

Simulação computacional de escoamentos atmosféricos sobre regiões montanhosas através da aplicação comercial - Meteodyn WT

Dário José Ferreira da Fonseca

Relatório do projecto final

Orientadores:

Prof. José M. Laginha M. da Palma

Dr. Carlos Silva Santos



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2009

A todos os que me têm apoiado

Resumo

O presente trabalho tem como objectivo estudar o escoamento atmosférico sobre uma região montanhosa visando a obtenção dos campos de velocidade e direcção do vento sobre a região escolhida, que são de especial interesse em aplicações de energia eólica. Para isso foi usado uma aplicação computacional comercial – Meteodyn- , baseado na resolução das equações de Navier-Stokes, sob a forma de médias de Reynolds e com recurso a um modelo de turbulência de uma equação.

As simulações foram realizadas sobre uma topografia real fornecida para o efeito, e situada em Portugal Continental. Dados com as características medidas do vento foram analisados e construídas rosas-dos-ventos para caracterizar o regime de ventos local. Verificou-se que as direcções de vento mais frequentes pertenciam aos sectores de Sudeste e Nordeste, e por esta razão foram estas as direcções a simular.

Após as simulações, obteve-se informações sobre o vento em todo o domínio escolhido, permitindo caracterizar o escoamento do local em estudo. Foram realizadas diversas simulações de forma a testar parâmetros tais como regimes térmicos e efeitos de esteira nos resultados finais.

Os resultados das simulações foram comparados com os medidos para as direcções simuladas nos sectores dominantes. Por fim foi avaliado o layout de aerogeradores proposto seguindo as normas e imposições dos fabricantes. Os aerogeradores que apresentam maiores problemas são os aerogeradores 5, 6 e 7 sendo o caso do aerogerador 6 o mais grave.

O programa utilizado parece prever bem as direcções do vento, mas evidencia algumas dificuldades na previsão da velocidade do vento e intensidade da turbulência.

Computational simulation of atmospheric flows over mountain regions using the commercial software – Meteodyn WT

Abstract

This work aims to study the atmospheric flow over a mountain to get the fields of wind speed and direction on the chosen region, which are of particular interest in wind energy applications. For this a commercial computer application – Meteodyn – was used, based on solving the Navier-Stokes equations in the form of averages of Reynolds and a turbulence model of one equation.

The simulations were performed on a real topography provided for that purpose and located in mainland Portugal. Data with measurements of wind characteristics were analyzed and wind-roses were made to characterize the system of local winds. It was found that the wind directions most common were in the sectors of Southeast and Northeast, and for this reason these were the directions to simulate.

After the simulations, it was obtained information on the wind across the field chosen, allowing characterizing the flow in the study site. Several simulations were performed in order to test parameters such as temperature regimes and the effects of wake in the final results.

The results of the simulations were compared with those measured, for the simulations in the dominant directions. Finally the proposed layout was assessed following the standards and requirements of manufacturers. The wind turbines showing the biggest problems are turbines 5, 6 and 7 being the case of wind turbine 6 the most serious.

The program used appears to predict well the directions of the wind, but presents some difficulties in predicting the wind speed and the turbulence intensity.

Agradecimentos

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos orientadores, Professor José M. Laginha M. da Palma e ao Dr. Carlos Silva, pelos conhecimentos transmitidos e todo o apoio que me deram ao longo destes últimos meses.

A todos os colegas que comigo partilharam o espaço de trabalho durante a realização deste trabalho e a toda a equipa do INEGI em especial ao Eng.º Bruno Silva, pelo seu apoio, na resolução de problemas encontrados no decurso do trabalho.

À minha família e amigos que, com o seu apoio, contribuíram para a conclusão desta fase da minha vida.

Índice de conteúdos

Resumo	<i>i</i>
Abstract	<i>iii</i>
Agradecimentos	<i>v</i>
Índice de conteúdos.....	<i>vii</i>
Índice de figuras.....	<i>ix</i>
Índice de tabelas	<i>i</i>
Lista de abreviaturas e símbolos.....	<i>iii</i>
1 . Introdução.....	<i>1</i>
1.1 Importância da Energia	<i>1</i>
1.2 Objectivos	<i>1</i>
1.3 Organização do relatório.....	<i>2</i>
2 . Metodologia.....	<i>3</i>
2.1 Introdução	<i>3</i>
2.2 Modelo matemático	<i>3</i>
2.3 Método numérico.....	<i>4</i>
3 . Definição do problema.....	<i>7</i>
3.1 Introdução	<i>7</i>
3.2 Descrição e definição da área em estudo.....	<i>7</i>
3.3 Medições locais das características do vento	<i>9</i>
3.3.1 Estação P_042.....	<i>10</i>
3.3.2 Estação P_384.....	<i>12</i>
3.3.3 Estação P_385.....	<i>16</i>
3.4 Observações finais.....	<i>20</i>
4 . Simulação computacional	<i>21</i>

4.1	Introdução	21
4.2	Descrição da ferramenta numérica	21
4.3	Definição das simulações	22
5	<i>Análise de resultados.....</i>	25
5.1	Introdução	25
5.2	Validação dos resultados.....	25
5.3	Comparação para estação de referência P_042	26
5.4	Comparação para estação de referência P_384	28
5.5	Comparação para estação de referência P_385	29
5.6	Avaliação do layout do parque	30
5.6.1	Avaliação individual	31
5.6.2	Resumo Geral.....	33
5.7	Comparação utilizando os resultados agregados	34
5.7.1	Estação de referência P_042.....	34
5.7.2	Estação de referência P_384.....	35
5.7.3	Estação de referência P_385.....	36
5.8	Efeitos de esteira	37
5.9	Efeitos Térmicos.....	38
6	<i>Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....</i>	39
7	<i>Referências e Bibliografia</i>	41
ANEXO A:	<i>Mapas 2D</i>	43
ANEXO B:	<i>Gráficos.....</i>	73
ANEXO C:	<i>Tabelas.....</i>	109

Índice de figuras

Figura 3-1 – Orografia.....	8
Figura 3-2 – Disposição das turbinas	8
Figura 3-3 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_042 h = 30 m...	11
Figura 3-4 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para a estação P_042 h = 30 m.....	11
Figura 3-5 – Variação da intensidade de turbulência para a estação P_384 a 30 m.....	11
Figura 3-6 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_384 h = 30 m...	13
Figura 3-7 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_384 h = 30 m	13
Figura 3-8 – Variação da intensidade de turbulência para a estação P_384 a 30 m.....	14
Figura 3-9 – Rosa de Frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_384h = 60 m..	15
Figura 3-10 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_384 h = 60 m	15
Figura 3-11 – Variação da intensidade de turbulência para a estação P_384 a 60 m.....	16
Figura 3-12 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_385 h = 30 m.	17
Figura 3-13 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_385 h = 30 m	17
Figura 3-14 – Variação da intensidade de turbulência para P_385 h = 30 m.....	18
Figura 3-15 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_385 h = 60 m.	19
Figura 3-16 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_385 h = 60 m	19
Figura 3-17 – Variação intensidade turbulência para P_385 h = 60 m	20
Figura 5-1 – Direcções do vento a) e relação de velocidades b), medidas e calculadas nas estações P_384 e P_385, condicionais à direcção do vento em P_042	26
Figura 5-2 – Intensidade da turbulência medida e calculadas nas estações P_384 e P_385, condicionais à direcção do vento em P_042.....	27
Figura 5-3 – Direcções do vento medidas e calculadas nas estações P_384 a 30 m do solo, P_042 e P_385, condicionais à direcção do vento em P_384 a 60 m do solo.....	28

