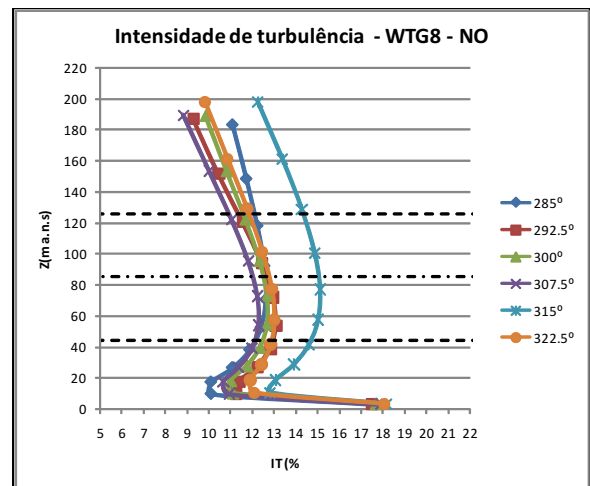
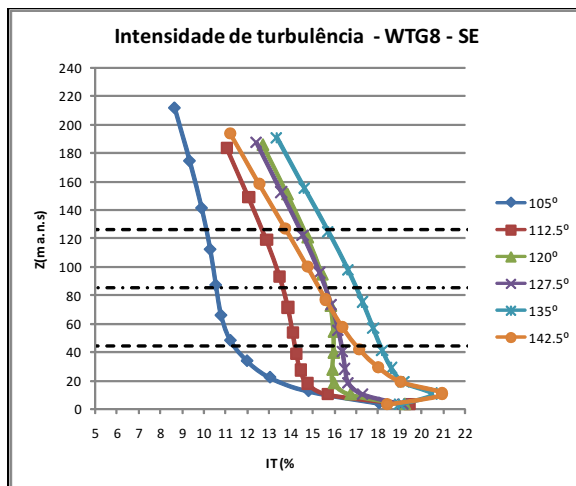


Figura D.21: Perfis da intensidade de turbulência WTG8

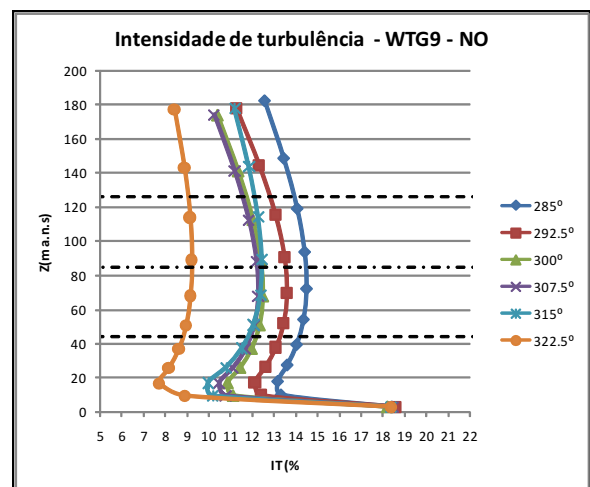
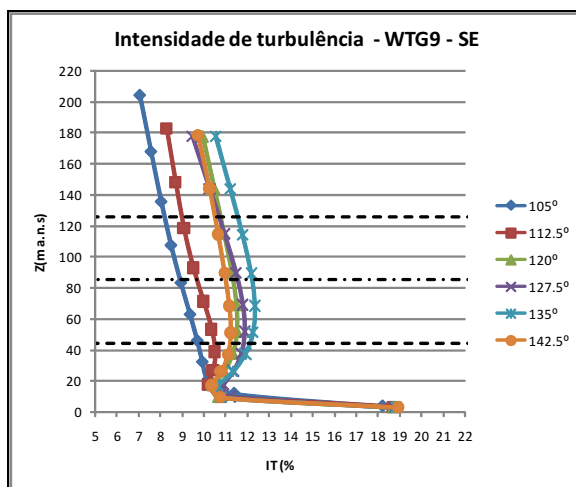


Figura D.22: Perfis da intensidade de turbulência WTG9

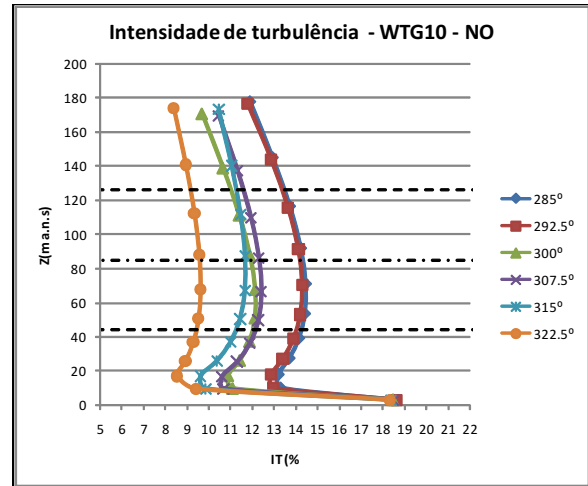
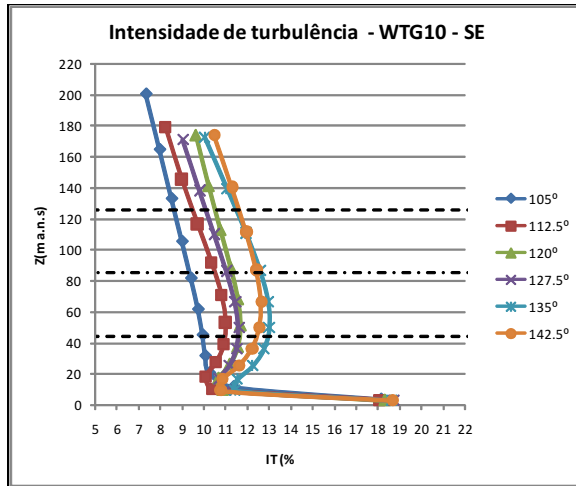


Figura D.23: Perfis da intensidade de turbulência WTG10

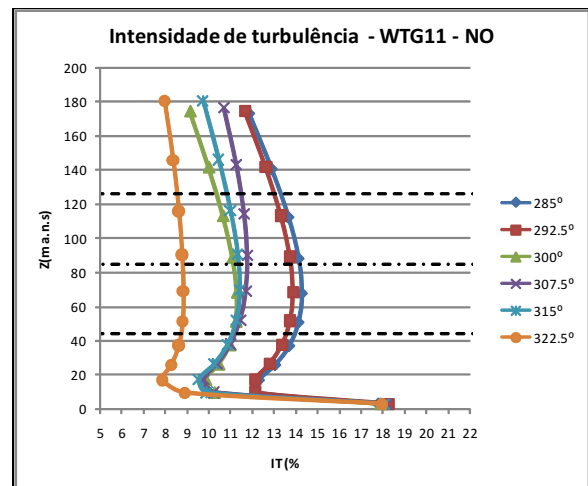
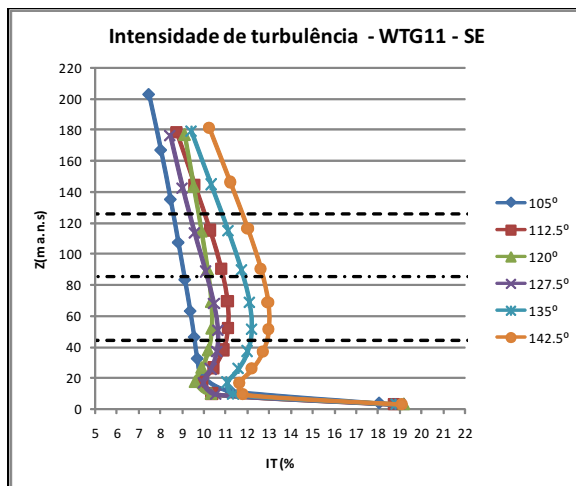


Figura D.24: Perfis da intensidade de turbulência WTG11

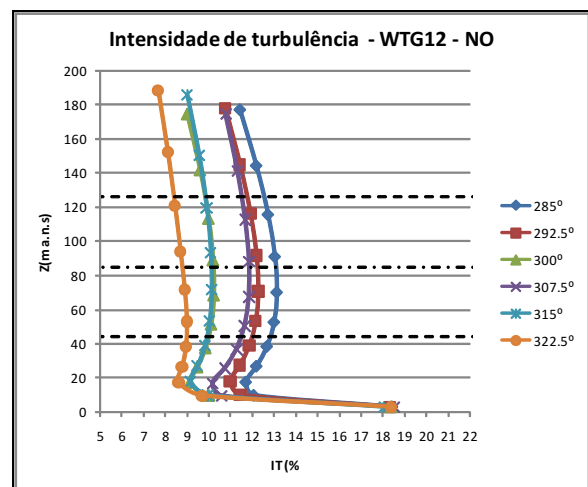
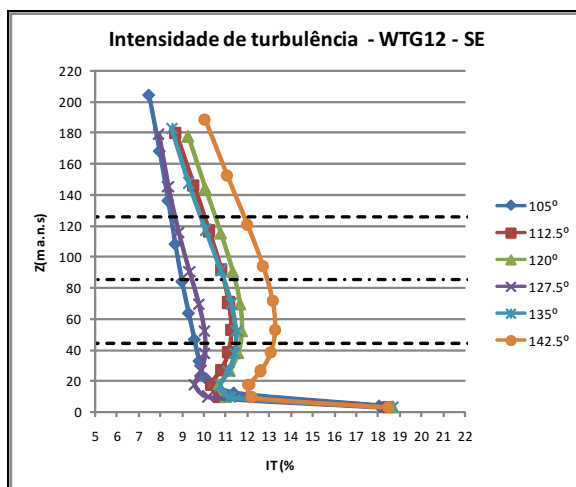


Figura D.25: Perfis da intensidade de turbulência WTG12

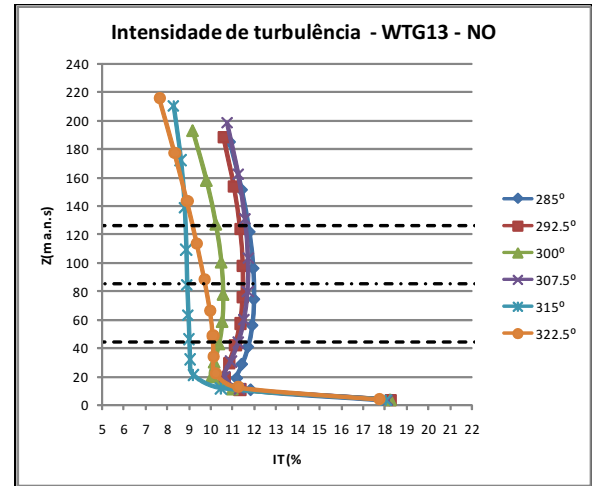
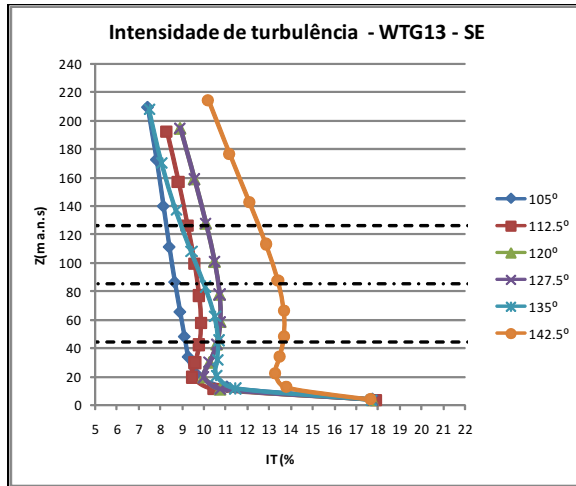


Figura D.26: Perfis da intensidade de turbulência WTG13

## Inclinação do escoamento

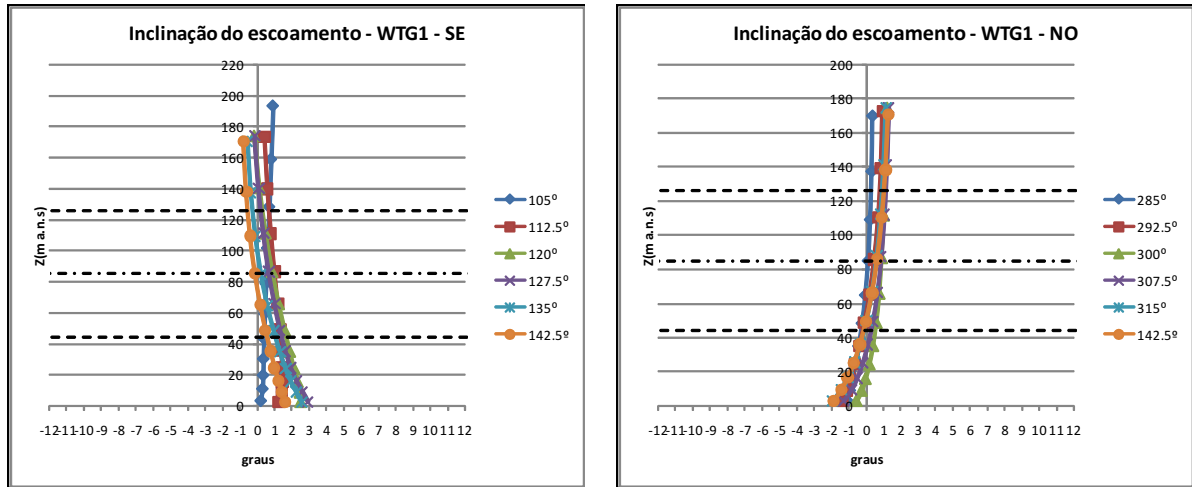


Figura D.27: Perfis da inclinação do escoamento WTG1

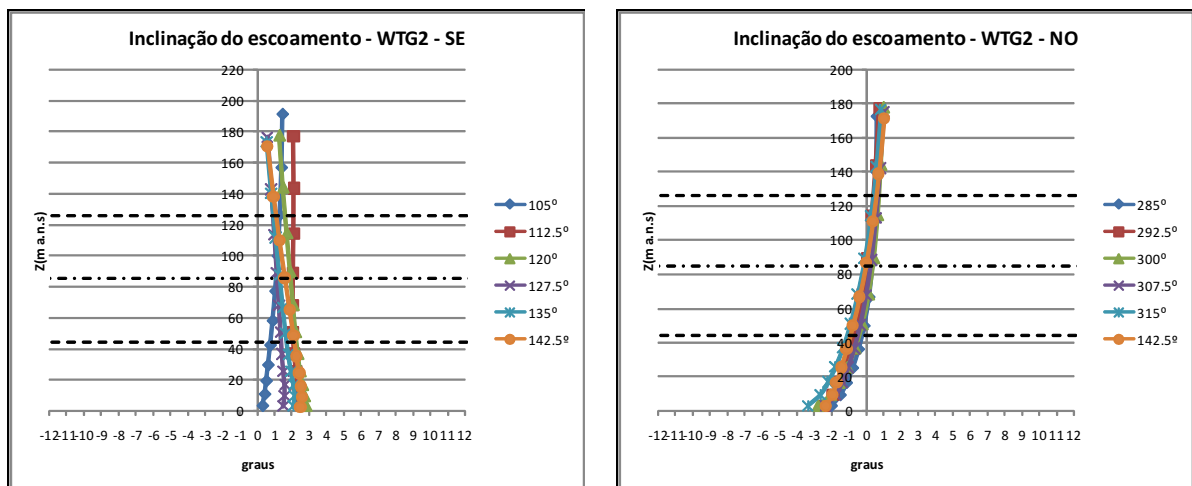


Figura D.28: Perfis da inclinação do escoamento WTG2

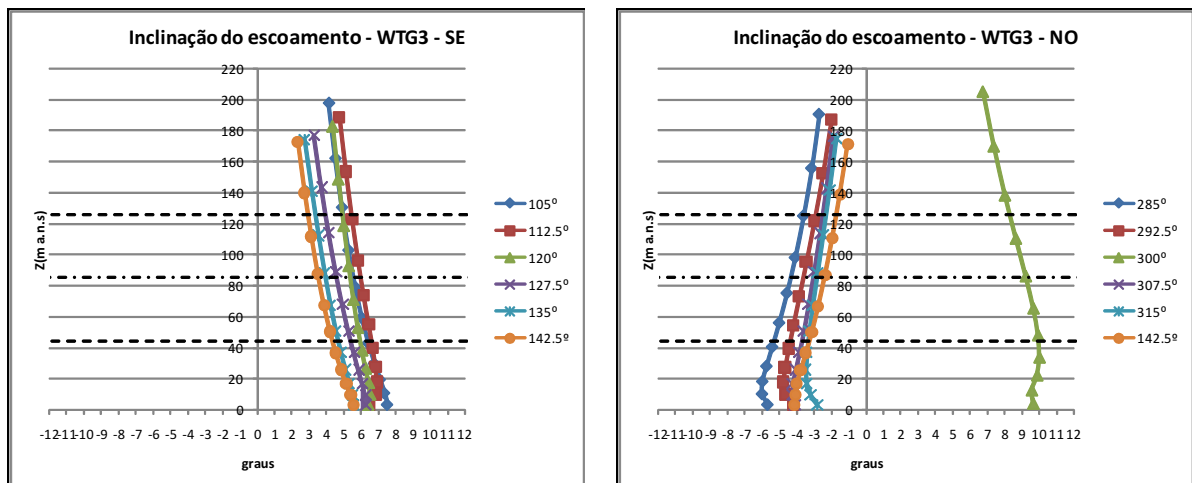


Figura D.29: Perfis da inclinação do escoamento WTG3

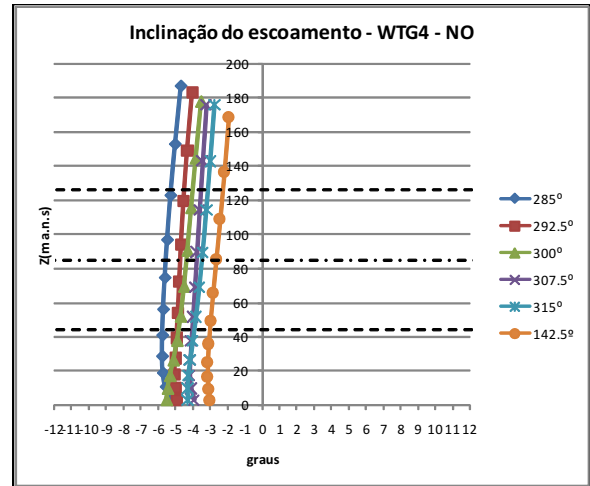
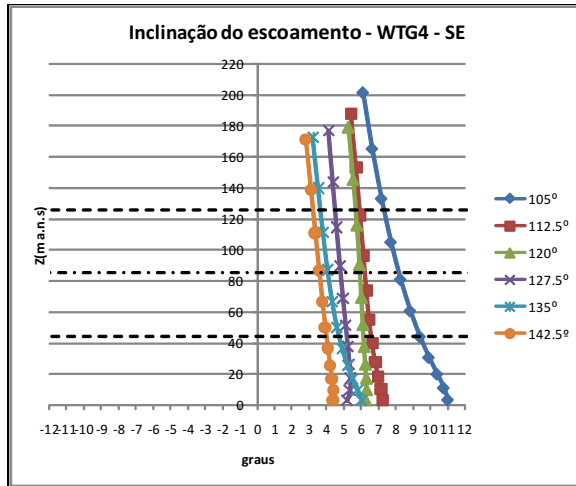