Figura 5-4 – Relação de velocidades a) e intensidade da turbulência b), medidas e calculadas nas estações P_042, P_384 a 30 m do solo e P_385, condicionais à direcção do vento em P_384 a 60 m do solo.....	28
Figura 5-5 – Direcções do vento a) e relação de velocidades b), medidas e calculadas nas estações P_042, P_384 e P_385 a 30 m do solo, condicionais à direcção do vento em P_385 a 60 m do solo.....	29
Figura 5-6 – Intensidade da turbulência medida e calculada nas estações P_042, P_384 e P_385 a 30 m do solo, condicionais à direcção do vento em P_385 a 60 m do solo.....	30
Figura 5-7 – Mapa 2D IT para direcção de 112,5°.....	33
Figura 5-8 – Perdas de produção devido aos efeitos de esteira	37
Figura 5-9 – Comparação da IT para regimes térmicos diferentes	38
Figura A 1 – Mapas 2D <i>speed-up factor</i> para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m.....	46
Figura A 2 – Mapas 2D <i>speed-up factor</i> para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m.....	47
Figura A 3 – Mapas 2D <i>speed-up factor</i> para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m	48
Figura A 4 – Mapas 2D <i>speed-up factor</i> para os sectores de Noroeste para $h = 44$ m.....	49
Figura A 5 – Mapas 2D <i>speed-up factor</i> para os sectores de Noroeste para $h = 85$ m.....	50
Figura A 6 – Mapas 2D <i>speed-up factor</i> para os sectores de Noroeste para $h = 126$ m.....	51
Figura A 7 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m	54
Figura A 8 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m	55
Figura A 9 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m	56
Figura A 10 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Noroeste para $h = 44$ m	57
Figura A 11 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Noroeste para $h = 85$ m	58

Figura A 12 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Noroeste para $h = 126$ m.....	59
Figura A 13 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m	62
Figura A 14 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m	63
Figura A 15 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m.....	64
Figura A 16 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Noroeste para $h = 44$ m.....	65
Figura A 17 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Noroeste para $h = 85$ m.....	66
Figura A 18 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Noroeste para $h = 126$ m.....	67
Figura A 19 – Mapas 2D desvio escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m	70
Figura A 20 – Mapas 2D desvio escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m	71
Figura A 21 – Mapas 2D desvio escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m	72
Figura B 1 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h85m}$).....	77
Figura B 2 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h85m}$).....	78
Figura B 3 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h85m}$).....	79
Figura B 4 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h85m}$).....	80
Figura B 5 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h85m}$)	81
Figura B 6 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h85m}$)	82

Figura B 7 – Perfis verticais de velocidade para Turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste ($V_h^* = V_h/V_{h_{85m}}$)	83
Figura B 8 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste	86
Figura B 9 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste	87
Figura B 10 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste	88
Figura B 11 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste	89
Figura B 12 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste	90
Figura B 13 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste	91
Figura B 14 – Perfis verticais de <i>shear factor</i> para Turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste	92
Figura B 15 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste	94
Figura B 16 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste	95
Figura B 18 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste	96
Figura B 19 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste	97
Figura B 20 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste	98
Figura B 21 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste	99
Figura B 22 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste	100

Figura B 23 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste	102
Figura B 24 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste	103
Figura B 25 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste	104
Figura B 26 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste	105
Figura B 27 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste	106
Figura B 28 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste	107
Figura B 29 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste	108

Índice de tabelas

Tabela 3-1 – Resultados das medições $h = 30$ m.....	10
Tabela 3-2 – Resultados das medições $h = 30$ m.....	12
Tabela 3-3 – Resultados das medições $h = 60$ m.....	14
Tabela 3-4 – Resultados das medições $h = 30$ m.....	16
Tabela 3-5 – Resultados das medições $h = 60$ m.....	18
Tabela 3-6 – Direcções simuladas	23
Tabela 5-1 – Síntese na estação P_042.....	34
Tabela 5-2 - Síntese na estação P_384	35
Tabela 5-3 - Síntese na estação P_385	36
Tabela C 1 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_042 a 30 m.....	111
Tabela C 2 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_384 a 30 m.....	111
Tabela C 3 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_385 a 30 m.....	111
Tabela C 4 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_384 a 60 m.....	112
Tabela C 5 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_385 a 60 m.....	112
Tabela C 6 – <i>Shear factor</i> médio para as estações e turbinas.....	113

Lista de abreviaturas e símbolos

α_k	expoente da lei de potência da velocidade
ε	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta
ρ	densidade
μ_t	viscosidade turbulenta
μ_T	viscosidade total
$\overline{\rho u'_i u'_j}$	tensor de Reynolds
A	factor de escala da distribuição de Weibull
CLA	camada limite atmosférica
Dir	direcção
IT	intensidade da turbulência
k	energia cinética turbulenta
k	factor de forma da distribuição de Weibull
L_T	comprimento característico da turbulência
l	comprimento da mistura
MFC	mecânica dos fluidos computacional
RV	relação de velocidades
R_{if}	número de Richardson
RANS	Reynolds-averaged Navier–Stokes
SF	shear factor
t	tempo
$\bar{u}_i, \bar{u}_j$	velocidade média
V_{ref}	velocidade de referencia a 10m do solo
V_h	speed- up factor
V_h	velocidade horizontal do vento
V_{med}	velocidade média

$\bar{V}$	velocidade média
x_i, x_j	coordenadas cartesianas
Z_{ans}	altura normal ao solo
z	altura

1 . Introdução

1.1 Importância da Energia

Na avaliação do potencial de vento numa região, o conhecimento do seu regime de ventos é um dos elementos mais importantes nessa avaliação. Este passo é o primeiro e fundamental passo para o aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia. Para isso efectuam-se medições das características do vento por um período que seja representativo das características do vento nessa região, e deve ter a duração mínima de 12 meses.

A energia eólica é hoje em dia, vista como uma das mais promissoras fontes de energia renováveis, caracterizada por uma tecnologia madura baseada principalmente na Europa. Pelo seu carácter limpo, abundante, inesgotável e tecnicamente mais versátil do que outras fontes renováveis, a energia eólica é aquela que apresenta uma maior margem de progressão nos próximos anos.

A preocupação com a geração de energia levou vários países a pesquisar seu potencial eólico dentre os quais podemos destacar os EUA, Alemanha, Dinamarca e Holanda.

1.2 Objectivos

O presente trabalho visa realizar a simulação computacional do escoamento atmosférico sobre uma região montanhosa.

- Realizar as simulações nas direcções principais do escoamento;
- Gerar perfis verticais nas estações e posições dos aerogeradores para as seguintes grandezas: velocidade, inclinação do escoamento, intensidade da turbulência e ‘shear factor’;

- Gerar mapas 2D de contornos de velocidade, turbulência, inclinação do escoamento e desvio do escoamento para cada uma das simulações, cobrindo a área do parque a diferentes alturas do solo para as direcções mais frequentes do vento;
- Efectuar a comparação dos resultados medidos com os calculados utilizando como ponto de referência uma estação de medição de cada vez;
- Estudar diferentes parâmetros do programa, tais como activação dos efeitos de esteira e regimes térmicos;

1.3 Organização do relatório

Este relatório está estruturado em cinco capítulos. Após este primeiro capítulo introdutório, o relatório está organizado da seguinte forma:

- No segundo capítulo, intitulado *Metodologia*, apresenta-se o modelo matemático e o método numérico utilizados;
- No terceiro capítulo, intitulado *Definição do problema*, apresentam-se todos os parâmetros necessários para o estudo do problema em causa;
- O quarto capítulo, intitulado *Simulação Computacional*, descreve a ferramenta numérica e os parâmetros usados no programa;
- Para o quinto capítulo está reservada a *Análise dos resultados* com a validação dos resultados e análise da influência de outros parâmetros nos resultados;
- Por fim, o sexto capítulo, com o título *Conclusões e trabalhos futuros*, apresenta as conclusões e deixa sugestões para os trabalhos futuros.