Figura D.30: Perfis da inclinação do escoamento WTG4

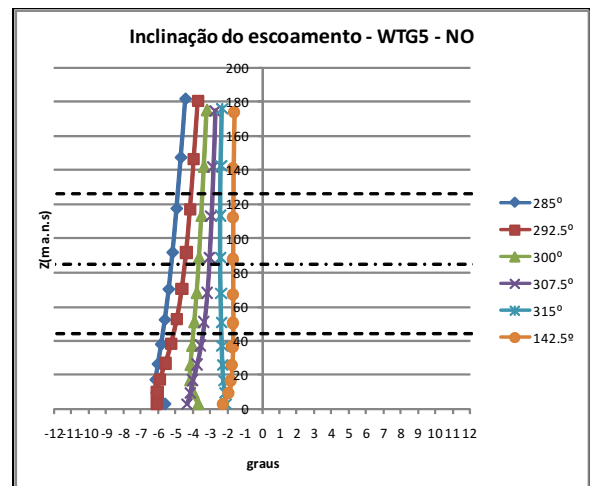
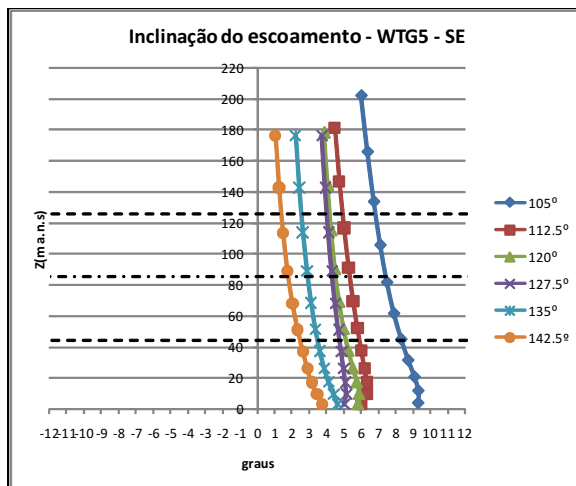


Figura D.31: Perfis da inclinação do escoamento WTG5

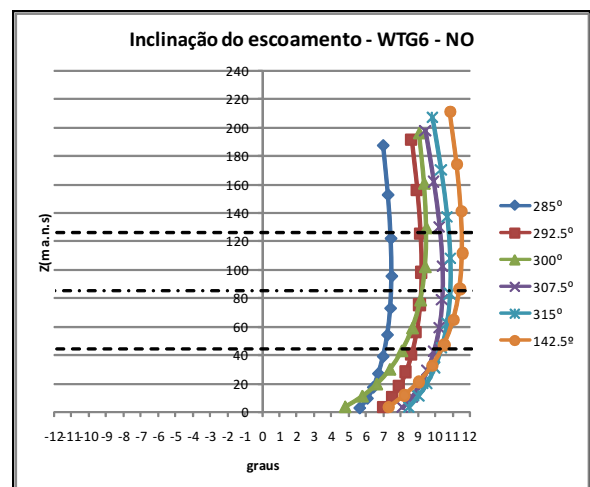
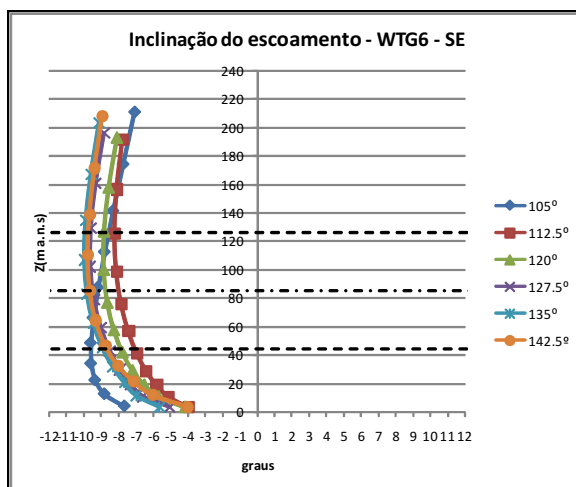


Figura D.32: Perfis da inclinação do escoamento WTG6

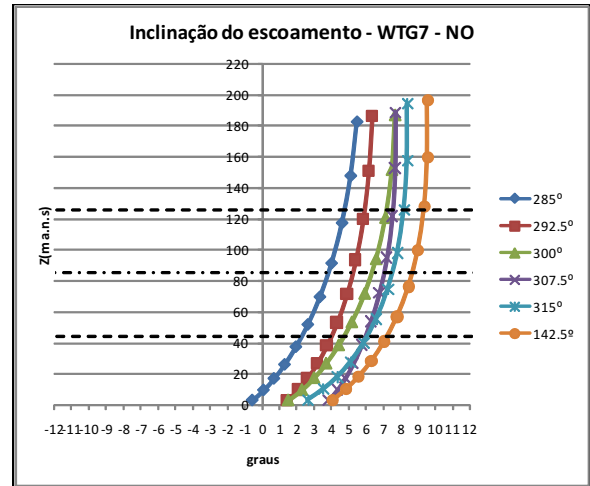
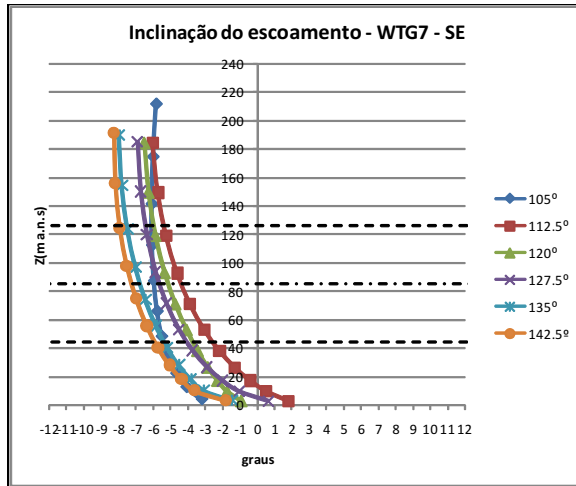


Figura D.33: Perfis da inclinação do escoamento WTG7

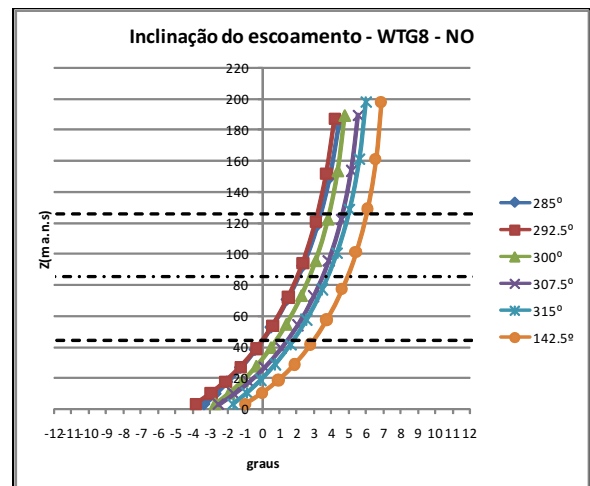
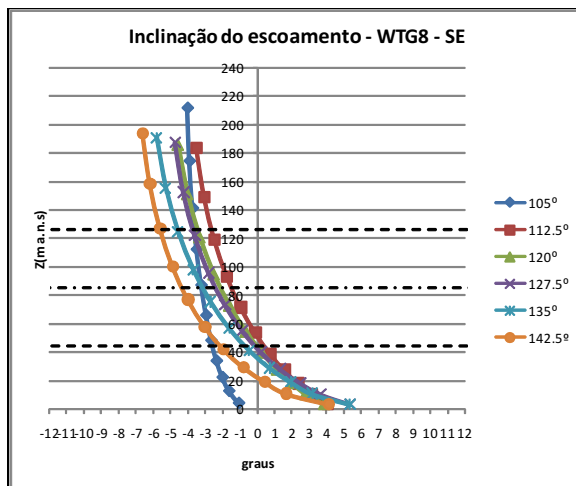


Figura D.34: Perfis da inclinação do escoamento WTG8

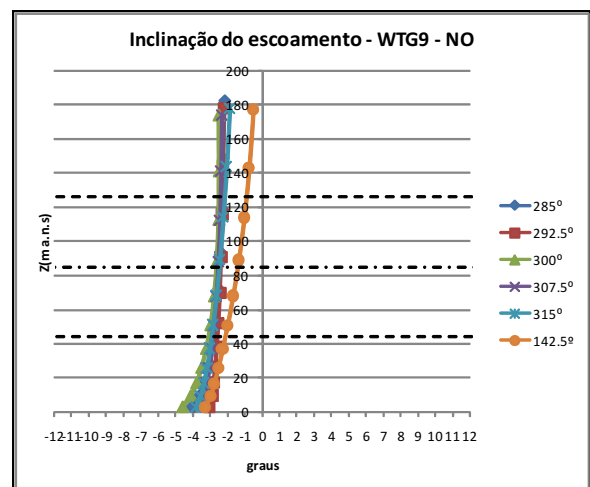
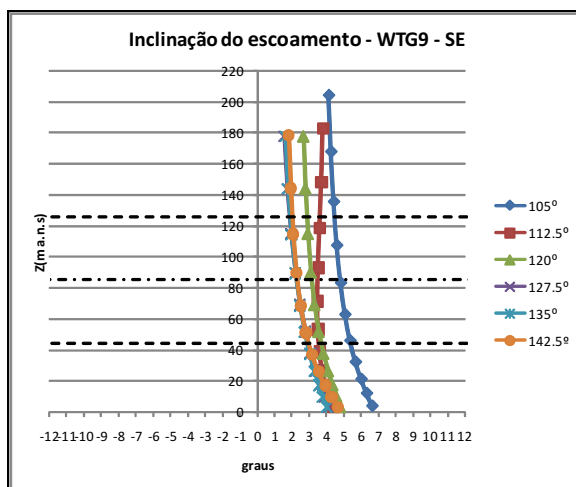


Figura D.35: Perfis da inclinação do escoamento WTG9

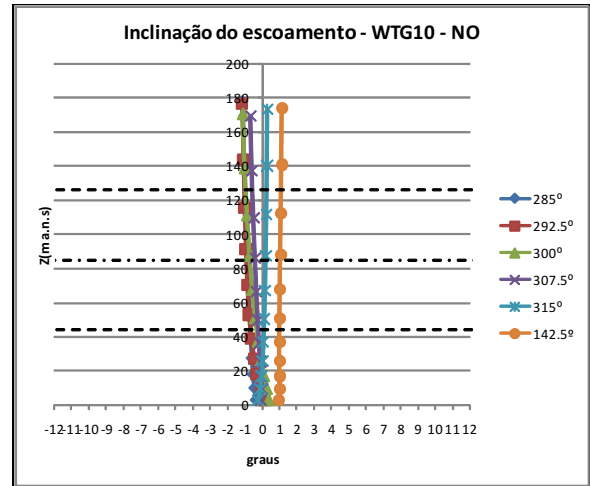
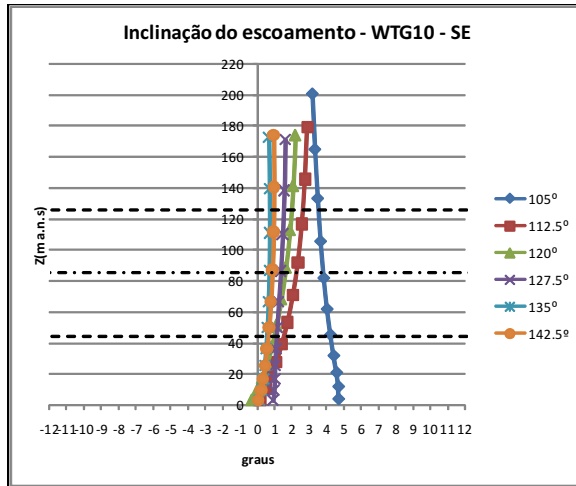


Figura D.36: Perfis da inclinação do escoamento WTG10

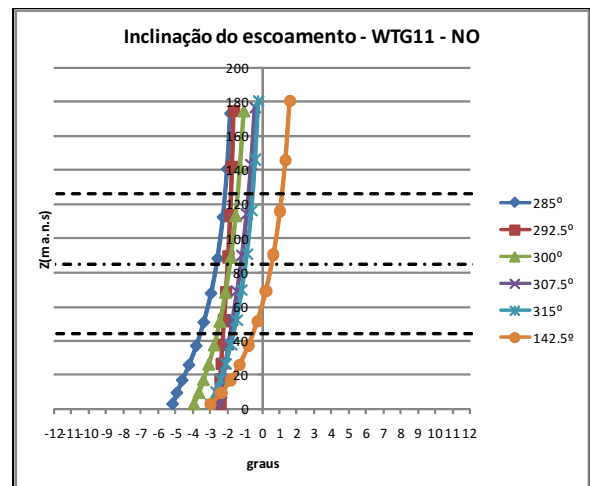
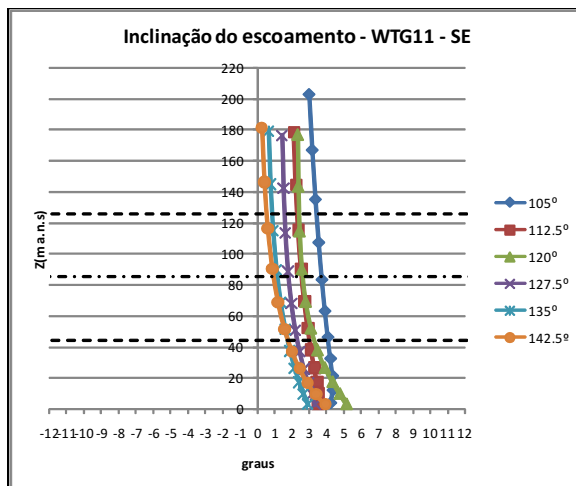


Figura D.37: Perfis da inclinação do escoamento WTG11

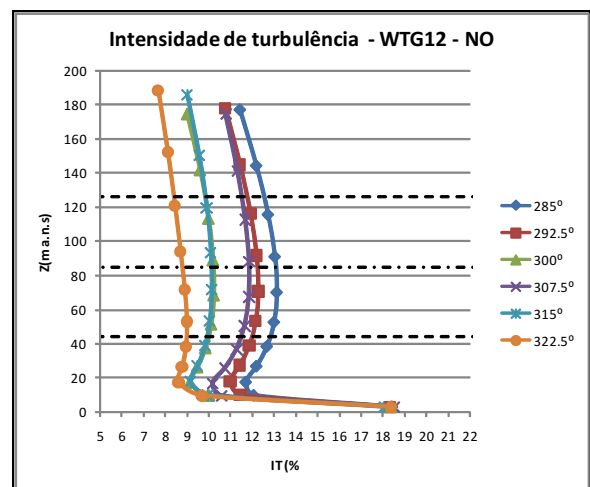
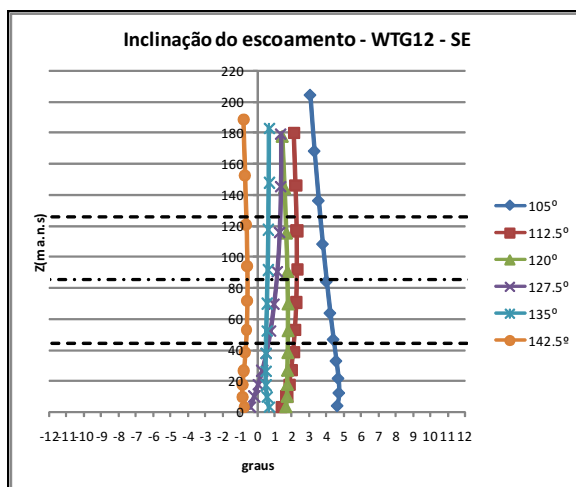


Figura D.38: Perfis da inclinação do escoamento WTG12

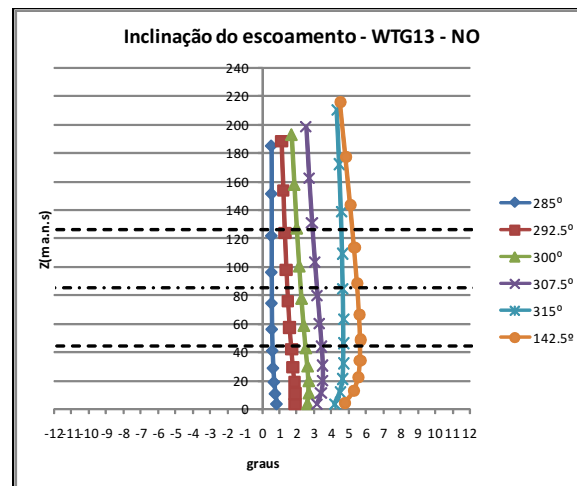
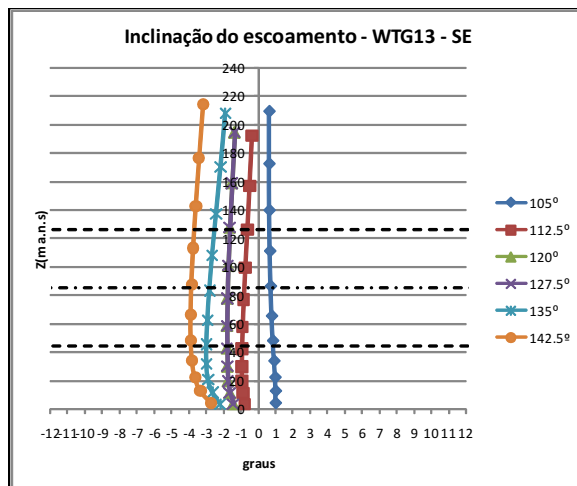