2 . Metodologia

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados numa primeira parte o modelo matemático utilizado, e numa segunda parte, o modelo numérico utilizado para resolver essas mesmas equações.

2.2 Modelo matemático

As equações que governam o escoamento de um fluido são aquelas que estabelecem os princípios físicos de conservação da massa quantidade de movimento. Estas equações, as equações de Navier-Stokes, utilizando a metodologia de Reynolds para a turbulência, e considerando um escoamento estacionário, incompressível e o fluido Newtoniano, adquirem a forma de médias de Reynolds (RANS).

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$-\frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + F_i = 0 \quad (2.2)$$

O tensor de Reynolds é avaliado a partir de relações adicionais – modelo de turbulência, de uma equação, considerando a hipótese de proporcionalidade entre estas correlações e os gradientes médios.

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

A viscosidade turbulenta é considerada igual á raiz quadrada da energia cinética da turbulência, k , (equação extra de transporte) multiplicada por um comprimento de escala característica de turbulência L_T (determinado antes do cálculo):

$$\mu_t = k^{1/2} L_T \quad (2.4)$$

A equação de transporte energia cinética da turbulência é

$$U_j = \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

$$\text{Com:} \begin{cases} \varepsilon = C_\mu \frac{\nu_T}{L_T^2} k \\ P_k = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} \\ \nu_T = k^{1/2} L_T \end{cases} \quad (2.5)$$

O comprimento de escala turbulento é calculado no início do cálculo de acordo com um modelo baseado em Yamada e Arritt [1]. Este modelo considera os casos de estratificação térmica estável e instável, de acordo com (2.6)

$$L_T = \sqrt{2} S_m^{3/2} l \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{l} = \left(\frac{1}{l_0} \frac{1}{kz} \right) \text{ onde } z \text{ é a altura} \\ C_\mu = \frac{4S_m}{B_1} \\ S_m \begin{cases} 1,96 \frac{(0,1912 - R_{if})(0,2341 - R_{if})}{(1 - R_{if})(0,2231 - R_{if})} \text{ se } R_{if} < 0,16 \\ 0,085 \text{ se } R_{if} \geq 0,16 \end{cases} \\ B_1 = 16,6 \\ l_0 = 100\text{m} \\ k = 0,41 \end{array} \right. \quad (2.6)$$

O número de Richardson é calculado de acordo com o comprimento de Monin-Obukhov. Cada classe de estabilidade definida no software corresponde a comprimentos diferentes de Monin-Obukhov.

2.3 Método numérico

Para simular o escoamento de ar, existem diversos modelos numéricos que vão desde simples modelos lineares como o conhecido WAsP¹, até à simulação numérica directa (DNS, de *Direct Numerical Simulation*) sendo a melhor ferramenta que existe para o estudo de

¹ Wind Atlas Analysis and Application Program endereço electrónico: /http://www.wasp.dk/

escoamentos já que resolve directamente as equações de Navier-Stokes, porém para escoamentos de engenharia este método está além das capacidades dos computadores.

Neste trabalho foi utilizada a aplicação comercial de MFC (Mecânica dos Fluidos Computacional) Meteodyn², para simular o escoamento atmosférico sobre terreno complexo. Esta aplicação utiliza técnicas de MFC para simular da Camada Limite Atmosférica (CLA), baseada na resolução das equações de médias de Reynolds (RANS) apresentados na secção 2.1. O programa incorpora a técnica de resolução designada “solver” MIGAL. O MIGAL é um “solver” iterativo de equações lineares que aplica um algoritmo que simultaneamente actualiza a velocidade do vento e a pressão através de todo o domínio computacional numa forma de resolução acoplada.

² Endereço electrónico: <http://www.meteodyn.com>

3 . Definição do problema

3.1 Introdução

Antes de se realizar o estudo do escoamento sobre uma região montanhosa é preciso um conjunto de dados, necessários para a definição do problema, e alguns deles terão de ser analisados e passar por um tratamento apropriado para poderem ser utilizados.

3.2 Descrição e definição da área em estudo

A área em estudo onde está inserido o parque localiza-se na região Centro de Portugal. O parque encontra-se numa região montanhosa como se pode ver na Figura 3-1, onde a escala segundo z foi ampliada para se poder ver melhor as características do terreno. O parque, que é a zona de estudo com maior interesse, tem as dimensões de um rectângulo com 3 km×2,4 km localizado sobre o V formado por duas cumeadas viradas a norte e descendentes que terminam num vale (ver Figura 3-1 seta 1 e a Figura 3-2). Quanto à área envolvente, a zona de maior destaque está localizada a Nordeste (ver Figura 3-1 seta 2) que é uma zona de elevada altitude e grandes declives, que com certeza influencia o escoamento local.

A informação topográfica sobre a qual serão realizadas as simulações, foi fornecida num ficheiro em formato xyz no sistema de coordenadas rectangulares com projecção UTM, e cobre uma área de 37 km×36 km. Quanto à rugosidade esta foi fornecida num formato do WAsP o map.

A cobertura do solo existente no local em estudo é caracterizada principalmente por áreas com vegetação rasteira e arbustiva, pelo que se atribuiu uma rugosidade característica para esta região de $z_0 = 0.03$ m.

A zona é privilegiada no que se refere à potencialidade do seu recurso eólico, uma vez que as pendentes acentuadas propiciam a geração de fenómenos de aceleração do escoamento atmosférico, traduzindo-se na ocorrência de velocidades elevadas nas zonas de maior altitude.