Figura D.39: Perfis da inclinação do escoamento WTG13

## Shear factor

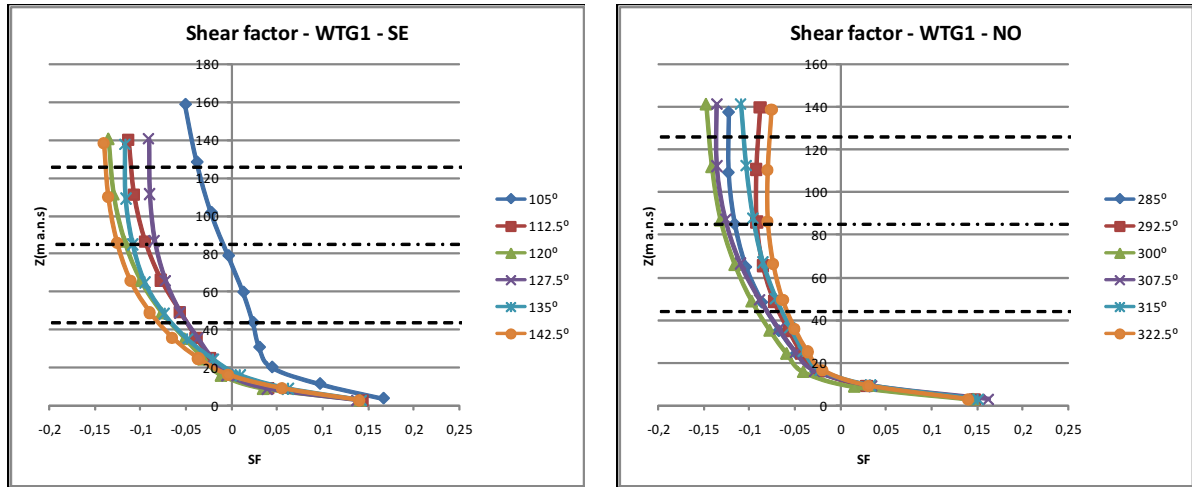


Figura D.40: Perfis do shear factor WTG1

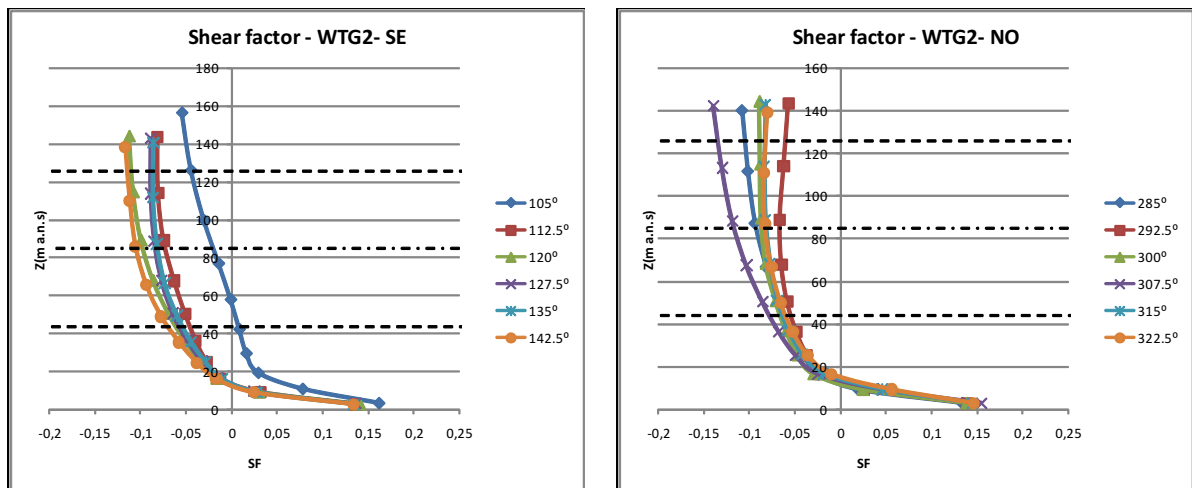


Figura D.41: Perfis do shear factor WTG2

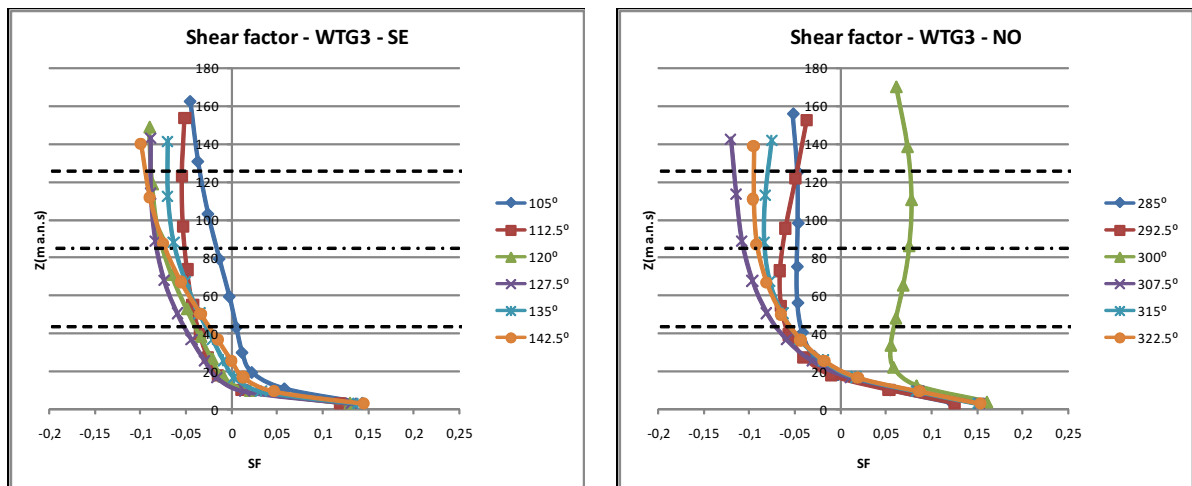


Figura D.42: Perfis do shear factor WTG3

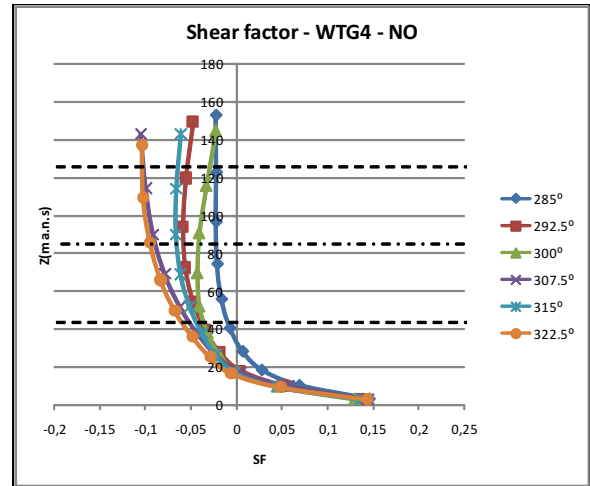
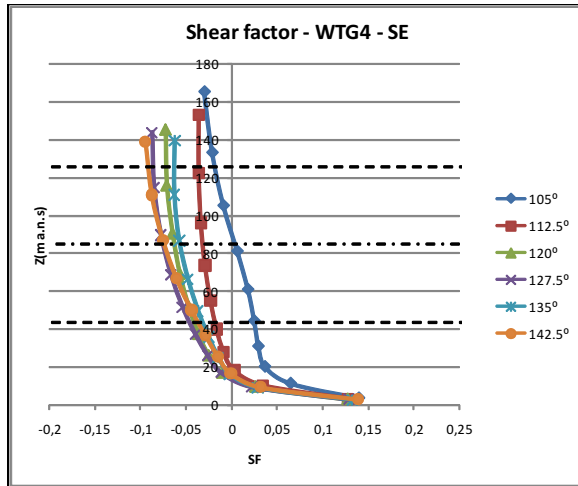


Figura D.43: Perfis do shear factor WTG4

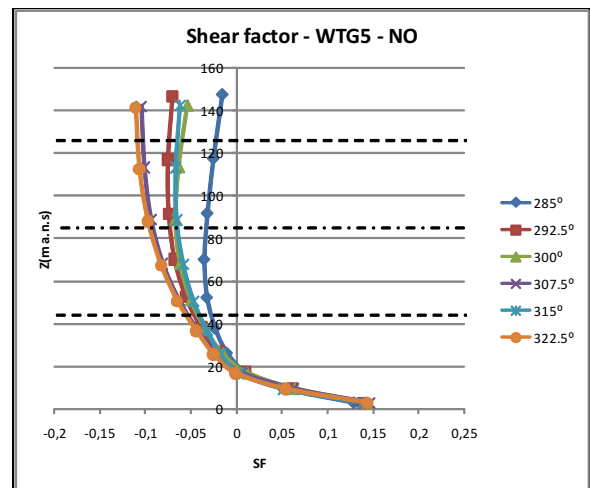
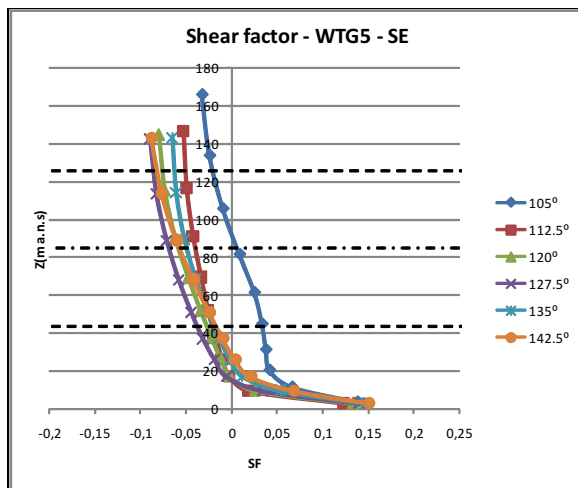


Figura D.44: Perfis do shear factor WTG5

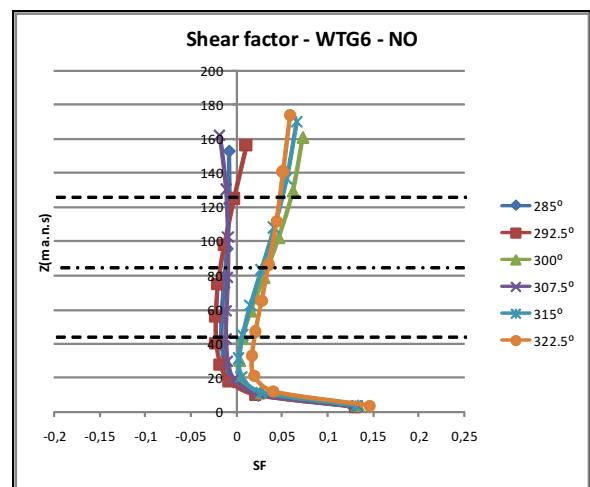
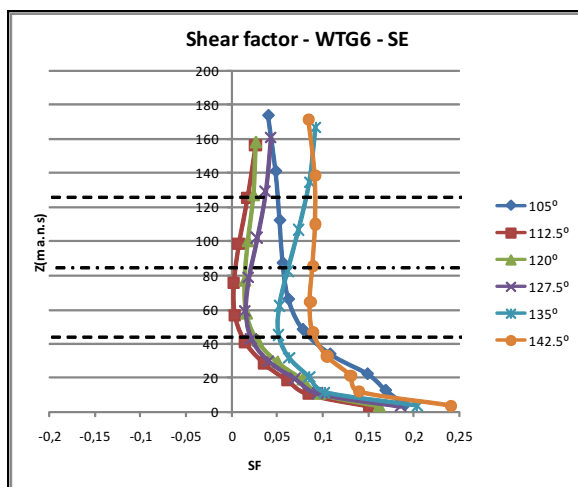


Figura D.45: Perfis do shear factor WTG6

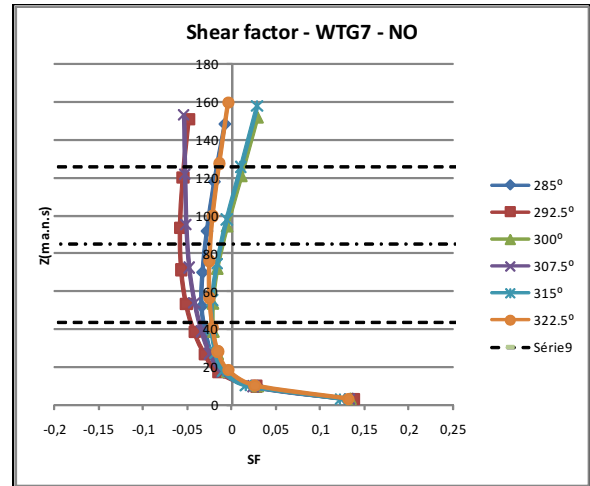
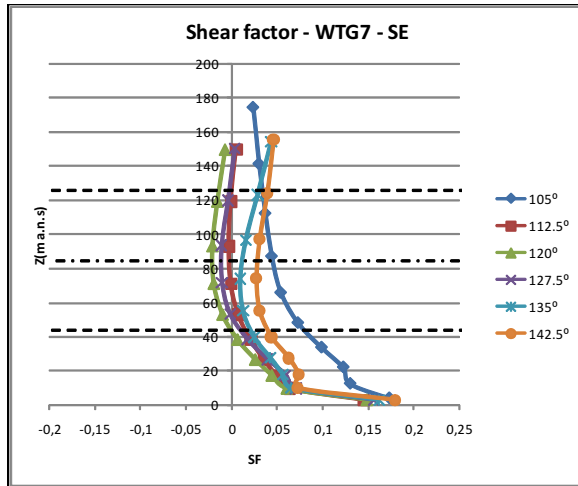


Figura D.46: Perfis do shear factor WTG7

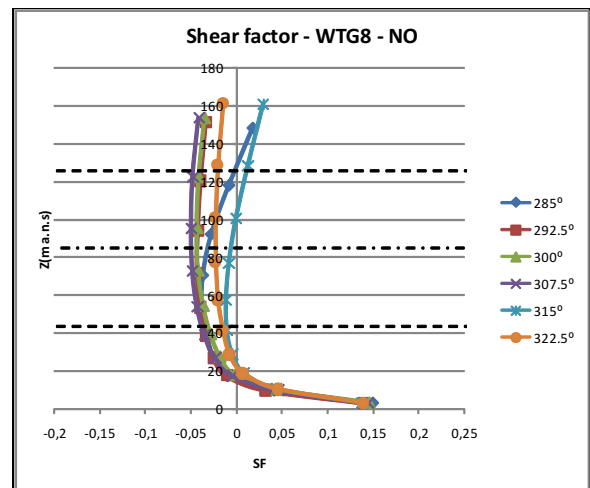
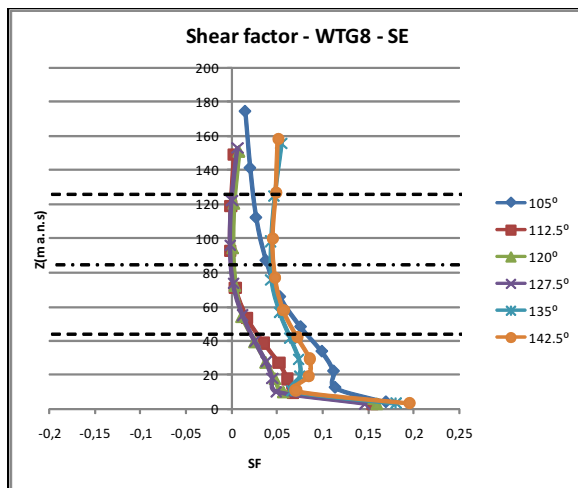


Figura D.47: Perfis do shear factor WTG8

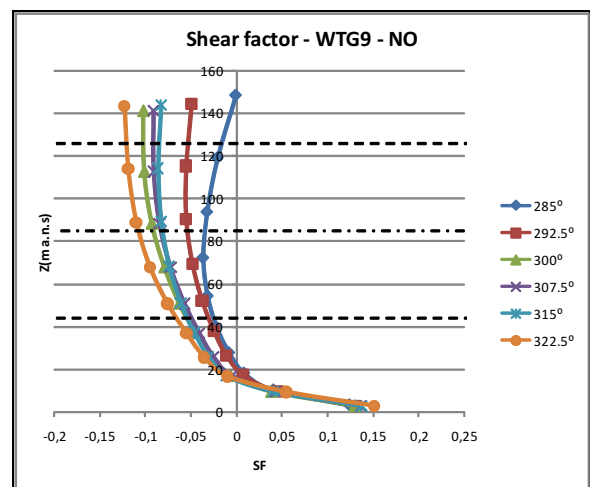
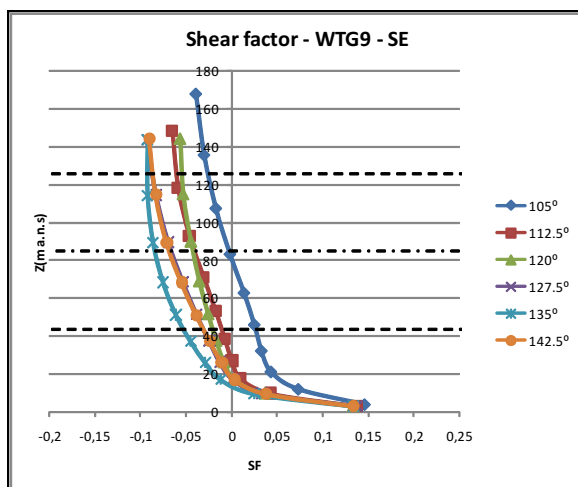


Figura D.48: Perfis do shear factor WTG9

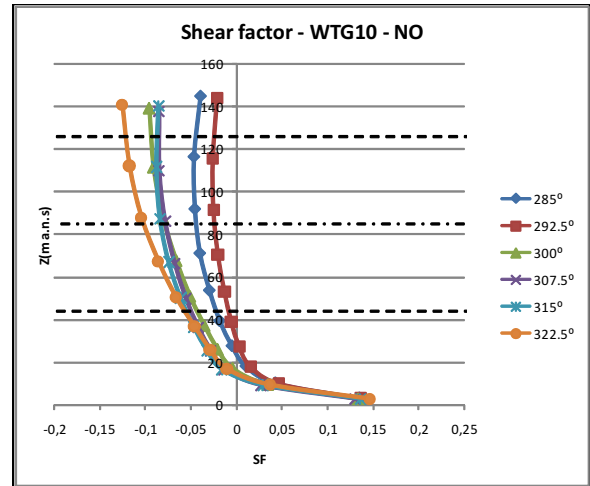
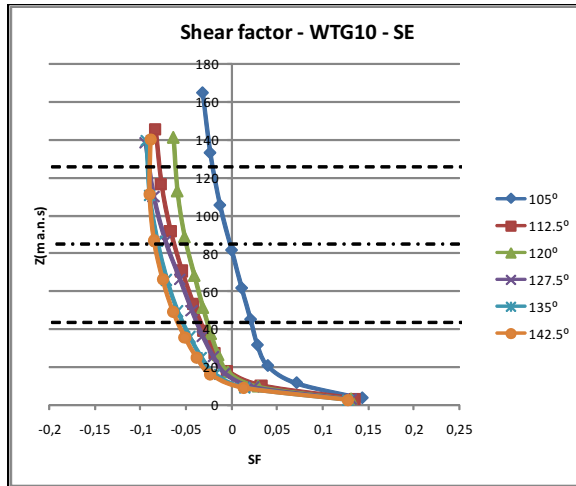


Figura D.49: Perfis do shear factor WTG10

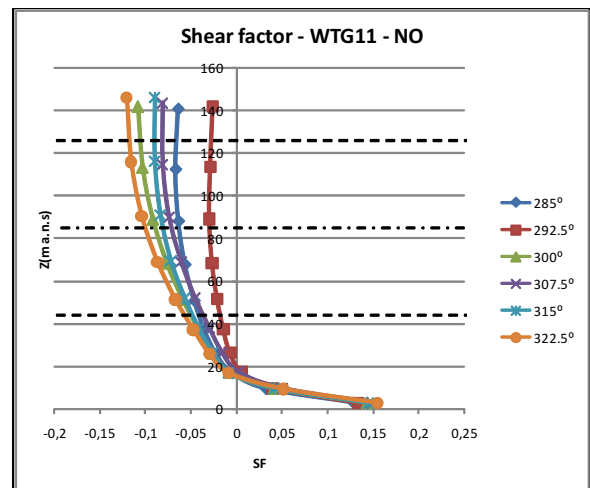
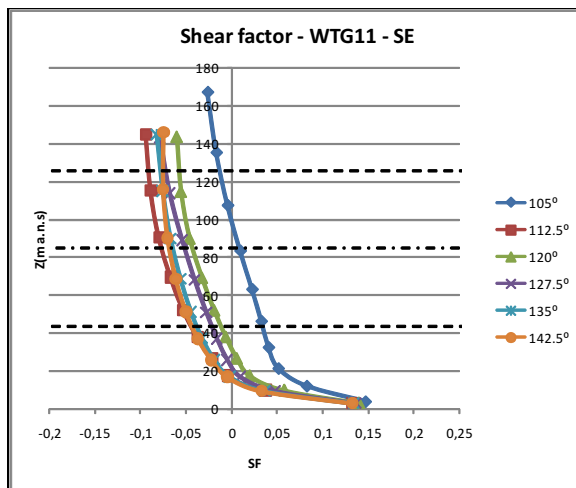