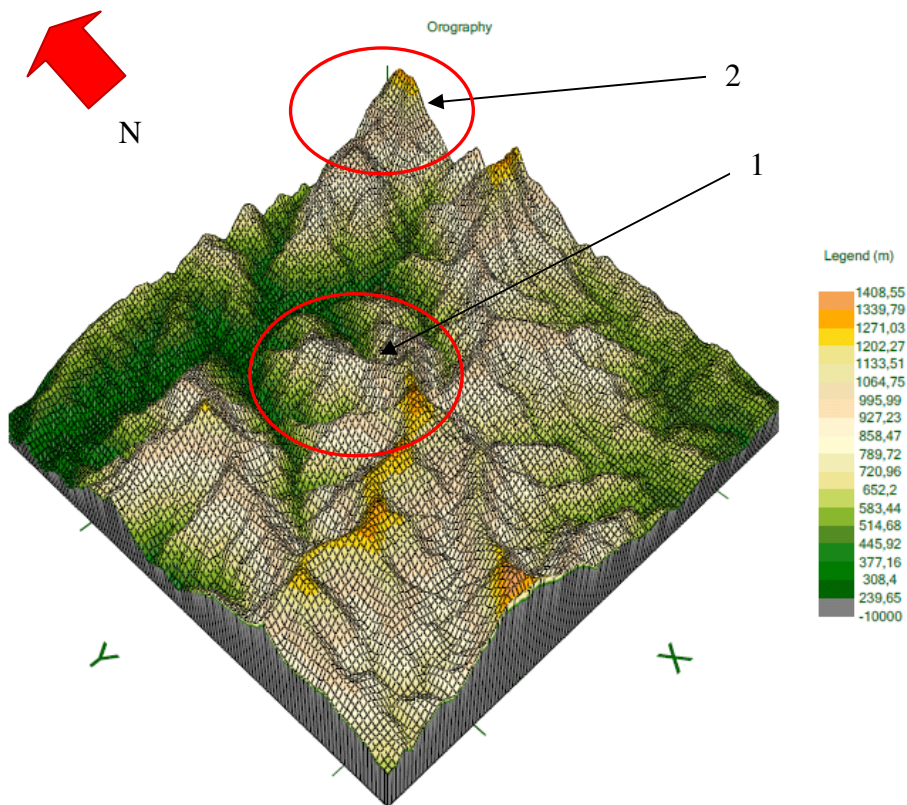


Figura 3-1 – Orografia

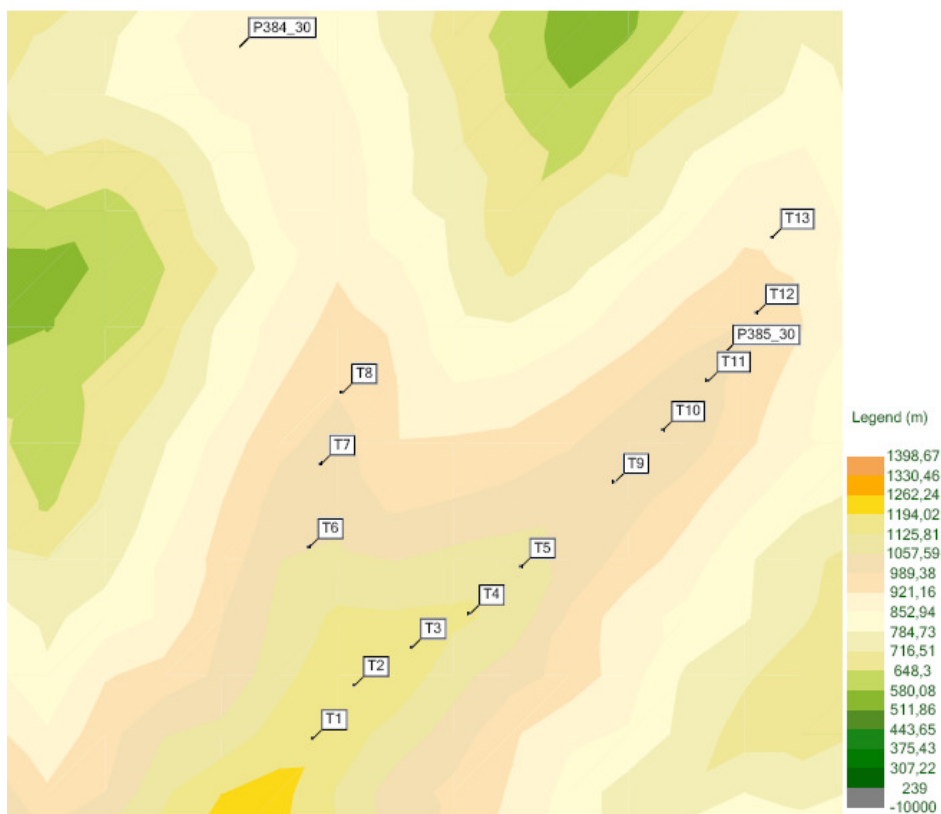


Figura 3-2 – Disposição das turbinas

3.3 Medições locais das características do vento

Para este trabalho estão disponíveis os dados das características do vento relativamente a três estações: P_042, P_384 e P_385. As três estações cobrem períodos de medição diferentes sendo a P_042 aquela com o período de medição mais longo, que vai de Setembro de 1997 a Agosto de 2008. As restantes duas cobrem o mesmo período de medição; de Março de 2007 a Agosto de 2008. As grandezas medidas são a velocidade e a direcção do vento, a duas alturas do solo, para as estações P_384 e P_385, e a uma para a estação P_042. Os valores destas grandezas foram armazenados sob a forma de médias verificadas em intervalos de 10 minutos. No caso da velocidade foram ainda armazenados o desvio padrão e o valor máximo e mínimo da velocidade. Para a medição das características dos ventos os mastros (estações) estavam equipados com anemómetro de copos, e para o registo de dados um “*data logger*”.

Para a filtragem dos dados de vento e construção das rosas-dos-ventos foi utilizado o Excel e o *Windographer*³ versão ‘trial’, um programa com capacidade de aplicar filtros aos dados de entrada identificar quais colunas representam a direcção, velocidade e desvio padrão.

Os filtros aplicados para os dados foram os seguintes:

1. $1 \leq V_{med} < 90$
2. $0 \leq Dir \leq 360$

O limite inferior do primeiro filtro justifica-se pela incapacidade do anemómetro medir velocidades inferiores a 1 m/s, o limite superior deve-se ao facto do equipamento de registo dos dados, registar as velocidades como 99 m/s quando deu algum erro, o mesmo se passa para as direcções apresentando um valor de 999.

Nos cálculos da intensidade da turbulência foi utilizada a fórmula apresentada em (3.1), onde σ é o desvio padrão e $\bar{V}$ é a velocidade média do vento registada num intervalo de 10 min.

$$IT = \frac{\sigma}{\bar{V}} \quad (3.1)$$

³ Endereço electrónico: <http://www.mistaya.ca/windographer/overview.htm>

Os gráficos da intensidade da turbulência tal como as rosas dos ventos apresentados a seguir, foram obtidos a partir do programa *Windographer*, e foram obtidos segundo a norma *IEC 61400-1 3rd edition (2005)*.

3.3.1 Estação P_042

O período de dados seleccionado para caracterizar o regime de ventos no local onde foi instalada a estação P_042 é de um ano, entre Março de 2007 e Maio de 2008. Os resultados estão apresentados Tabela 3-1. A 30 m do solo a velocidade média foi de 8,4 m/s e de 12,96% para a intensidade de turbulência.

Tabela 3-1 – Resultados das medições h = 30 m

P_042		
Altura de medição [m]	30	
Período de mediação [dias]	365	
Registos válidos (%)	Dir	Vmed
	88.23	85.3
Velocidade média [m/s]	8.4	
Intensidade turbulência [%]	12.96%	
Distribuição de Weibull	A [m/s]	8.66
	k	1.93
Filtro dados	1 ≤ Vmed < 90	
	0 ≤ Dir ≤ 360	

Na Figura 3-3 mostram-se a rosa de frequência e o histograma de velocidade obtidos a partir das medições a 30 m do solo. A distribuição de Weibull é caracterizada pelo factor de escala (A) de 8,66 m/s e factor de forma (k) de 1,93. Os ventos dominantes ocorrem nos sectores de Noroeste e Sudeste (Figura 3-3 a), com velocidades médias da ordem dos 9 m/s (Figura 3-4 a).