Figura D.50: Perfis do shear factor WTG11

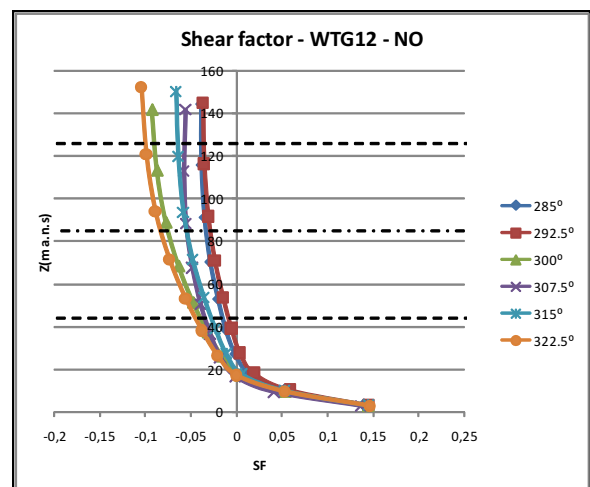
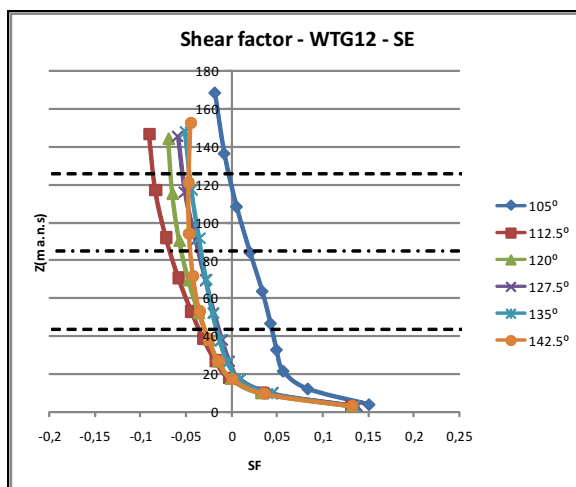


Figura D.51: Perfis do shear factor WTG12

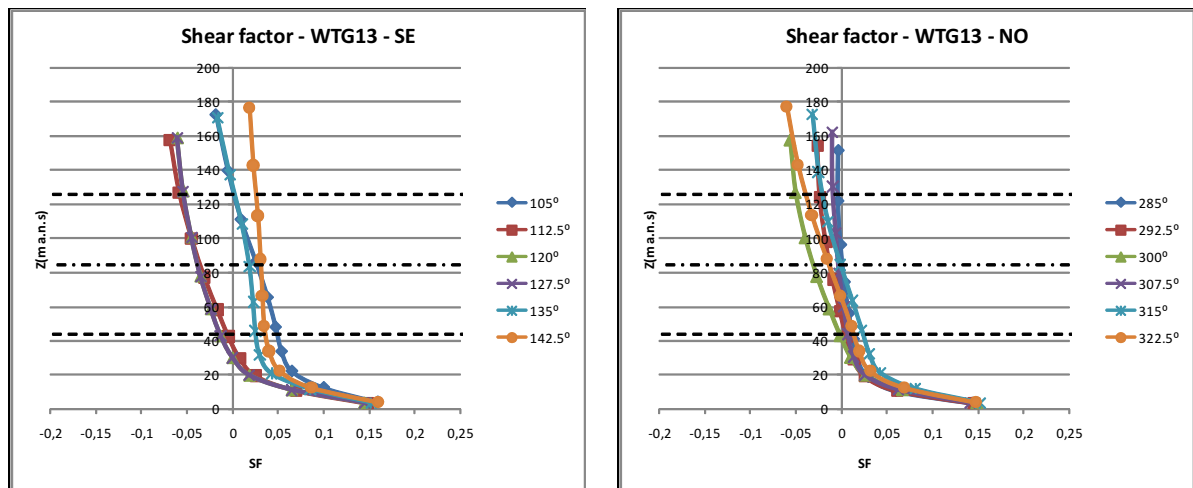


Figura D.52: Perfis do shear factor WTG13

## Características do vento na zona de colocação dos aerogeradores - resultados numéricos tabelados

Tabela D.1: Características do vento na zona dos aerogeradores -105°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	9.0	0.4	7.5	0.02
T2	9.2	0.8	8.6	0.01
T3	9.0	6.4	9.7	0.00
T4	8.5	9.4	10.1	0.02
T5	8.3	8.4	9.6	0.03
T6	7.5	-9.6	10.4	0.09
T7	7.5	-5.4	10.2	0.08
T8	7.5	-2.6	11.4	0.08
T9	8.4	5.4	9.7	0.03
T10	8.3	4.2	9.9	0.02
T11	8.1	4.1	9.6	0.03
T12	7.9	4.4	9.6	0.04
T13	7.8	0.9	9.1	0.05
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	9.1	0.5	7.4	0.0
T2	9.2	1.1	8.3	-0.02
T3	9.0	5.5	9.0	-0.02
T4	8.6	8.2	9.3	0.00
T5	8.5	7.4	8.5	0.01
T6	7.9	-9.2	10.1	0.06
T7	7.8	-5.9	9.4	0.04
T8	7.9	-3.2	10.6	0.04
T9	8.5	4.8	8.9	0.00
T10	8.4	3.8	9.3	0.00
T11	8.3	3.7	9.1	0.01
T12	8.1	4.0	9.0	0.02
T13	8.1	0.7	8.7	0.03
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	9.1	0.7	7.4	-0.04
T2	9.1	1.3	7.9	-0.04
T3	8.9	4.9	8.3	-0.04
T4	8.6	7.3	8.5	-0.02
T5	8.5	6.8	7.9	-0.02
T6	8.0	-8.6	9.7	0.05
T7	8.0	-6.1	8.9	0.03
T8	8.0	-3.6	10.1	0.02
T9	8.5	4.5	8.2	-0.03
T10	8.4	3.5	8.6	-0.02
T11	8.3	3.4	8.6	-0.01
T12	8.2	3.6	8.5	0.00
T13	8.1	0.6	8.3	0.0

Tabela D.2: Características do vento na zona dos aerogeradores -112.5°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.3	1.3	8.9	-0.05
T2	9.6	2.1	10.1	-0.05
T3	9.1	6.6	11.7	-0.04
T4	8.7	6.6	12.2	-0.02
T5	8.9	5.9	13.1	-0.02
T6	7.8	-7.1	14.0	0.01
T7	7.9	-2.6	14.8	0.01
T8	7.9	0.4	14.1	0.03
T9	9.0	3.5	10.5	-0.01
T10	9.5	1.6	11.0	0.04
T11	9.7	3.0	11.1	-0.05
T12	9.6	2.1	11.3	-0.04
T13	9.2	-0.9	9.8	-0.01
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.9	1.0	8.9	-0.1
T2	9.3	2.1	9.5	-0.07
T3	8.9	6.0	10.8	-0.05
T4	8.6	6.2	11.7	-0.03
T5	8.8	5.3	12.0	-0.04
T6	7.8	-8.1	13.9	0.00
T7	8.0	-4.5	14.5	-0.01
T8	7.9	-1.6	13.7	-0.01
T9	8.9	3.5	9.7	-0.04
T10	9.2	2.2	10.5	-0.06
T11	9.4	2.6	10.9	-0.08
T12	9.3	2.3	10.9	-0.07
T13	9.1	-0.8	9.7	-0.04
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.5	0.7	9.0	-0.12
T2	9.0	2.1	9.1	-0.08
T3	8.7	5.4	9.9	-0.05
T4	8.4	5.9	10.7	-0.04
T5	8.6	4.9	10.6	-0.05
T6	7.8	-8.3	12.9	0.02
T7	8.0	-5.4	13.3	0.00
T8	7.9	-2.7	12.7	0.00
T9	8.8	3.6	8.9	-0.06
T10	9.0	2.7	9.5	-0.08
T11	9.1	2.3	10.1	-0.09
T12	9.1	2.3	10.0	-0.09
T13	8.9	-0.6	9.2	-0.1

Tabela D.3: Características do vento na zona dos aerogeradores -120°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.3	1.7	8.5	-0.07
T2	10.5	2.3	9.6	-0.06
T3	9.8	6.0	10.8	-0.04
T4	9.3	6.1	11.3	-0.04
T5	9.1	5.1	12.1	-0.03
T6	7.7	-7.9	14.4	0.02
T7	7.8	-3.7	15.0	0.00
T8	7.3	-0.1	16.0	0.02
T9	8.6	3.7	11.5	-0.02
T10	8.8	1.0	11.7	-0.03
T11	8.7	3.2	10.3	-0.01
T12	9.1	1.8	11.7	-0.03
T13	9.0	-1.8	10.6	-0.02
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.7	0.9	8.7	-0.12
T2	10.1	1.9	9.4	-0.10
T3	9.5	5.4	10.1	-0.08
T4	9.0	5.9	10.9	-0.06
T5	8.9	4.5	11.5	-0.06
T6	7.8	-8.8	14.1	0.01
T7	7.8	-5.2	14.9	-0.03
T8	7.3	-2.3	15.7	0.00
T9	8.5	3.1	11.3	-0.04
T10	8.6	1.6	11.3	-0.05
T11	8.6	2.6	10.2	-0.04
T12	8.9	1.7	11.4	-0.06
T13	8.9	-1.8	10.7	-0.04
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.2	0.2	8.5	-0.14
T2	9.7	1.6	9.0	-0.11
T3	9.2	4.9	9.5	-0.09
T4	8.8	5.7	10.3	-0.07
T5	8.7	4.2	10.7	-0.08
T6	7.9	-8.8	13.0	0.02
T7	7.7	-6.0	13.8	-0.02
T8	7.3	-3.5	14.6	0.00
T9	8.3	2.8	10.8	-0.06
T10	8.4	2.0	10.5	-0.06
T11	8.4	2.4	9.7	-0.06
T12	8.7	1.6	10.5	-0.07
T13	8.7	-1.6	10.1	-0.05

Tabela D.4: Características do vento na zona dos aerogeradores -127.5°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.3	1.4	8.7	-0.05
T2	10.2	1.4	10.3	-0.06
T3	10.1	5.4	11.1	-0.05
T4	9.9	5.2	11.1	-0.05
T5	9.8	4.8	10.9	-0.04
T6	7.7	-8.6	15.6	0.02
T7	7.9	-4.1	14.9	0.01
T8	7.6	-0.2	16.3	0.02
T9	9.6	2.9	11.9	-0.03
T10	9.4	1.1	11.7	-0.04
T11	9.0	2.3	10.8	-0.02
T12	8.6	0.6	10.1	-0.02
T13	9.0	-1.8	10.6	-0.02
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.9	0.7	9.1	-0.08
T2	9.8	1.1	9.8	-0.08
T3	9.7	4.6	10.5	-0.08
T4	9.5	4.8	10.6	-0.08
T5	9.5	4.3	10.8	-0.07
T6	7.8	-9.6	14.8	0.02
T7	7.9	-5.8	14.7	-0.02
T8	7.6	-2.5	15.6	-0.01
T9	9.3	2.3	11.5	-0.07
T10	9.1	1.3	11.0	-0.07
T11	8.8	1.8	10.1	-0.05
T12	8.5	1.1	9.4	-0.04
T13	8.9	-1.8	10.7	-0.04
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.5	0.2	9.1	-0.09
T2	9.5	0.9	9.2	-0.09
T3	9.4	3.9	9.6	-0.09
T4	9.2	4.5	9.9	-0.09
T5	9.2	4.0	10.4	-0.09
T6	7.8	-9.6	13.3	0.04
T7	7.8	-6.5	13.8	0.00
T8	7.6	-3.7	14.4	0.00
T9	9.1	1.8	10.7	-0.09
T10	8.9	1.5	10.1	-0.09
T11	8.7	1.5	9.3	-0.08
T12	8.4	1.3	8.6	-0.06
T13	8.7	-1.6	10.1	-0.05

Tabela D.5: Características do vento na zona dos aerogeradores - 135°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.3	1.0	8.8	-0.07
T2	10.4	1.7	10.3	-0.05
T3	9.8	4.7	11.1	-0.03
T4	9.5	4.7	11.5	-0.03
T5	9.3	3.4	11.2	-0.02
T6	7.0	-8.9	16.7	0.05
T7	7.2	-5.4	16.6	0.02
T8	6.7	-0.7	18.1	0.06
T9	9.7	2.9	12.2	-0.06
T10	9.7	0.6	13.1	-0.06
T11	9.5	1.7	12.2	-0.04
T12	8.8	0.5	11.6	-0.02
T13	8.0	-3.0	10.6	0.02
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.7	0.2	9.0	-0.11
T2	10.0	1.3	9.9	-0.08
T3	9.5	3.9	10.7	-0.06
T4	9.2	4.1	11.0	-0.06
T5	9.1	2.9	11.3	-0.05
T6	7.2	-9.9	15.6	0.06
T7	7.2	-6.8	16.1	0.01
T8	6.9	-3.3	17.0	0.04
T9	9.3	2.3	12.2	-0.08
T10	9.4	0.7	12.6	-0.08
T11	9.2	1.1	11.8	-0.06
T12	8.7	0.6	10.9	-0.03
T13	8.2	-2.8	10.0	0.02
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.2	-0.4	8.5	-0.12
T2	9.7	0.9	9.2	-0.09
T3	9.3	3.3	10.0	-0.07
T4	9.0	3.6	10.4	-0.07
T5	8.9	2.5	11.0	-0.07
T6	7.4	-9.9	14.1	0.08
T7	7.3	-7.5	14.9	0.03
T8	7.0	-4.6	15.7	0.05
T9	9.0	1.9	11.6	-0.10
T10	9.1	0.7	11.5	-0.10
T11	9.0	0.8	10.8	-0.08
T12	8.6	0.7	9.8	-0.05
T13	8.2	-2.5	9.0	0.00

Tabela D.6: Características do vento na zona dos aerogeradores - 142.5°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	11.9	0.6	8.7	-0.08
T2	11.2	2.1	9.6	-0.07
T3	10.4	4.4	10.2	-0.03
T4	10.3	4.0	10.4	-0.04
T5	10.0	2.4	10.2	-0.02
T6	7.0	-8.6	15.9	0.09
T7	7.3	-6.0	16.3	0.04
T8	6.9	-2.1	17.0	0.07
T9	9.7	2.9	11.3	-0.03
T10	9.7	0.6	12.6	-0.06
T11	9.3	1.7	13.0	-0.05
T12	8.7	-0.7	13.3	-0.03
T13	7.4	-3.9	13.6	0.04
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	11.2	-0.1	8.5	-0.13
T2	10.6	1.6	9.0	-0.11
T3	10.2	3.5	9.5	-0.07
T4	10.0	3.6	9.6	-0.07
T5	9.8	1.8	9.8	-0.06
T6	7.4	-9.7	14.4	0.09
T7	7.5	-7.3	15.0	0.03
T8	7.2	-4.4	15.3	0.04
T9	9.5	2.3	11.0	-0.07
T10	9.3	0.9	12.4	-0.08
T11	9.0	0.9	12.7	-0.07
T12	8.5	-0.6	12.9	-0.05
T13	7.5	-3.9	13.4	0.03
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	10.6	-0.6	7.6	-0.14
T2	10.2	1.1	7.9	-0.12
T3	9.9	2.9	8.5	-0.10
T4	9.7	3.2	8.7	-0.10
T5	9.6	1.3	9.2	-0.08
T6	7.7	-9.7	12.8	0.09
T7	7.6	-8.0	13.3	0.04
T8	7.3	-5.6	13.8	0.05
T9	9.2	2.0	10.5	-0.09
T10	9.0	1.0	11.6	-0.09
T11	8.8	0.5	11.8	-0.08
T12	8.3	-0.6	11.8	-0.05
T13	7.6	-3.7	12.5	0.02

Tabela D.7: Características do vento na zona dos aerogeradores -285°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.7	-0.3	11.4	-0.08
T2	11.1	-0.2	12.1	-0.06
T3	10.1	-5.3	12.3	-0.04
T4	9.2	-5.8	13.9	-0.01
T5	8.9	-5.8	14.4	-0.03
T6	9.0	7.1	13.8	-0.02
T7	8.6	2.3	13.0	-0.03
T8	8.2	0.0	12.2	-0.04
T9	8.1	-2.8	14.2	-0.03
T10	8.7	-0.7	14.3	-0.02
T11	9.1	-3.6	14.1	-0.04
T12	8.4	-1.8	12.9	-0.02
T13	7.9	0.6	11.8	0.01
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.0	0.1	11.4	-0.1
T2	10.6	0.4	11.7	-0.09
T3	9.8	-4.4	12.3	-0.05
T4	9.1	-5.6	13.4	-0.02
T5	8.8	-5.3	14.2	-0.03
T6	8.9	7.5	13.5	-0.01
T7	8.4	3.9	13.2	-0.03
T8	8.0	2.2	12.8	-0.04
T9	8.0	-2.5	14.4	-0.03
T10	8.5	-0.9	14.3	-0.04
T11	8.8	-2.7	14.1	-0.06
T12	8.3	-2.0	13.0	-0.03
T13	7.9	0.5	12.0	0.00
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.5	0.3	10.5	-0.13
T2	10.2	0.6	10.4	-0.11
T3	9.6	-3.6	11.2	-0.05
T4	9.1	-5.3	12.1	-0.02
T5	8.6	-4.9	13.2	-0.02
T6	8.8	7.4	12.1	-0.01
T7	8.3	4.8	12.3	-0.02
T8	7.9	3.4	12.1	0.00
T9	7.9	-2.3	13.9	-0.02
T10	8.3	-1.0	13.5	-0.05
T11	8.6	-2.1	13.4	-0.07
T12	8.2	-2.0	12.6	-0.04
T13	7.9	0.5	11.7	0.0

Tabela D.8: Características do vento na zona dos aerogeradores -292.5°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	10.6	-0.2	11.6	-0.07
T2	9.9	-0.7	11.8	-0.05
T3	9.5	-4.4	11.6	-0.06
T4	9.3	-4.9	13.0	-0.04
T5	9.7	-5.1	12.8	-0.05
T6	8.3	8.7	13.2	-0.02
T7	9.2	4.0	12.4	-0.05
T8	9.0	0.1	13.1	-0.04
T9	9.4	-2.6	13.3	-0.03
T10	8.8	-0.7	14.1	-0.01
T11	8.8	-2.2	13.7	-0.02
T12	8.7	-1.4	12.0	-0.01
T13	8.3	1.7	11.2	0.00
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	10.1	0.4	12.0	-0.1
T2	9.5	0.0	11.8	-0.07
T3	9.1	-3.7	12.0	-0.06
T4	9.1	-4.7	12.9	-0.06
T5	9.4	-4.5	12.9	-0.07
T6	8.2	9.2	13.1	-0.02
T7	8.9	5.3	12.4	-0.06
T8	8.8	2.2	12.9	-0.05
T9	9.1	-2.4	13.5	-0.05
T10	8.7	-0.9	14.2	-0.02
T11	8.6	-2.0	13.7	-0.03
T12	8.6	-1.6	12.2	-0.03
T13	8.3	1.4	11.5	-0.01
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	9.7	0.8	11.5	-0.09
T2	9.3	0.4	10.9	-0.06
T3	8.9	-2.9	11.4	-0.05
T4	8.8	-4.5	11.9	-0.06
T5	9.1	-4.1	12.1	-0.08
T6	8.1	9.1	12.1	0.00
T7	8.7	5.9	11.1	-0.05
T8	8.7	3.2	11.4	-0.04
T9	8.9	-2.3	12.9	-0.06
T10	8.6	-1.0	13.4	-0.03
T11	8.5	-1.8	13.1	-0.03
T12	8.5	-1.7	11.8	-0.04
T13	8.3	1.3	11.3	0.0