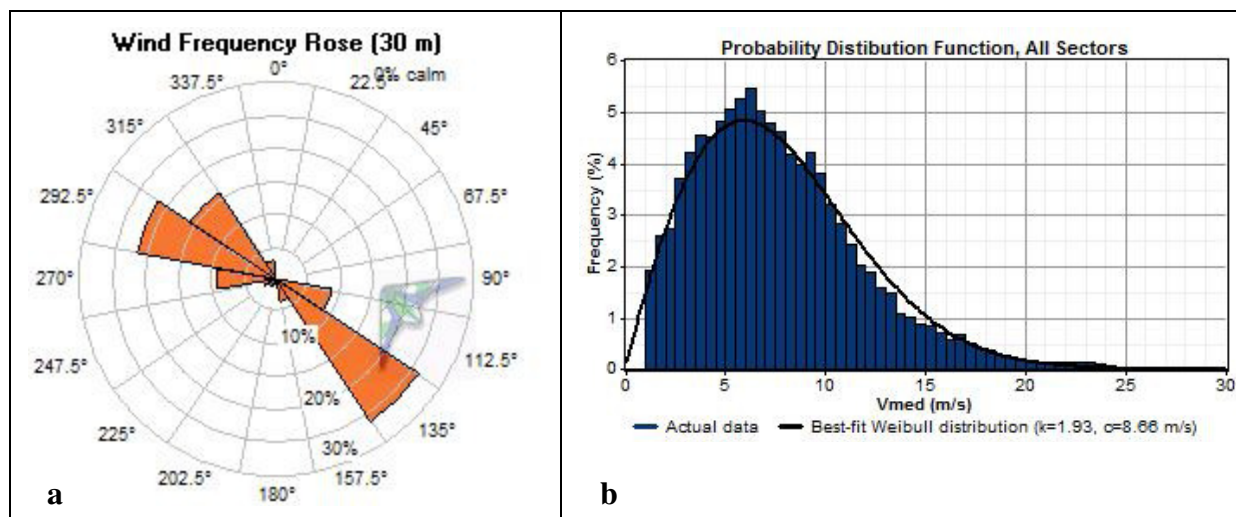


Figura 3-3 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_042 h = 30 m

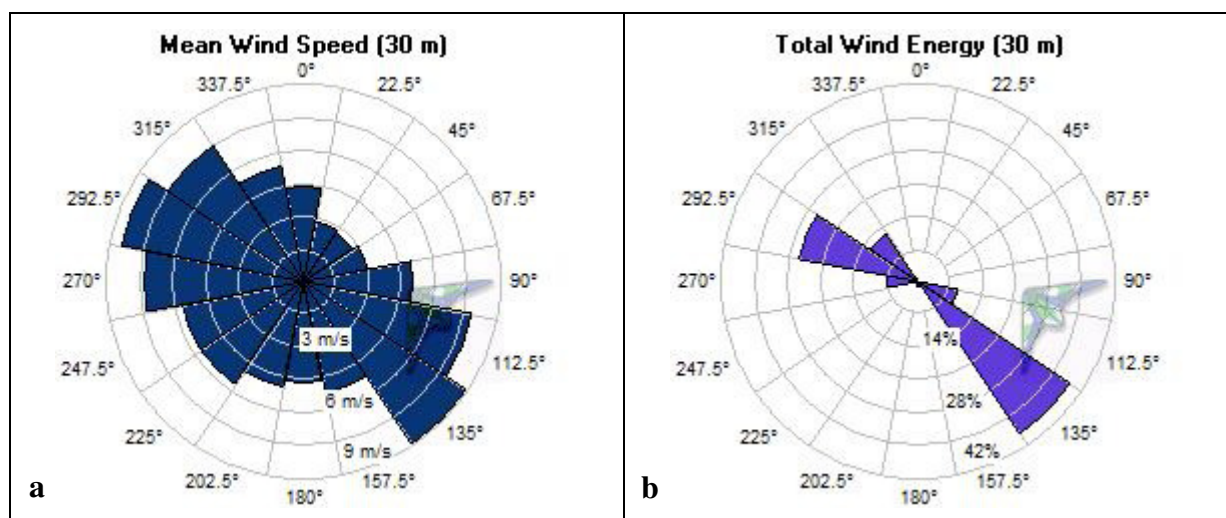


Figura 3-4 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para a estação P_042 h = 30 m

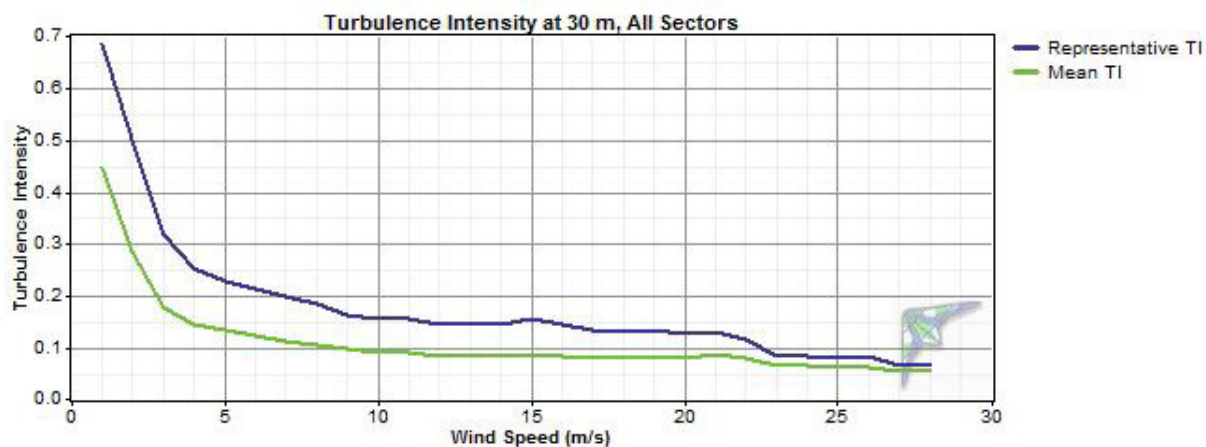


Figura 3-5 – Variação da intensidade de turbulência para a estação P_384 a 30 m

Na Figura 3-5 a série de dados *Mean TI* (linha a verde) representa a evolução dos valores da IT obtidos a partir da fórmula 3.1. A *Representative TI* é igual ao percentil 90 dos valores de intensidade da turbulência, significando o valor abaixo do qual de encontram 90% dos valores. Como esperado que os mais elevados níveis de IT registam-se para as velocidades de vento mais baixas.

3.3.2 Estação P_384

O período de dados seleccionado para caracterizar o regime de ventos no local onde foi instalada a estação P_384 é de um ano, entre Março de 2007 e Maio de 2008 e possuem uma disponibilidade de 96,27 % ou 83,93 % se considerarmos apenas velocidades acima de 1 m/s. Os resultados após tratamento dos dados estão apresentados na Tabela 3-2 – Resultados das medições $h = 30$ m.

Tabela 3-2 – Resultados das medições $h = 30$ m

P_384		
Altura de medição [m]	30	
Período de mediação [dias]	365	
Registos válidos (%)	Dir	Vmed
	96.27	83.93
Velocidade média [m/s]	5.81	
Intensidade turbulência [%]	21.03	
Distribuição de Weibull	A [m/s]	6.46
	k	1.45
Filtro dados	$1 \leq V_{med} < 90$	
	$0 \leq Dir \leq 360$	

Na Figura 3-6 mostram-se a rosa de frequência e o histograma de velocidade obtidos a partir das medições efectuadas a 30 m do solo. Verifica-se novamente que os ventos dominantes ocorrem nos sectores de Noroeste e Sudeste. A distribuição de Weibull neste caso é caracterizada pelo factor de escala (A) de 6,46 m/s e factor de forma (k) de 1,45.

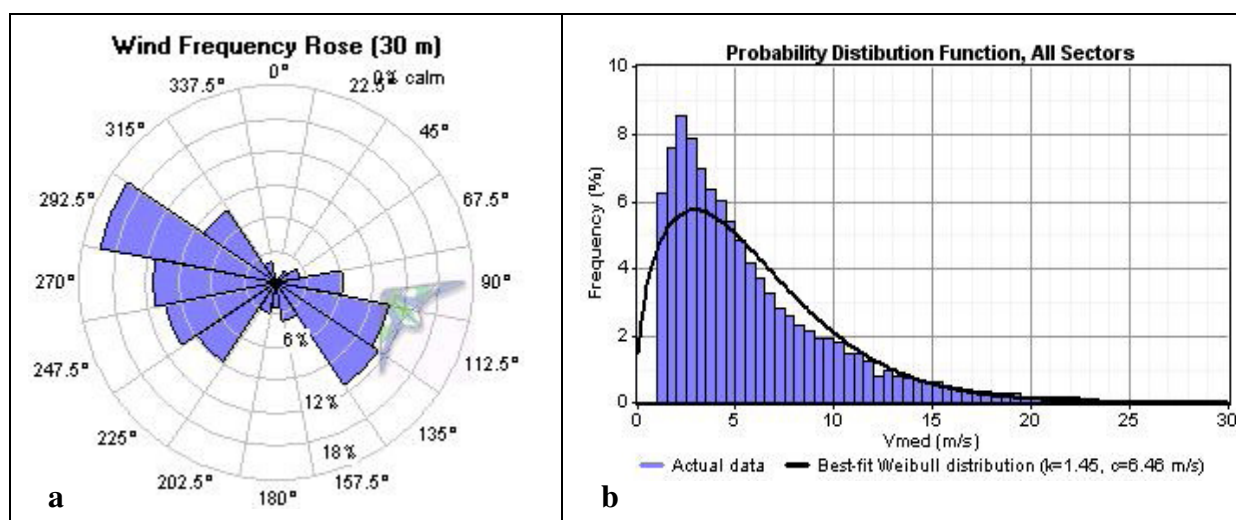


Figura 3-6 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_384 h = 30 m

A Figura 3-7 apresenta as velocidades médias registadas e a percentagem da energia disponibilizada pelo escoamento em cada um dos sectores da rosa-dos-ventos. Verifica-se que o rumo de Noroeste 292,5° é o mais frequente mas o rumo mais energético é o de Este 90°.

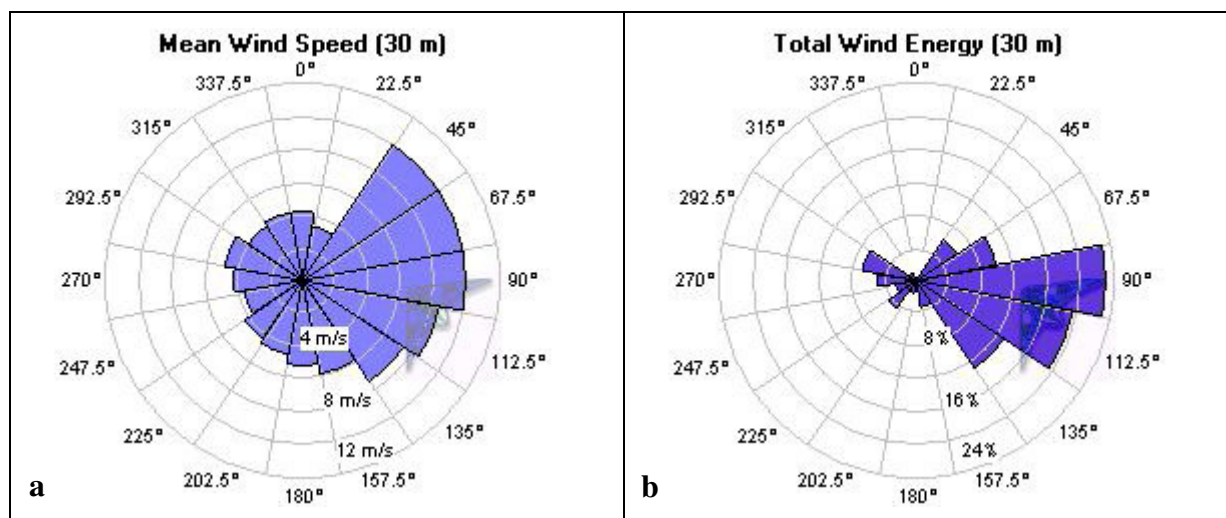


Figura 3-7 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_384 h = 30 m

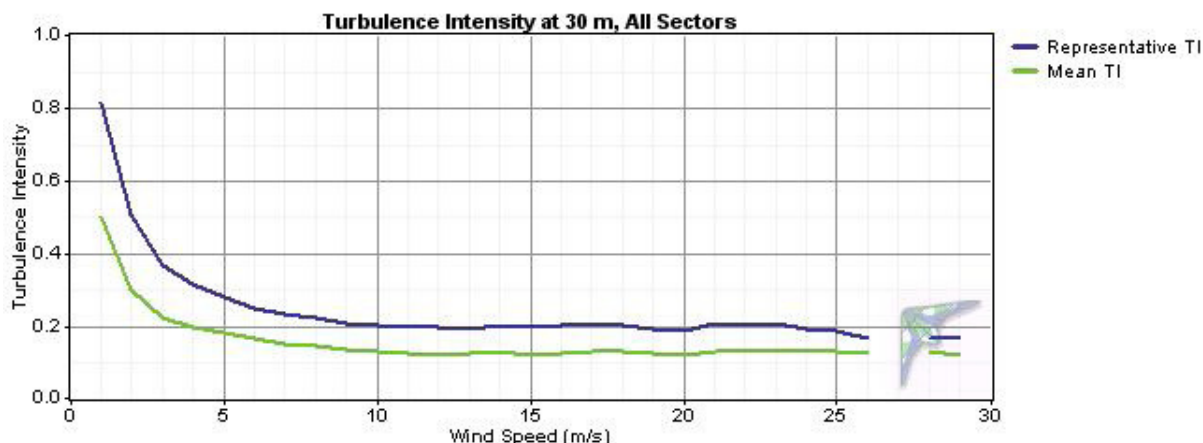


Figura 3-8 – Variação da intensidade de turbulência para a estação P_384 a 30 m

A intensidade de turbulência média calculada ronda os 21 % para esta altura de medição. Como esperado a intensidade de turbulência é menor para velocidades elevadas aumentando para velocidades mais pequenas.

Para a segunda altura de medição os resultados após tratamento dos dados estão apresentados na Tabela 3-3 com a mesma percentagem de dados válidos.

Tabela 3-3 – Resultados das medições h = 60 m

P_384		
Altura de medição [m]	60	
Período de mediação [dias]	365	
Registos válidos (%)	Dir	Vmed
	96.27	85.81
Velocidade média [m/s]	5.99	
Intensidade turbulência [%]	20.44	
Distribuição de Weibull	A [m/s]	6.67
	k	1.48
Filtro dados	1 ≤ Vmed < 90	
	0 ≤ Dir ≤ 360	

Na Figura 3-9 mostram-se a rosa de frequência e o histograma de velocidade obtidos a partir das medições efectuadas a 60 m do solo.

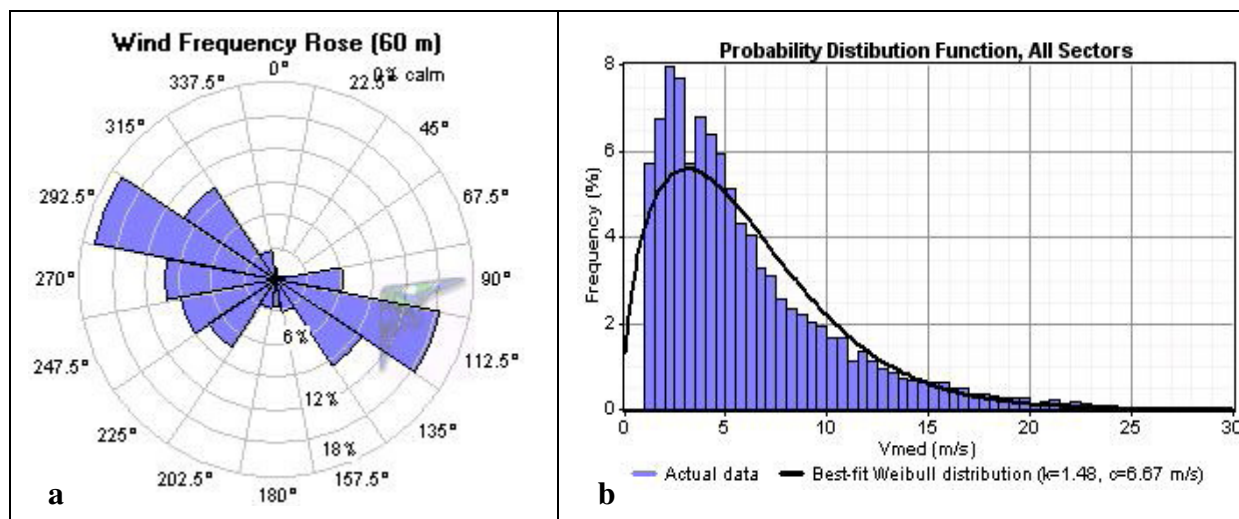


Figura 3-9 – Rosa de Frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_{384h} = 60 m

A distribuição de Weibull é caracterizada pelo factor de escala (A) de 6,67 m/s e por um factor de forma (k) de 1,48. Os ventos mais frequentes ocorrem nos sectores de Noroeste e Sudeste.