Tabela D.9: Características do vento na zona dos aerogeradores -300°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	12.3	0.5	11.6	-0.09
T2	11.3	-0.4	11.9	-0.07
T3	8.1	10.0	13.8	0.1
T4	9.5	-4.8	13.3	0.0
T5	9.6	-4.0	12.7	-0.05
T6	7.9	8.1	14.2	0.01
T7	8.1	4.7	13.5	-0.02
T8	8.7	0.8	12.6	-0.03
T9	10.4	-3.1	12.3	-0.06
T10	10.2	-0.4	12.1	-0.04
T11	10.4	-2.6	11.2	-0.05
T12	10.0	-0.2	10.1	-0.04
T13	9.1	2.5	10.4	0.00
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	11.5	0.9	11.4	-0.1
T2	10.7	0.4	11.8	-0.09
T3	8.5	9.2	13.2	0.1
T4	9.2	-4.4	13.3	-0.04
T5	9.3	-3.7	13.0	-0.07
T6	7.9	9.3	14.0	0.03
T7	8.0	6.4	13.6	-0.01
T8	8.5	2.8	12.7	-0.05
T9	9.9	-2.6	12.4	-0.09
T10	9.9	-0.7	11.9	-0.08
T11	10.0	-1.9	11.1	-0.09
T12	9.7	-0.4	10.2	-0.08
T13	9.0	2.2	10.6	-0.03
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	Tl(%)	Shear factor
T1	10.9	1.1	10.1	-0.15
T2	10.4	0.7	10.6	-0.09
T3	8.7	8.3	12.0	0.1
T4	9.1	-4.0	12.3	-0.03
T5	9.1	-3.5	12.4	-0.06
T6	8.1	9.5	12.9	0.06
T7	8.0	7.2	12.6	0.01
T8	8.3	3.9	11.6	-0.04
T9	9.6	-2.5	11.8	-0.11
T10	9.5	-1.0	11.1	-0.10
T11	9.6	-1.4	10.4	-0.11
T12	9.4	-0.4	9.9	-0.09
T13	8.9	2.0	10.2	-0.1

Tabela D.10: Características do vento na zona dos aerogeradores -307.5°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.9	0.3	11.1	-0.08
T2	11.9	-0.5	10.2	-0.08
T3	11.7	-3.7	10.1	-0.1
T4	11.2	-4.1	11.6	-0.1
T5	11.0	-3.4	11.4	-0.06
T6	9.1	9.9	12.4	-0.01
T7	9.4	5.9	12.5	-0.04
T8	9.0	1.5	12.2	-0.04
T9	10.2	-2.9	12.0	-0.05
T10	9.8	-0.2	12.3	-0.05
T11	9.3	-1.8	11.3	-0.04
T12	8.8	0.1	11.6	-0.04
T13	7.8	3.4	11.2	0.01
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.2	0.8	11.3	-0.1
T2	11.2	0.2	10.2	-0.12
T3	11.1	-3.1	10.3	-0.1
T4	10.7	-3.8	11.4	-0.09
T5	10.5	-3.1	11.6	-0.09
T6	9.0	10.4	11.4	-0.01
T7	9.1	7.1	11.8	-0.05
T8	8.7	3.6	12.2	-0.05
T9	9.8	-2.6	12.2	-0.08
T10	9.4	-0.4	12.3	-0.08
T11	9.0	-1.2	11.7	-0.07
T12	8.5	0.0	11.8	-0.05
T13	7.8	3.2	11.7	0.00
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.6	1.1	10.5	-0.14
T2	10.7	0.7	9.3	-0.14
T3	10.6	-2.5	9.3	-0.1
T4	10.3	-3.6	10.1	-0.10
T5	10.1	-2.9	10.9	-0.11
T6	9.0	10.2	9.7	-0.01
T7	9.0	7.6	10.0	-0.05
T8	8.5	4.7	10.9	-0.05
T9	9.5	-2.4	11.6	-0.09
T10	9.1	-0.6	11.7	-0.09
T11	8.8	-0.8	11.5	-0.08
T12	8.3	-0.1	11.6	-0.06
T13	7.8	2.9	11.6	0.0

Tabela D.11: Características do vento na zona dos aerogeradores -315°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.5	-0.1	11.4	-0.06
T2	10.8	-1.1	10.7	-0.06
T3	10.3	-3.4	11.1	-0.1
T4	9.7	-3.9	12.8	0.0
T5	9.3	-2.4	12.6	-0.04
T6	7.5	10.3	14.1	0.01
T7	7.6	6.1	15.1	-0.02
T8	7.1	1.8	14.7	-0.01
T9	9.3	-2.9	11.9	-0.06
T10	9.3	0.1	11.4	-0.06
T11	9.5	-1.6	11.2	-0.05
T12	9.1	0.2	10.0	-0.03
T13	8.3	4.7	9.0	0.02
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	11.0	0.6	11.4	-0.1
T2	10.3	-0.2	10.8	-0.08
T3	9.8	-2.9	11.6	-0.1
T4	9.3	-3.5	13.1	-0.07
T5	9.0	-2.4	13.1	-0.07
T6	7.6	10.8	13.7	0.03
T7	7.5	7.6	14.9	-0.01
T8	7.1	3.8	15.1	-0.01
T9	8.9	-2.5	12.4	-0.08
T10	8.9	0.2	11.6	-0.08
T11	9.1	-1.0	11.3	-0.08
T12	8.8	0.5	10.1	-0.05
T13	8.3	4.6	8.9	0.00
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	10.6	0.9	10.2	-0.11
T2	10.0	0.4	9.9	-0.08
T3	9.5	-2.3	10.9	-0.1
T4	9.1	-3.1	12.3	-0.07
T5	8.8	-2.4	12.7	-0.07
T6	7.7	10.7	12.4	0.05
T7	7.4	8.2	13.6	0.01
T8	7.1	5.0	14.3	0.01
T9	8.6	-2.2	12.1	-0.08
T10	8.6	0.2	11.3	-0.09
T11	8.8	-0.5	10.8	-0.09
T12	8.6	0.8	9.9	-0.07
T13	8.3	4.6	8.8	0.0

Tabela D.12: Características do vento na zona dos aerogeradores -322.5°

h=44 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.8	-0.2	12.3	-0.06
T2	9.8	-0.9	10.5	-0.06
T3	9.9	-3.3	10.3	-0.1
T4	10.1	-3.0	11.0	-0.1
T5	10.2	-1.7	10.6	-0.06
T6	7.0	10.3	13.7	0.02
T7	7.5	7.2	13.4	-0.02
T8	7.5	3.0	12.9	-0.02
T9	10.4	-2.1	8.9	-0.07
T10	10.3	1.0	9.5	-0.06
T11	10.3	-0.5	8.8	-0.06
T12	9.9	1.8	9.0	-0.05
T13	8.8	5.6	10.1	0.01
h=85 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.4	0.6	12.7	-0.1
T2	9.3	0.0	11.0	-0.08
T3	9.5	-2.4	11.0	-0.1
T4	9.6	-2.7	11.4	-0.10
T5	9.8	-1.7	10.9	-0.10
T6	7.1	11.4	13.1	0.03
T7	7.4	8.7	13.0	-0.03
T8	7.4	5.0	12.8	-0.02
T9	9.9	-1.4	9.2	-0.11
T10	9.9	1.0	9.6	-0.10
T11	9.8	0.5	8.8	-0.10
T12	9.5	2.0	8.8	-0.08
T13	8.8	5.5	9.7	-0.01
h=126 m	Vh (m/s)	Inflow angle (deg)	TI(%)	Shear factor
T1	9.1	1.1	11.9	-0.08
T2	9.0	0.6	10.6	-0.08
T3	9.1	-1.7	10.4	-0.1
T4	9.2	-2.3	10.7	-0.11
T5	9.4	-1.7	10.4	-0.11
T6	7.2	11.5	12.0	0.05
T7	7.3	9.3	11.9	-0.01
T8	7.4	6.0	11.8	-0.02
T9	9.5	-0.9	9.0	-0.12
T10	9.5	1.1	9.2	-0.13
T11	9.4	1.2	8.6	-0.12
T12	9.2	2.2	8.4	-0.10
T13	8.8	5.2	9.2	0.0

# Apêndice E

## Malha na direcção vertical

As dimensões da malha referenciadas na tabela são só para os 10 primeiros elementos.

Tabela E.1: Dimensões da malha na direcção z

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
105°	z-dist. max (m)	2	7.7	16.7	29.1	44.8	63.9	86.2	112	141	173.4
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.7	39.5	60.8	86.7	117	151.9	191.3	235.3
112.5°	z-dist. max (m)	2	7.6	16.4	28.5	43.9	62.6	84.6	109.8	138.3	170
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.8	39.6	61	86.9	117	152.3	191.8	235.9
120°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.2	28.3	43.5	62	83.7	108.7	136.9	168.3
	z-dist. min (m)	2.7	10.4	22.6	39.3	60.5	86.2	116	151.1	190.3	234
127.5°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.2	28.2	43.5	62	83.7	108.7	136.8	168.3
	z-dist. min (m)	2.7	10.3	22.5	39.1	60.1	85.7	116	150.3	189.2	232.7
135°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.3	28.3	43.6	62.1	83.9	108.9	137.2	168.7
	z-dist. min (m)	2.7	10.4	22.5	39.1	60.2	85.8	116	150.4	189.4	232.9
142.5°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.3	28.3	43.6	62.1	83.8	108.9	137.1	168.6
	z-dist. min (m)	2.7	10.3	22.4	39	60.1	85.6	116	150.1	189.1	232.5
285°	z-dist. max (m)	1.9	7.5	16.2	28.2	43.4	61.8	83.5	108.4	136.6	167.9
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.8	39.6	60.9	86.8	117	152.2	191.7	235.8
292.5°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.2	28.2	43.5	62	83.7	108.6	136.8	168.3
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.7	39.5	60.8	86.7	117	151.9	191.4	235.3
300°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.2	28.2	43.5	61.9	83.7	108.6	136.8	168.2
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.7	39.5	60.8	86.6	117	151.8	191.2	235.2
307.5°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.3	28.3	43.5	62	83.7	108.7	136.9	168.4
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.7	39.5	60.8	86.7	117	152	191.4	235.4
315°	z-dist. max (m)	2	7.6	16.6	28.9	44.5	63.4	85.6	111.1	139.9	172.1
	z-dist. min (m)	2.8	10.6	23.1	40.1	61.8	88	119	154.3	194.4	239
322.5°	z-dist. max (m)	2	7.5	16.4	28.5	43.9	62.5	84.5	109.7	138.1	169.8
	z-dist. min (m)	2.7	10.5	22.8	39.7	61.1	87.1	118	152.7	192.3	236.5