A Figura 3-10 apresenta as velocidades médias registadas e a percentagem da energia disponibilizada pelo escoamento em cada um dos sectores da rosa-dos-ventos. Verifica-se que os rumos de Noroeste 292,5° e o rumo de Sudeste 112,5° são os mais frequentes, destes dois só o último é o mais energético.

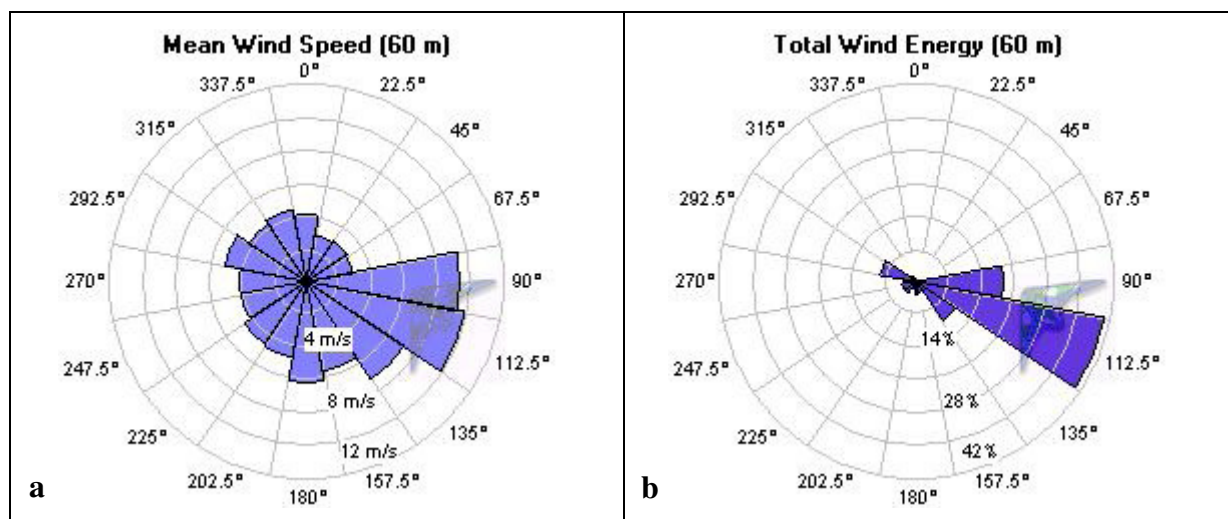


Figura 3-10 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_{384 h} = 60 m

A intensidade de turbulência para esta altura de medição é muito semelhante da anteriormente medida par os 30 m passando dos 21 % para os 20,5 %.

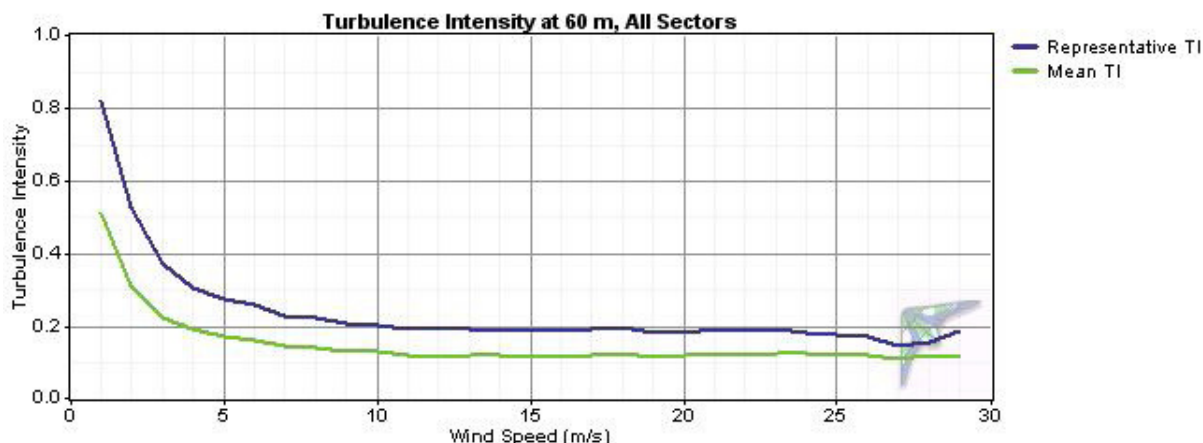


Figura 3-11 – Variação da intensidade de turbulência para a estação P_384 a 60 m

3.3.3 Estação P_385

O período de dados seleccionado para caracterizar o regime de ventos no local onde foi instalada a estação P_385 é de um ano, entre Março de 2007 e Maio de 2008, e possuem uma disponibilidade de 96,29 %, reduzindo-se para os 93,28%, se considerarmos apenas velocidades acima de 1 m/s. Os resultados estão apresentados na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 – Resultados das medições h = 30 m

P_385		
Altura de medição [m]	30	
Período de mediação [dias]	365	
Registos válidos (%)	Dir	Vmed
	96.29	93.28
Velocidade média [m/s]	7.17	
Intensidade turbulência [%]	14.14	
Distribuição de Weibull	A [m/s]	8.11
	k	1.98
Filtro dados	$1 \leq V_{med} < 90$	
	$0 \leq Dir \leq 360$	

Na Figura 3-12 mostram-se a rosa de frequência e o histograma de velocidade obtidos a partir das medições efectuadas a 30 m do solo. Verificam-se ventos predominantes nos sectores de Noroeste e Sudeste.

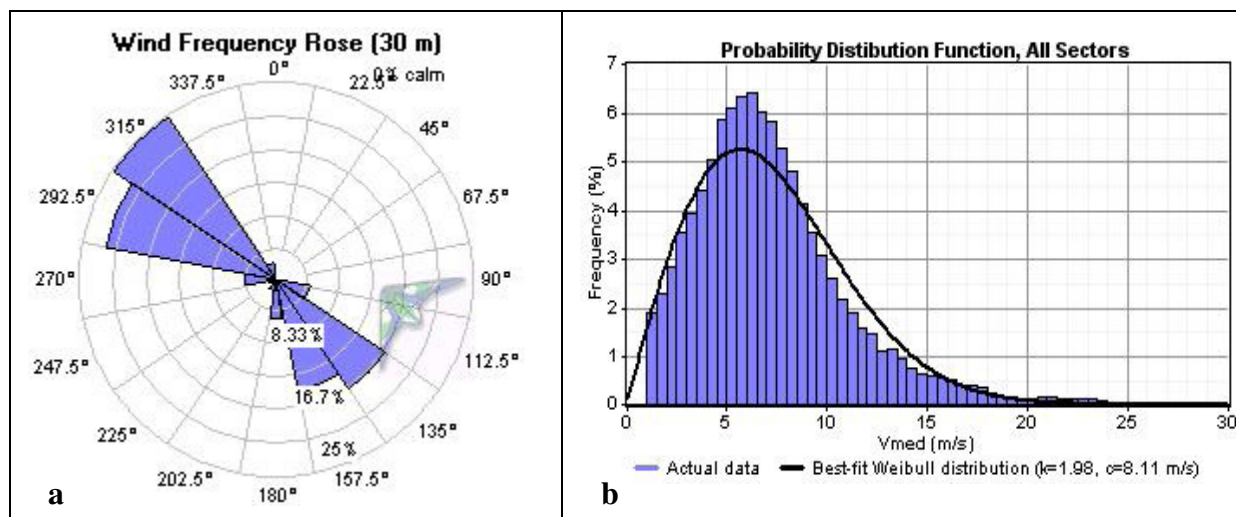


Figura 3-12 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P_385 h = 30 m

A distribuição de Weibull no período em análise é caracterizada pelo factor de escala (A) de 8,11 m/s e por um factor de forma (k) de 1,98.