## Apêndice F

### Diferença de alturas - terreno original versus terreno suavizado

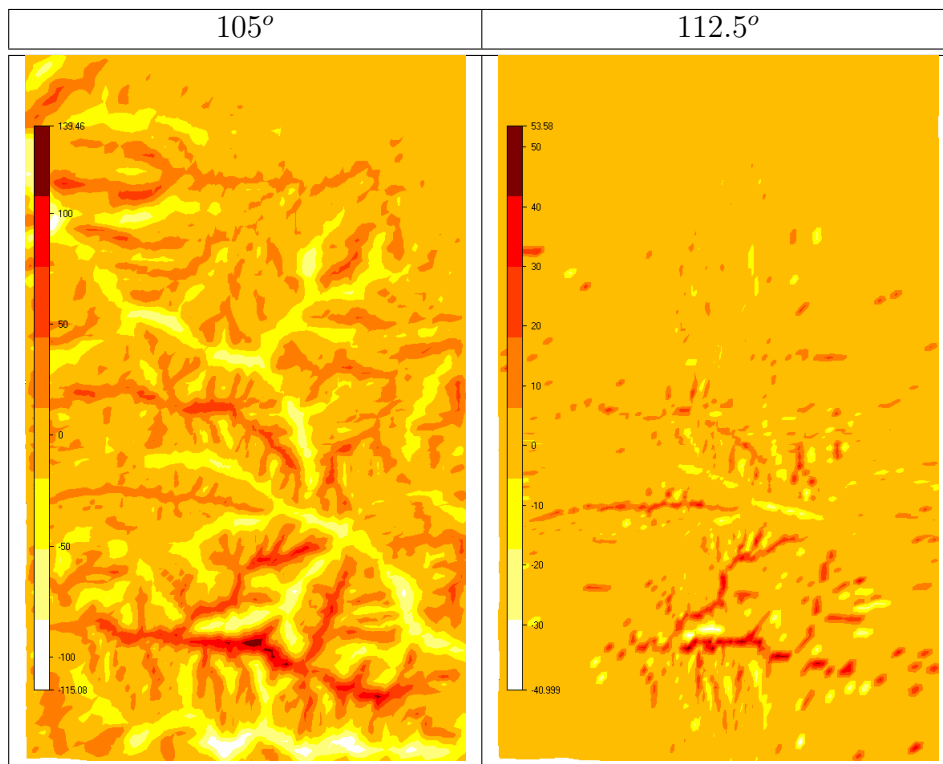


Figura F.1:  $\Delta h$  - 105°, 112.5°

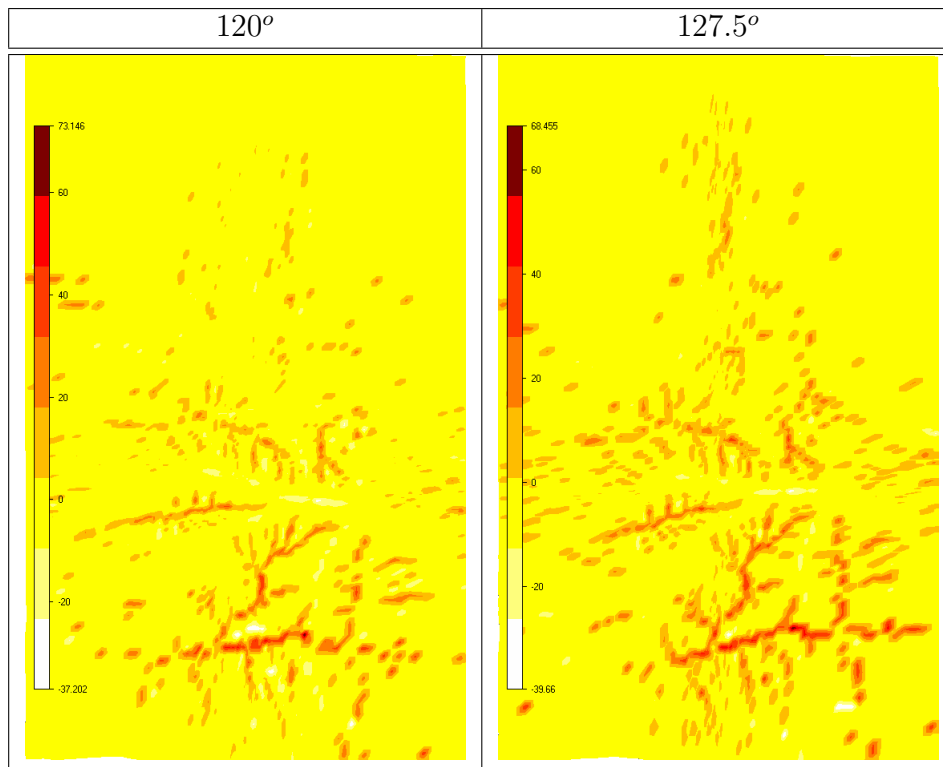


Figura F.2:  $\Delta h$  -120°, 127.5°

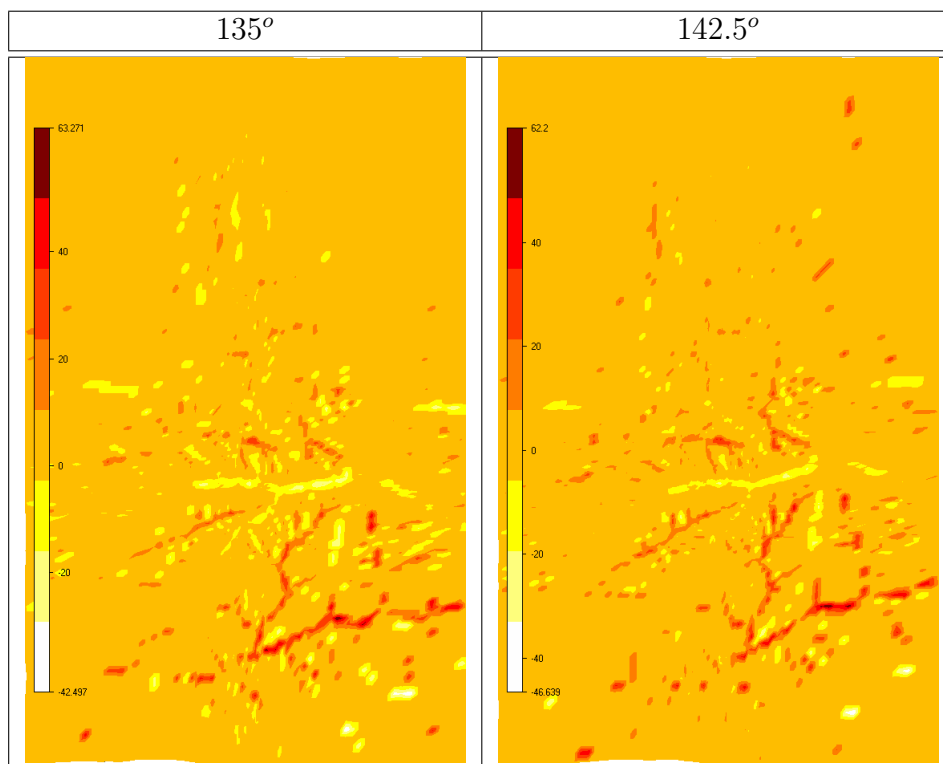


Figura F.3:  $\Delta h$  -135°, 142.5°

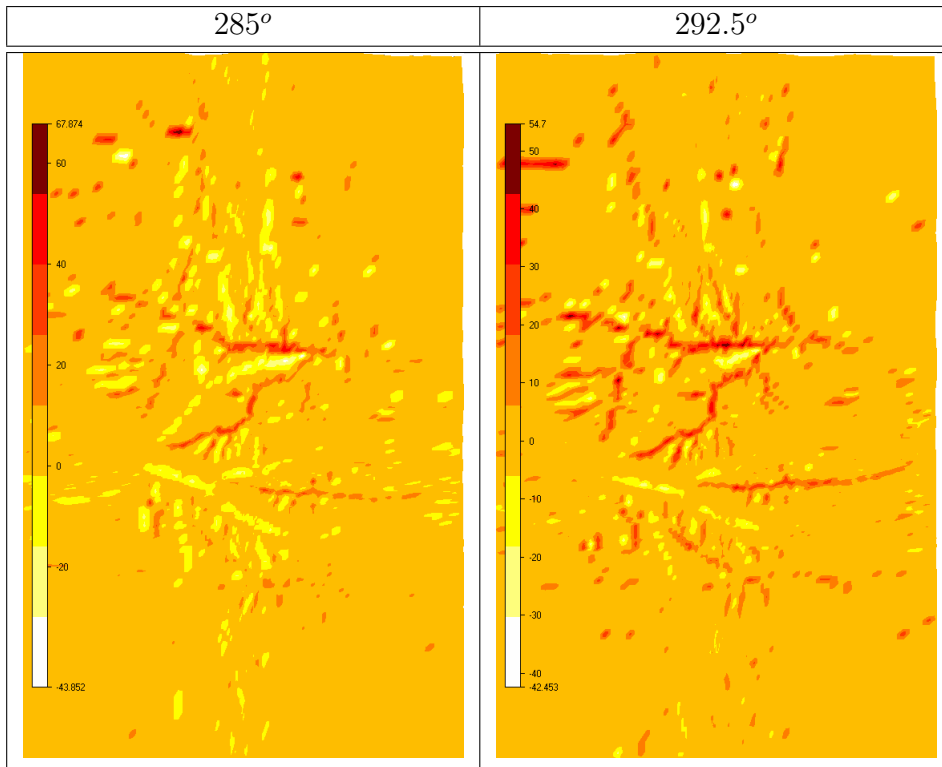


Figura F.4:  $\Delta h$  -285°, 292.5°

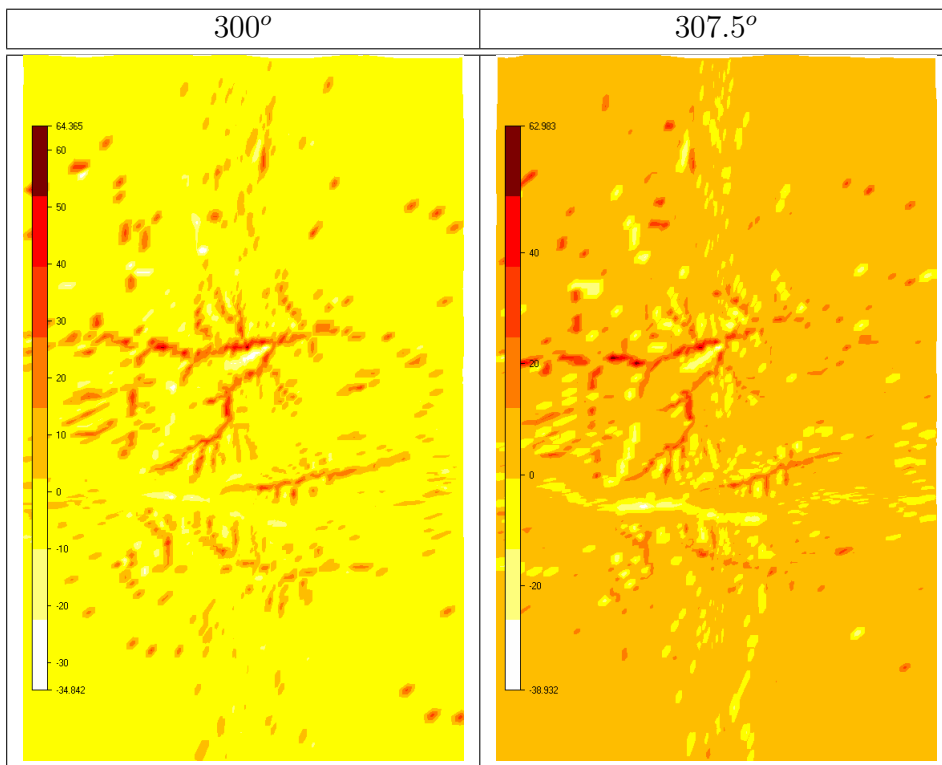


Figura F.5:  $\Delta h$  -300°, 307.5°

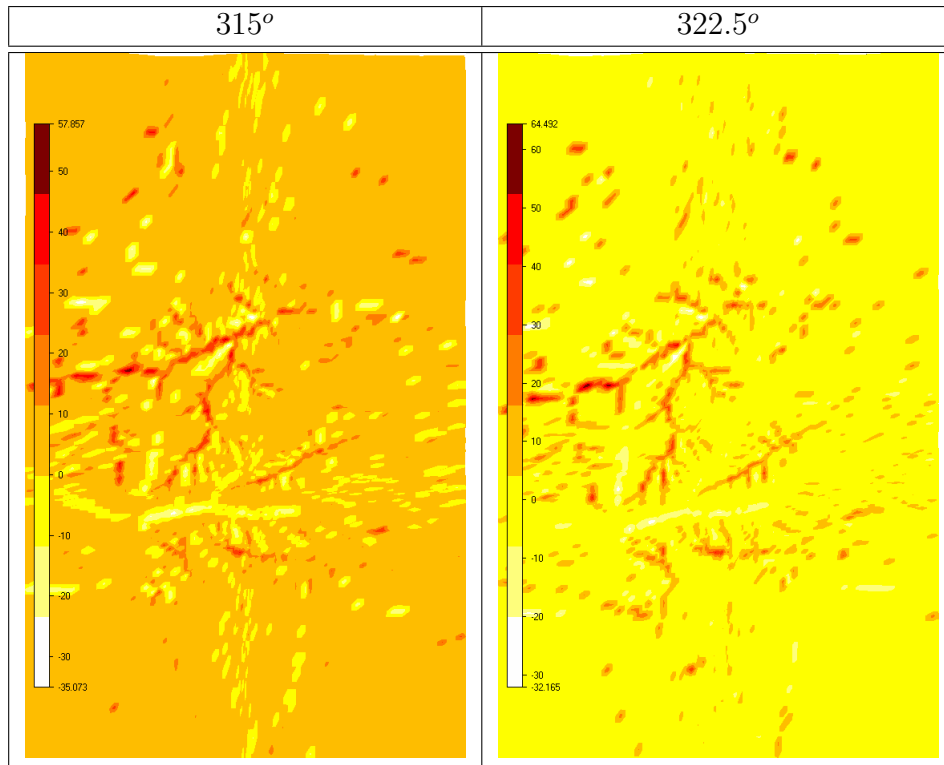


Figura F.6:  $\Delta h$  -315°, 322.5°

# Apêndice G

## Dados meteorológicos

### Rosa dos ventos

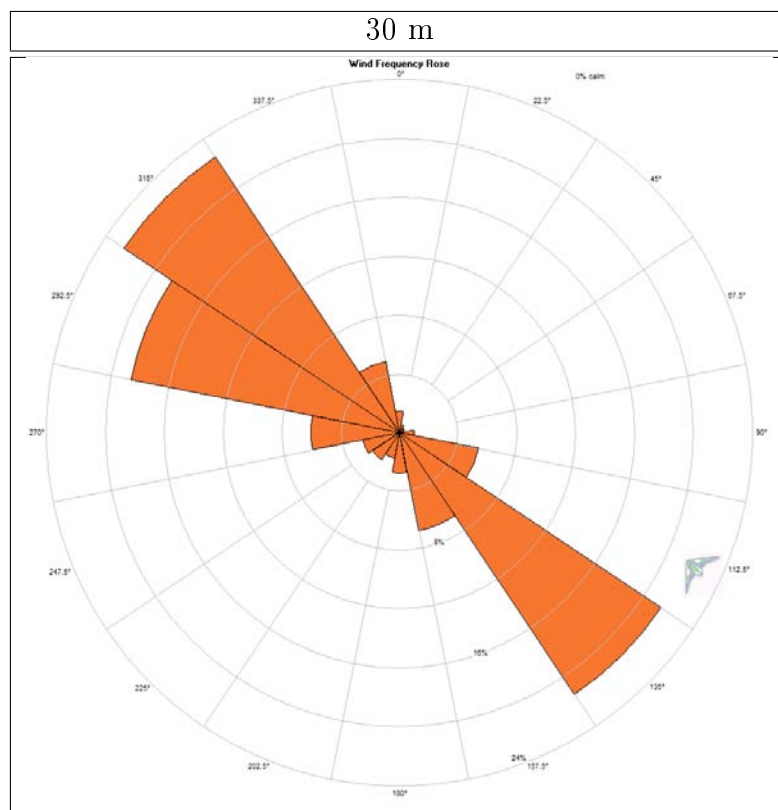


Figura G.1: Rosa dos ventos das frequências - P042

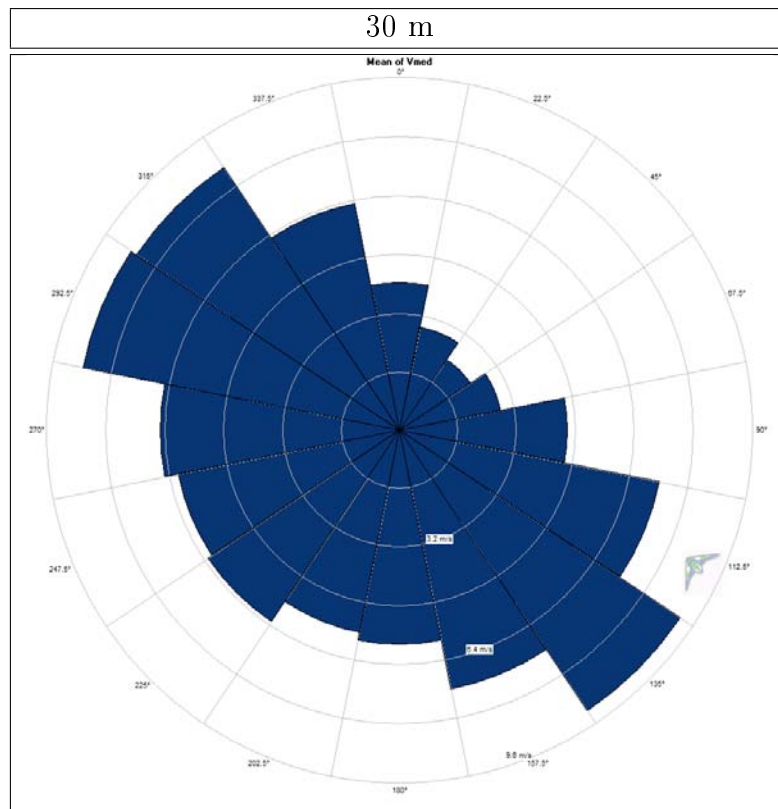


Figura G.2: Rosa dos ventos das velocidades médias - P042

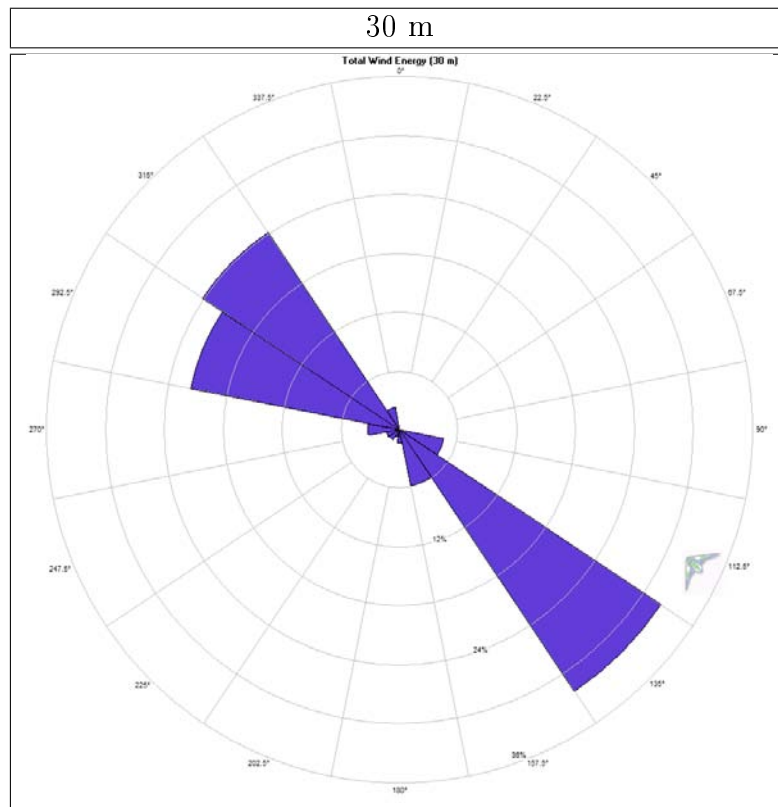


Figura G.3: Rosa dos ventos da energia - P042

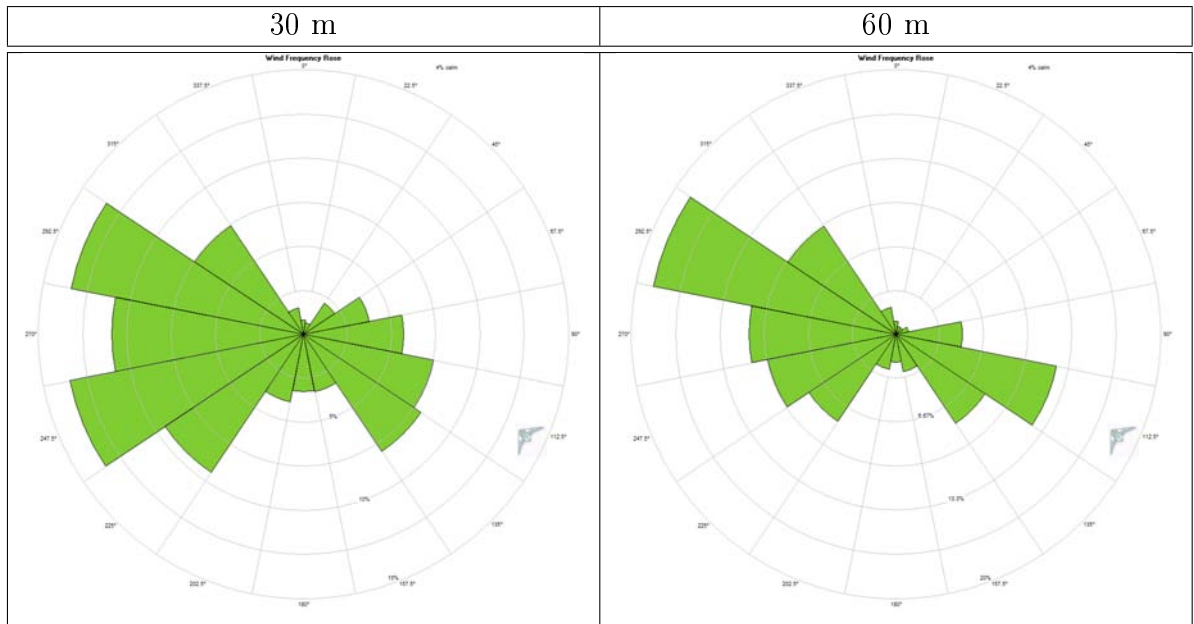


Figura G.4: Rosa dos ventos das frequências - P384

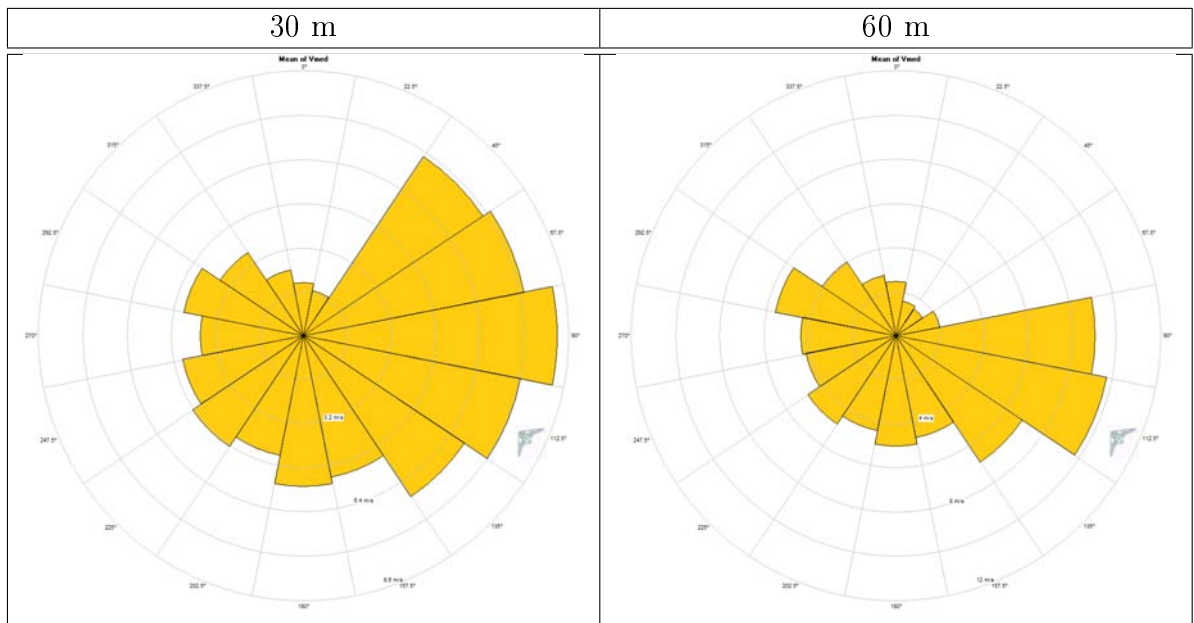


Figura G.5: Rosa dos ventos das velocidades médias - P384

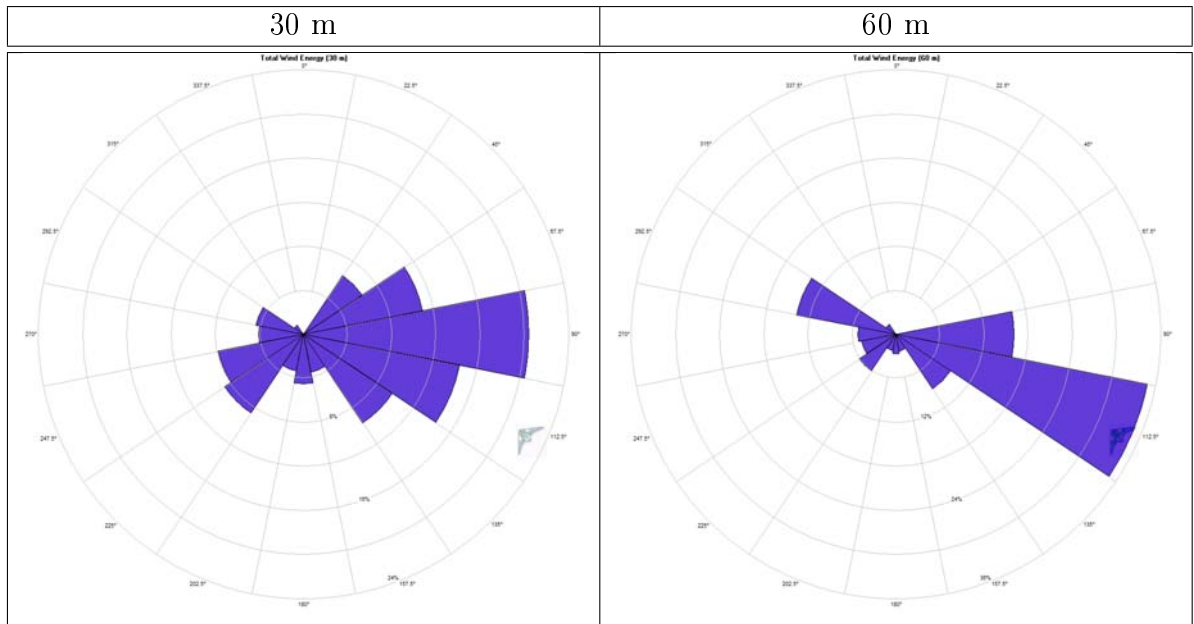


Figura G.6: Rosa dos ventos da energia - P384

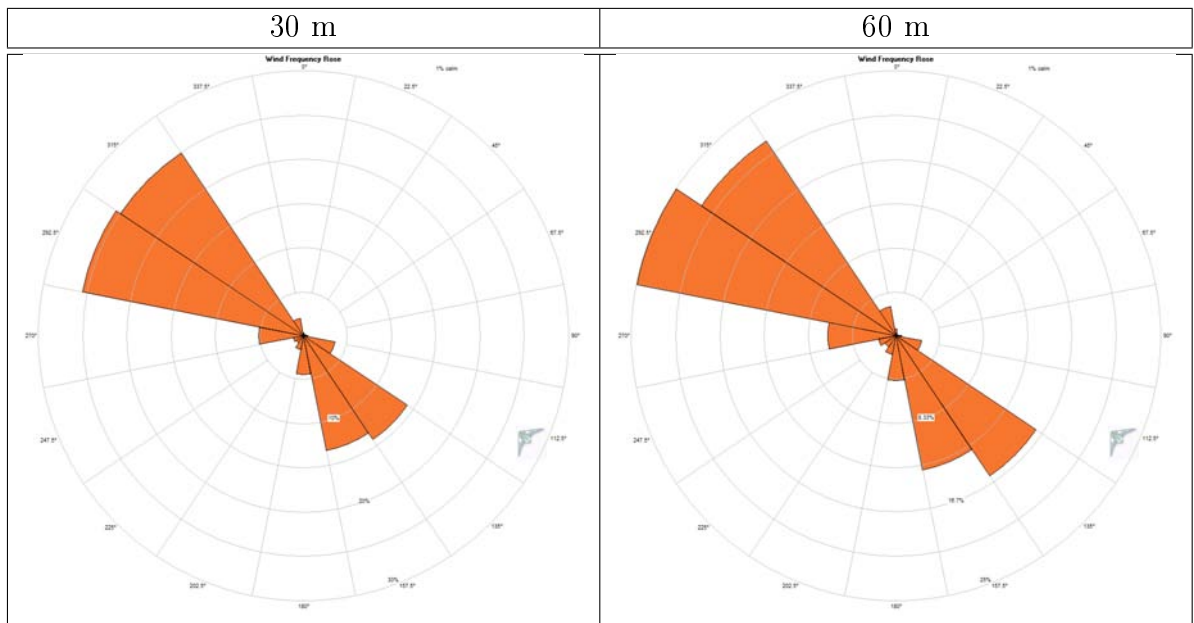


Figura G.7: Rosa dos ventos das frequências - P385

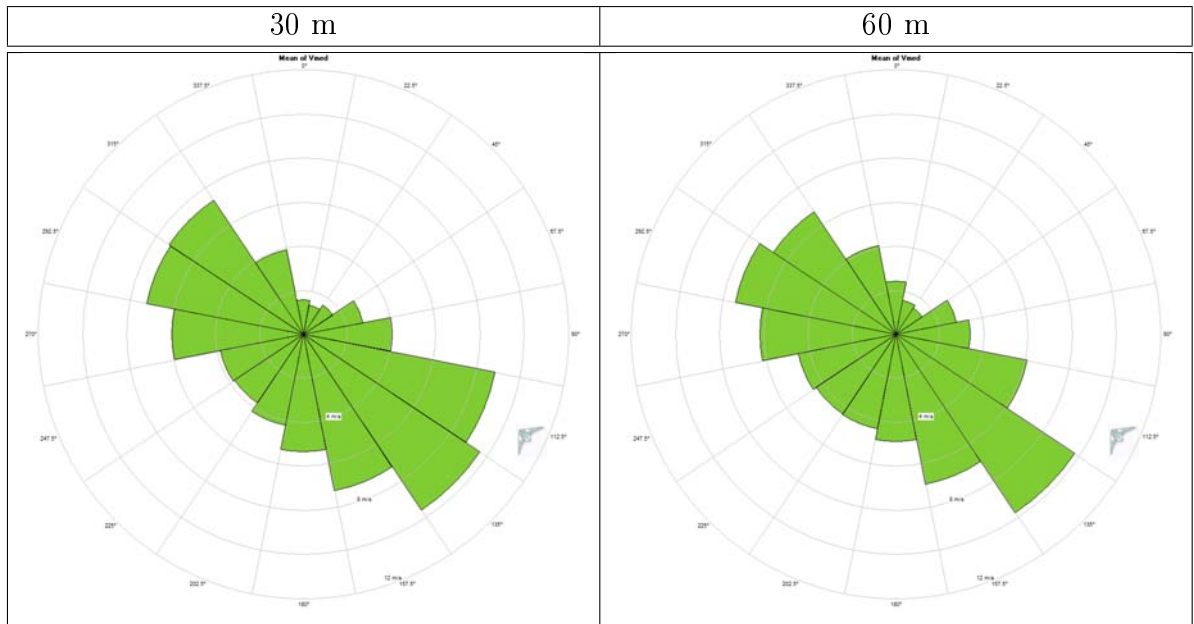


Figura G.8: Rosa dos ventos das velocidades médias - P385

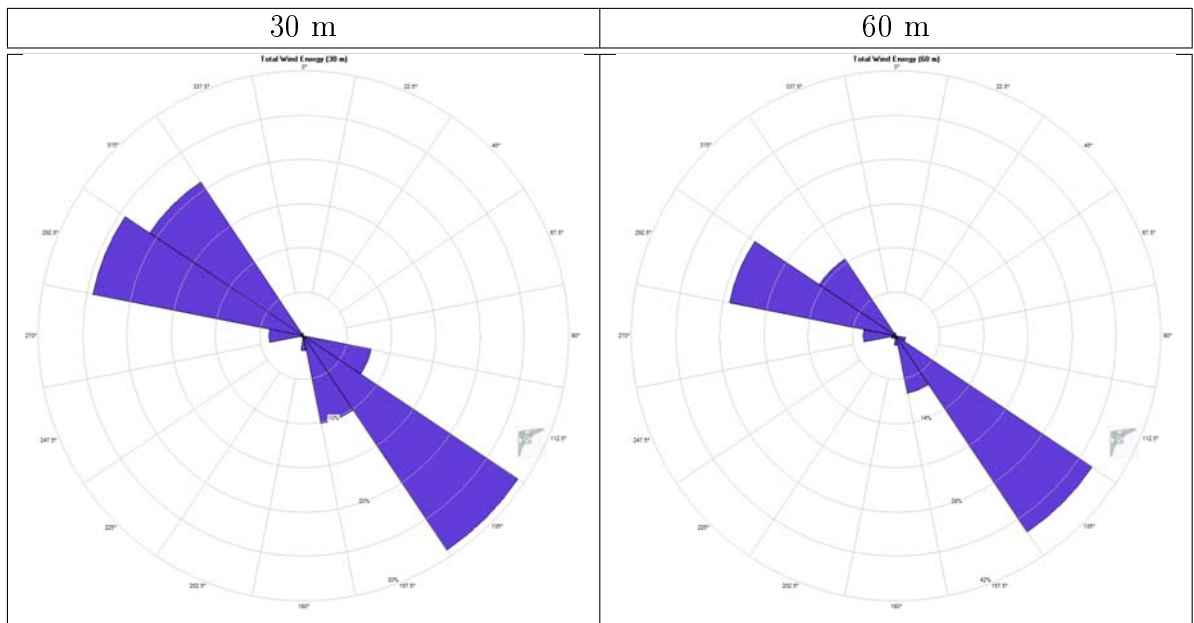


Figura G.9: Rosa dos ventos da energia - P385

## Função distribuição de probabilidade

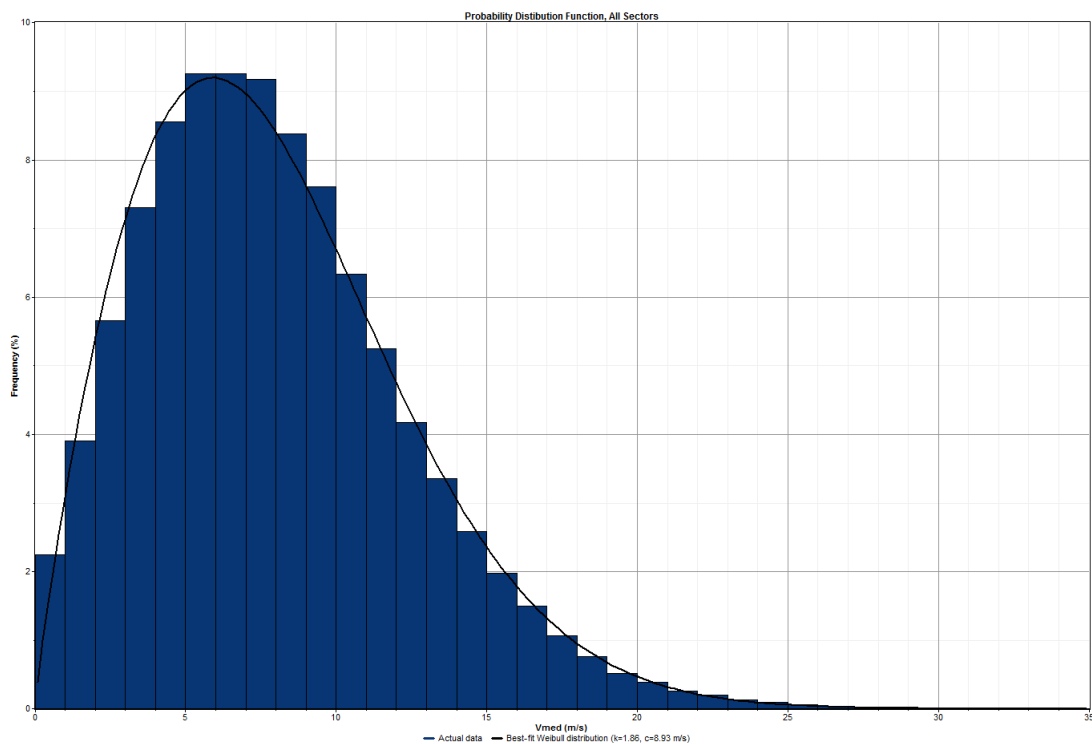


Figura G.10: Função distribuição de probabilidade - P042

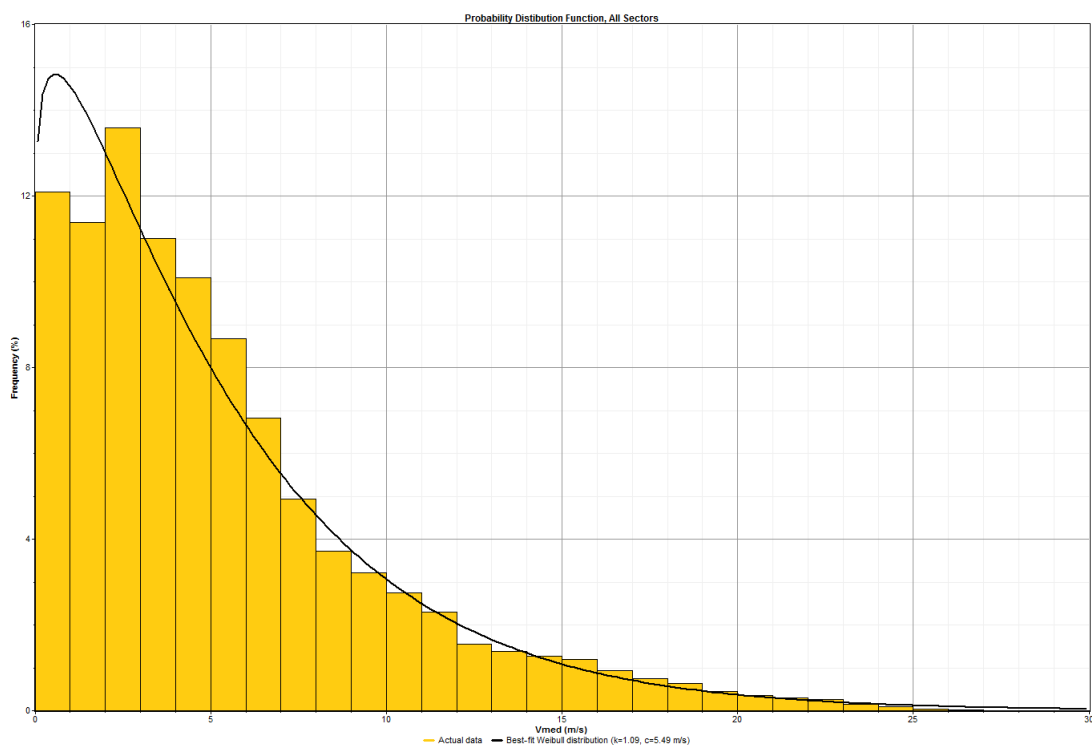


Figura G.11: Função distribuição de probabilidade - P384 - 30 m

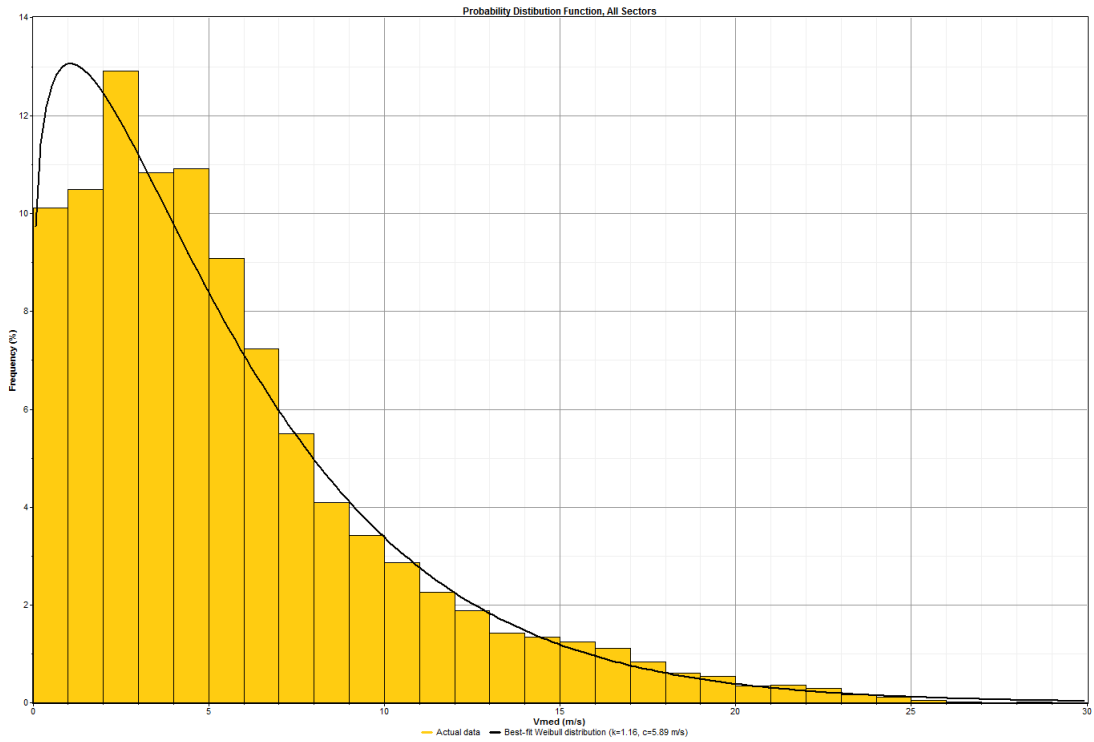


Figura G.12: Função distribuição de probabilidade - P384 - 60 m

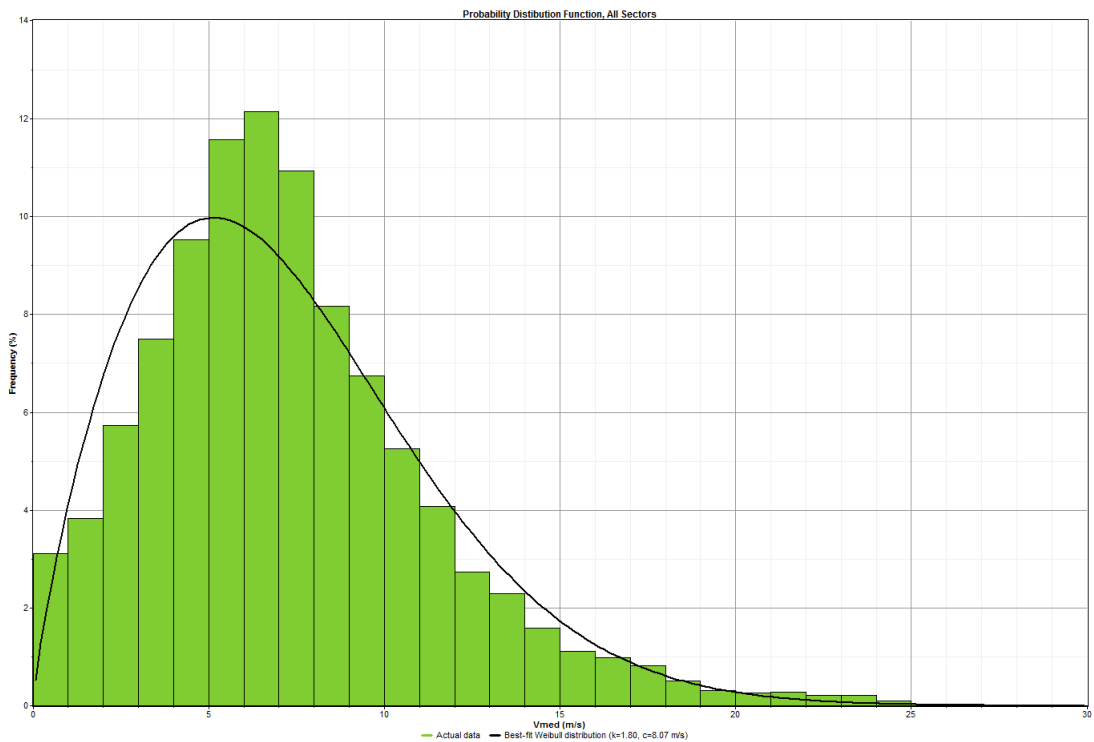


Figura G.13: Função distribuição de probabilidade - P385 - 30 m

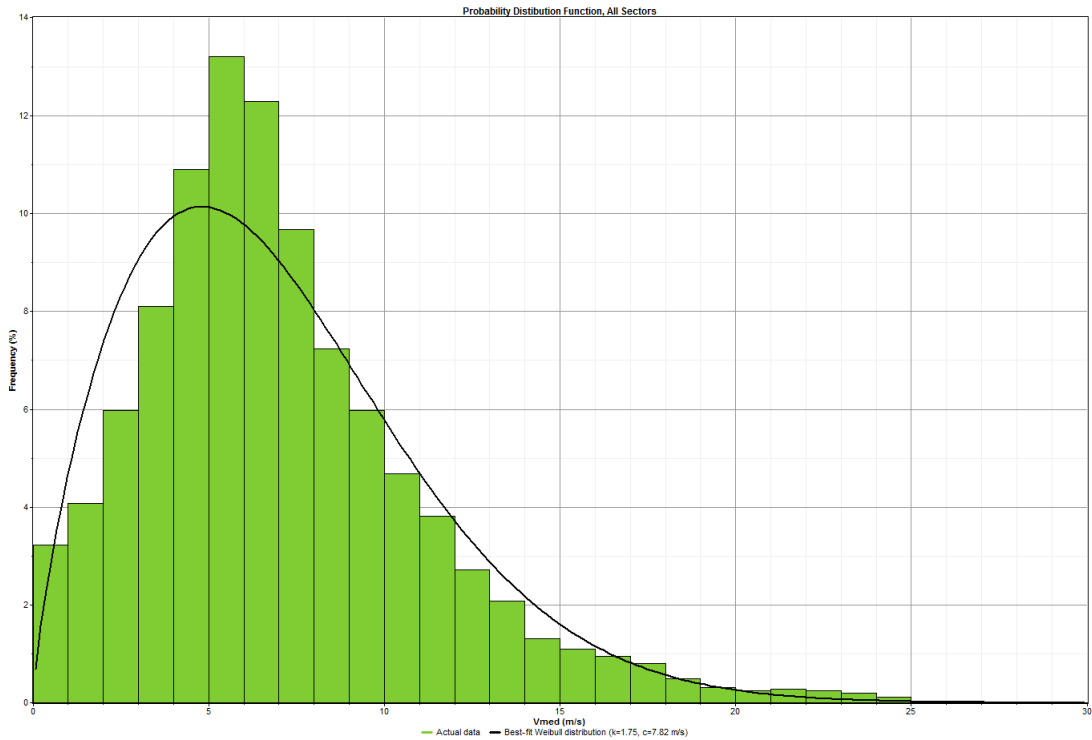


Figura G.14: Função distribuição de probabilidade - P385 - 60 m

## Turbulência “IEC standard 61400-1”

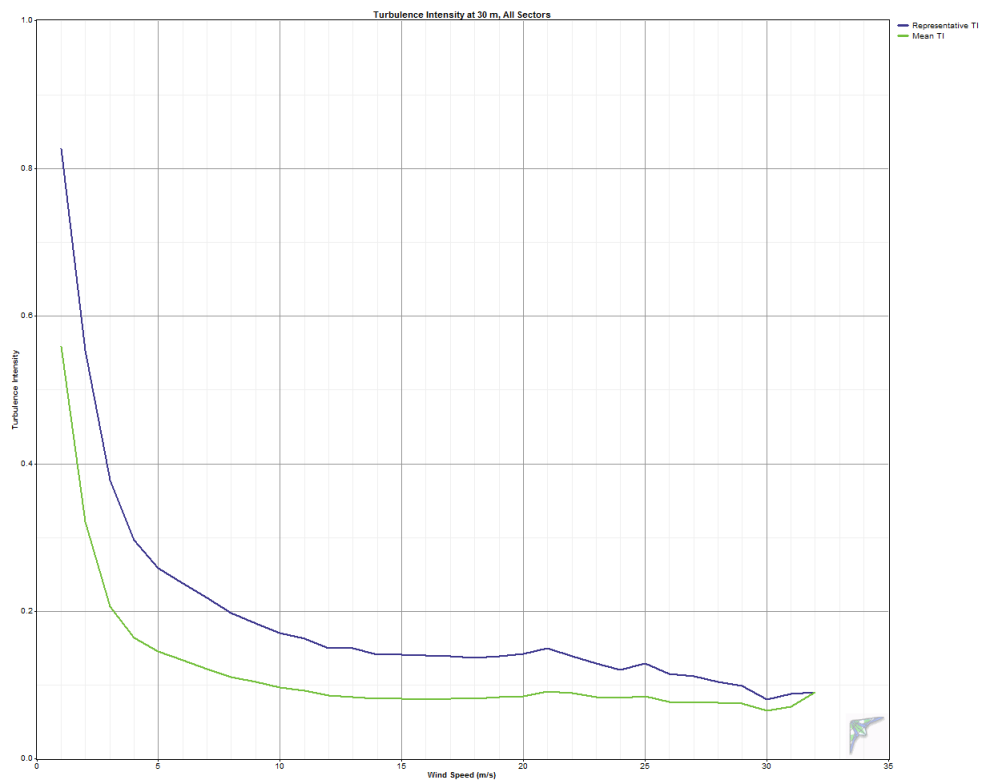


Figura G.15: Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média - P042

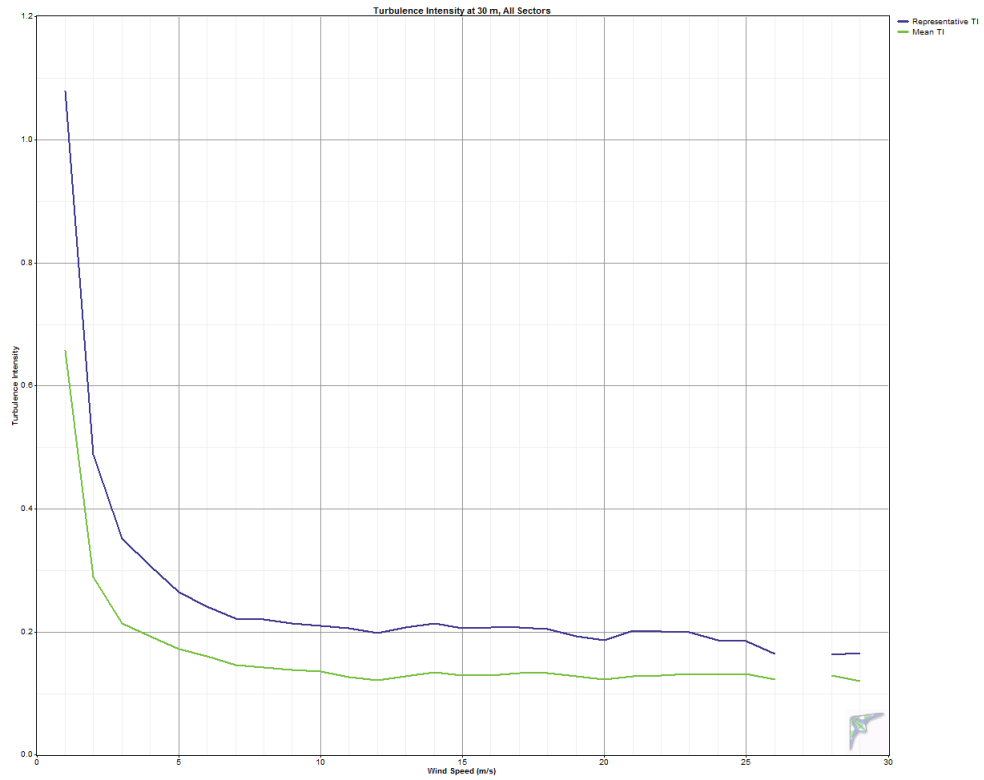


Figura G.16: Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média - P384 - 30 m

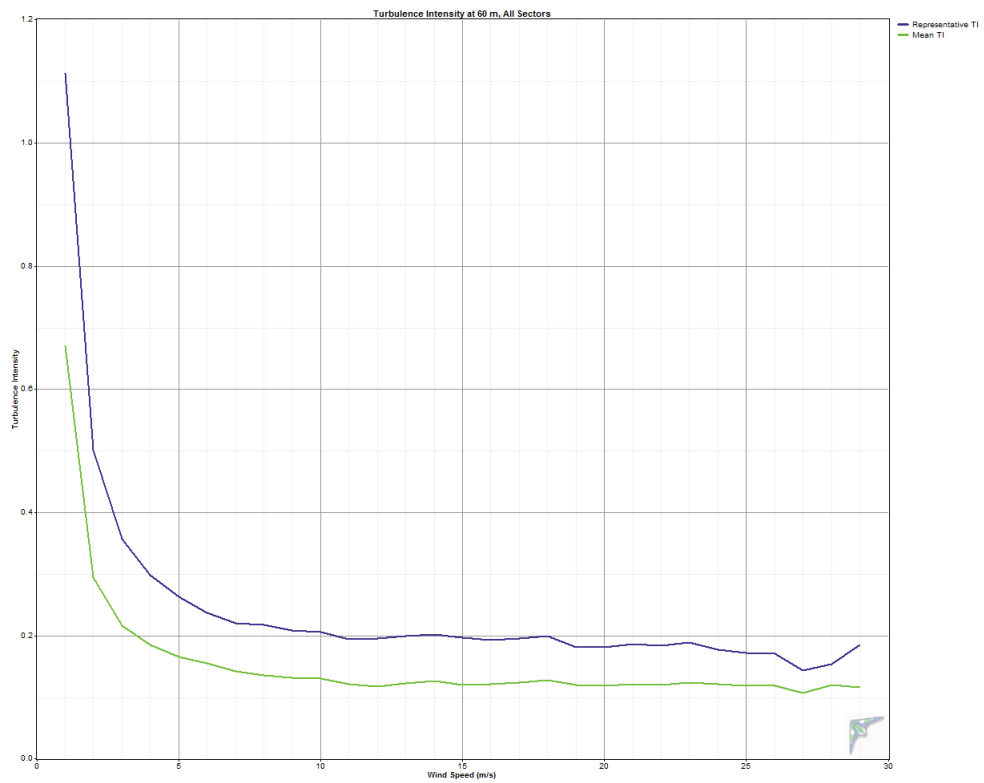


Figura G.17: Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média - P384 - 60 m

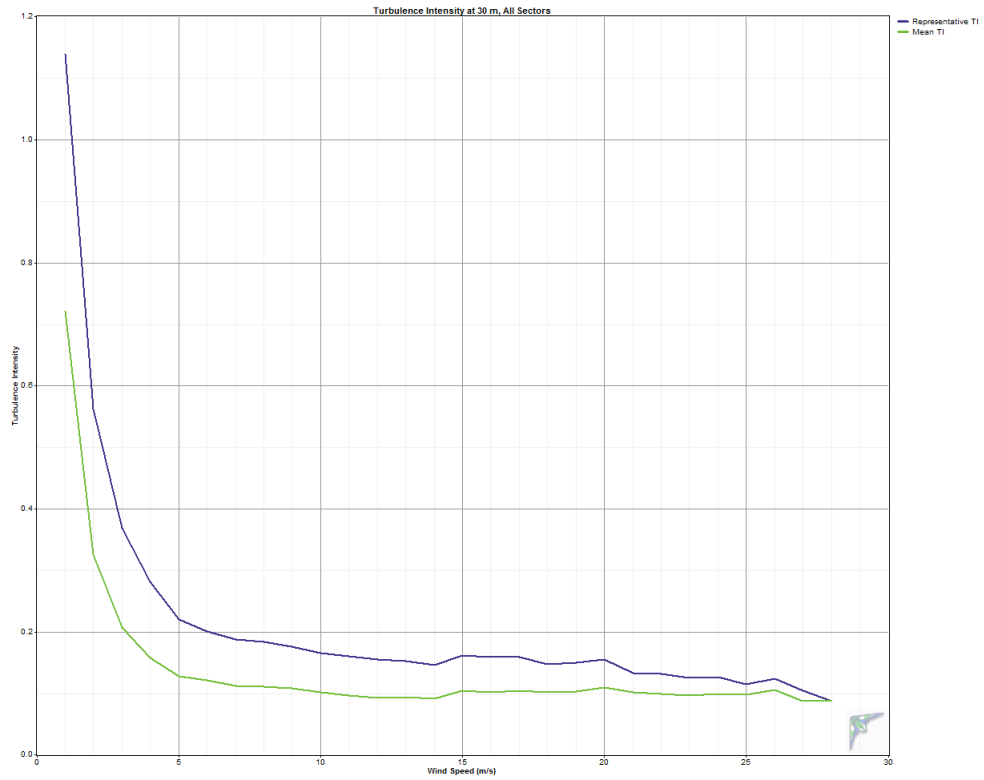


Figura G.18: Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média - P385 - 30 m

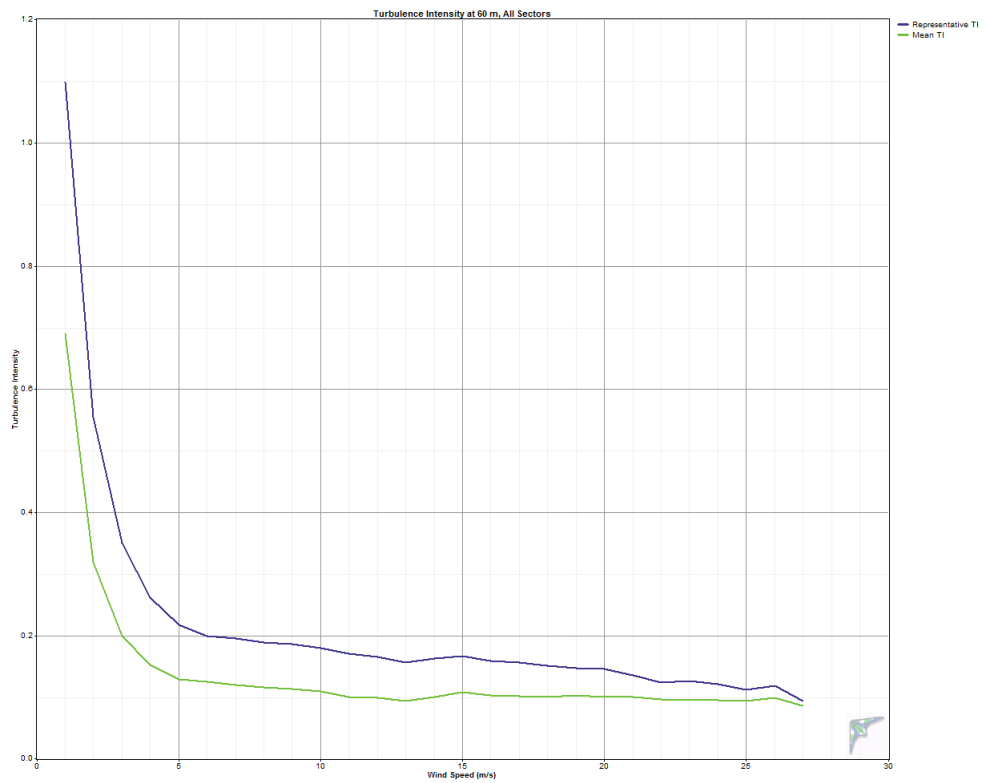


Figura G.19: Intensidade de turbulência para todos os sectores versus velocidade média - P385 - 60 m

## Apêndice H

### Gráficos de comparação dos resultados finais - WINDSIM/FLUENT

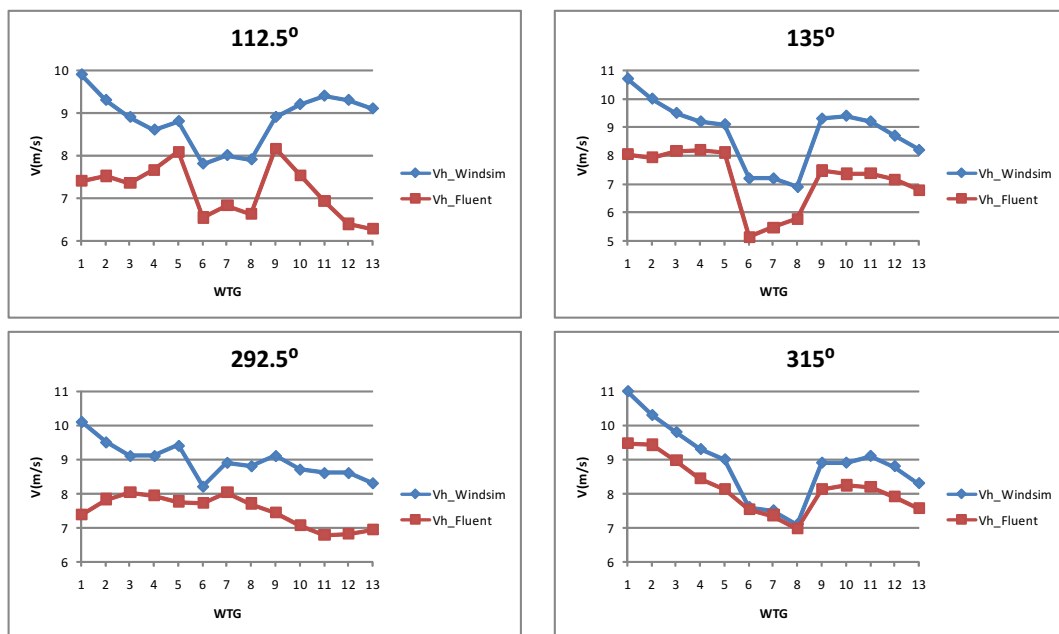


Figura H.1: Gráficos da comparação da velocidade para as direcções principais

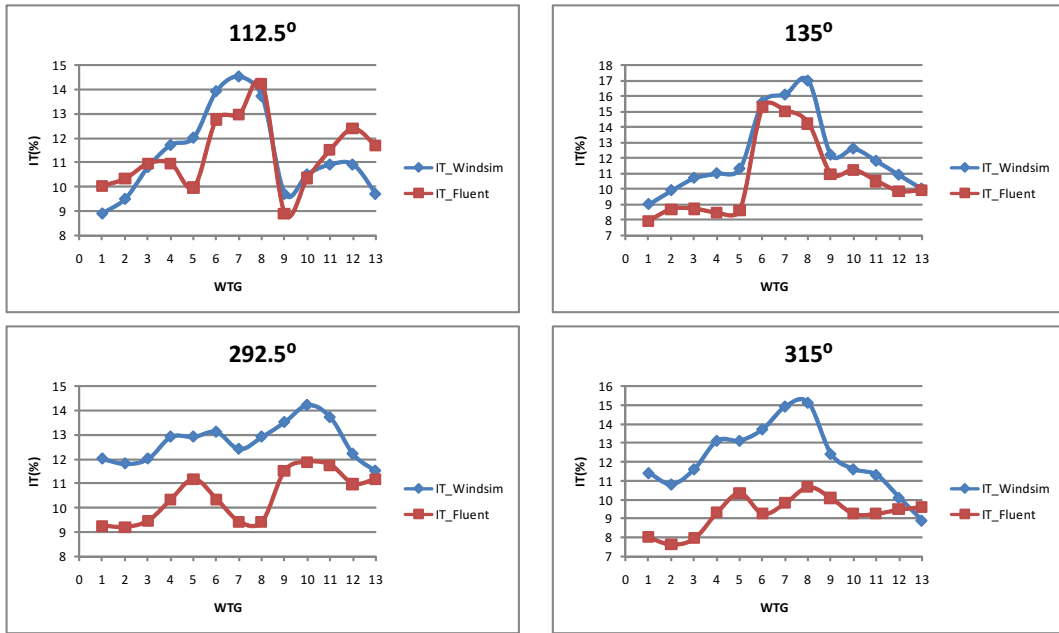


Figura H.2: Gráficos da comparação da intensidade de turbulência para as direcções principais

# Apêndice I

## Functions MATLAB

### Rotação e corte de terrenos xyz.

```
function Mapa=rotacao_final(A,pivotx,pivoty,alpha,xi,xs,yi,ys)
[theta,rho,z]=cart2pol(A(:,1)-pivotx,A(:,2)-pivoty,A(:,3));
theta_novo=theta(:,1)+deg2rad(alpha);
C=[theta_novo,rho,z];
[B(:,1),B(:,2),B(:,3)]=pol2cart(C(:,1),C(:,2),C(:,3));
d=size(B,1);
Mapa=zeros([d,3]);
for i=1:d
if ((B(i,1)>=xi && B(i,1)<=xs && (B(i,2)>=yi && B(i,2)<=ys))
Mapa(i,:)= B(i,:);
else
Mapa(i,:)=Mapa(i,:);
end
end
Mapa(~any(Mapa,2),:)=[];
```

### Pesquisa de velocidade e direcção nos dados experimentais

```
function R=verificacao(A,intensidade,toleranciav,angulo,toleranciaa)
```

```

D=size(A);
R=zeros([D(1,1) 3]);
for i=1:D if (A(i,3)>=intensidade-toleranciaiv && A(i,2)>=angulo-toleranciaaa && A(i,3)<=intensida
&& A(i,2)<=angulo+toleranciaaa)
R(i,:)=A(i,2) A(i,3) A(i,7)];
else
R(i,:)=R(i,:);
end
end
R(~any(R,2),:)=[];
end

```

## Sincronização de dados

```

function [F,G]=simultaneo(A,B,C)
D=size(B);
x=1;
F=zeros([size(A,1)*size(B,1) 3]);
G=zeros([size(A,1)*size(B,1) 3]);
for i=1:size(A,1) R=zeros([D(1,1) 3]); T=zeros([D(1,1) 3]);
for k=1:size(B,1) if (A(i,3)==B(k,7) && A(i,3)==C(k,7)) R(k,:)=A(i,3) B(k,2) B(k,3)];
T(k,:)=A(i,3) C(k,2) C(k,3)];
else
R(k,:)=R(k,:);
T(k,:)=T(k,:);
end
end
F(x:(size(B,1)+x-1),1:3)=R;
G(x:(size(B,1)+x-1),1:3)=T;
x=x+size(B,1);
end

```

```
F(~any(F,2),:)=[];  
G(~any(G,2),:)=[];  
end
```