A Figura 3-12 apresenta as velocidades médias registadas e a percentagem da energia disponibilizada pelo escoamento em cada um dos sectores da rosa-dos-ventos. Verifica-se que os rumos de Noroeste 292,5° e 315° e o rumo de Sudeste 135°, para além de serem os mais frequentes são os mais energéticos.

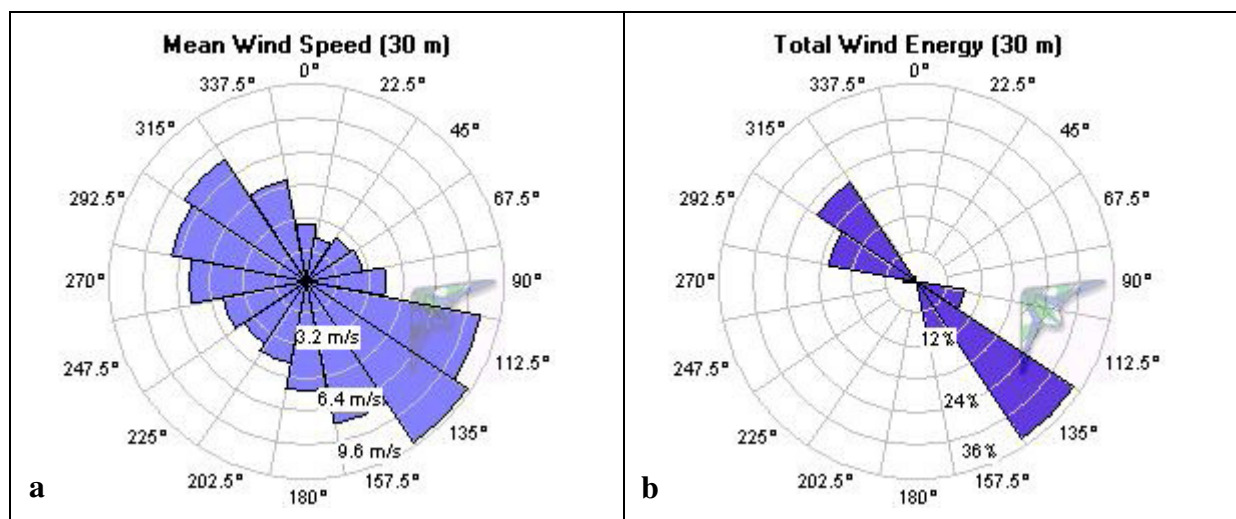


Figura 3-13 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P_385 h = 30 m

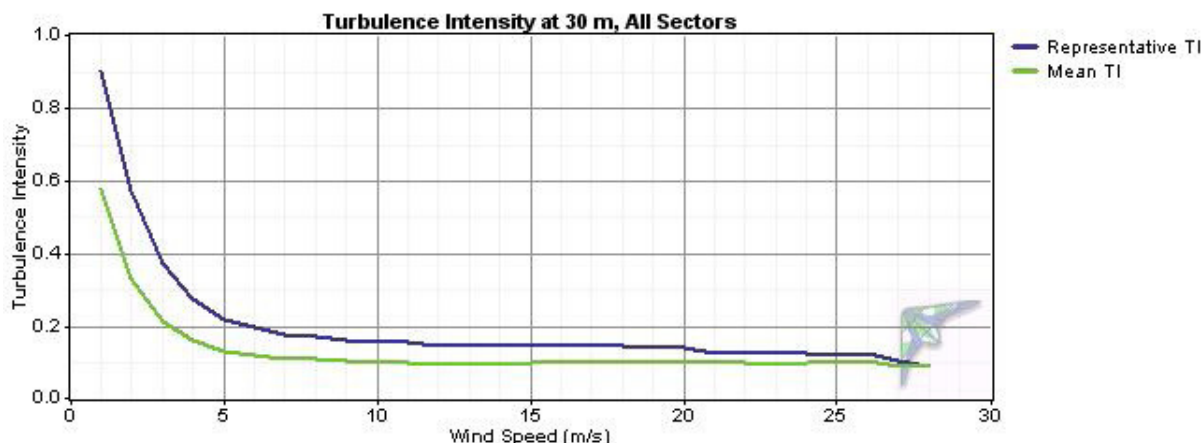


Figura 3-14 – Variação da intensidade de turbulência para P_385 h = 30 m

Para a segunda altura de medição os resultados após tratamento dos dados estão apresentados na Tabela 3-5 com a mesma percentagem de dados válidos. A velocidade média a 60 m do solo foi de 7,02 m/s e a intensidade de turbulência foi de aproximadamente 14 %.

Tabela 3-5 – Resultados das medições h = 60 m

P_385		
Altura de medição [m]	60	
Período de mediação [dias]	365	
Registos válidos (%)	Dir	Vmed
	96.29	93.38
Velocidade média [m/s]	7.02	
Intensidade turbulência [%]	14.44	
Distribuição de Weibull	A [m/s]	7.93
	k	1.93
Filtro dados	1 ≤ Vmed < 90	
	0 ≤ Dir ≤ 360	

Na Figura 3-15 mostram-se a rosa de frequência e o histograma de velocidade obtidos a partir das medições efectuadas a 30 m do solo. Os ventos do sector de Noroeste e Sudeste têm uma grande frequência de ocorrências continuando o padrão verificado. A distribuição de Weibull é caracterizada pelo factor de escala (A) de 7,93 m/s e por um factor de forma (k) de 1,93.

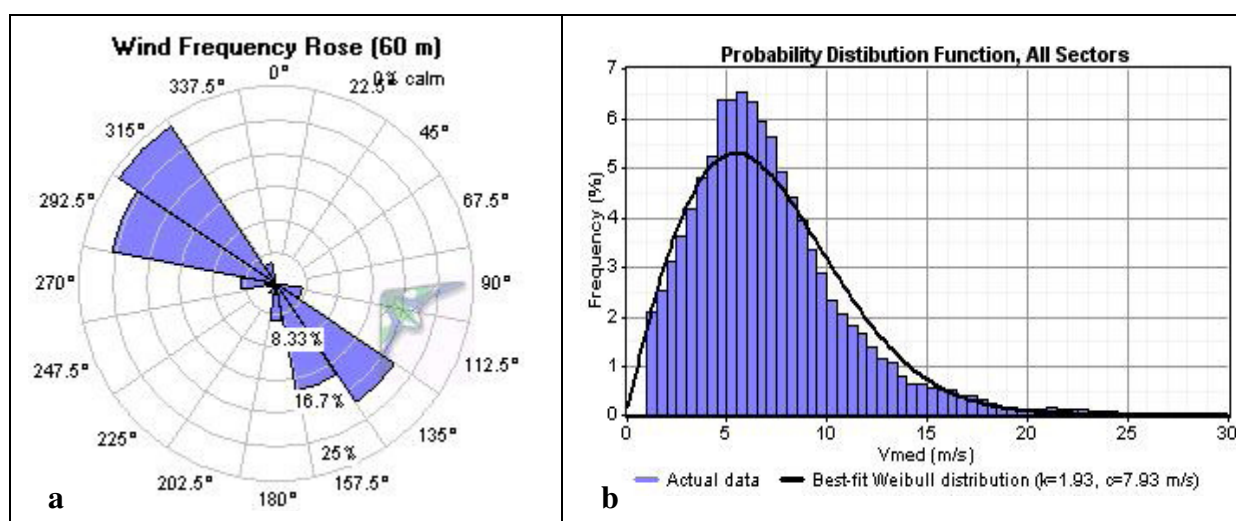


Figura 3-15 – Rosa de frequência (a) e histograma de velocidades (b) para P₃₈₅ h = 60 m

A Figura 3-16 apresenta as velocidades médias registradas e a percentagem da energia disponibilizada pelo escoamento em cada um dos sectores da rosa-dos-ventos. Verifica-se que os rumos de Noroeste 292,5° e 315° e o rumo de Sudeste 135°, para além de serem os mais frequentes são os mais energéticos.

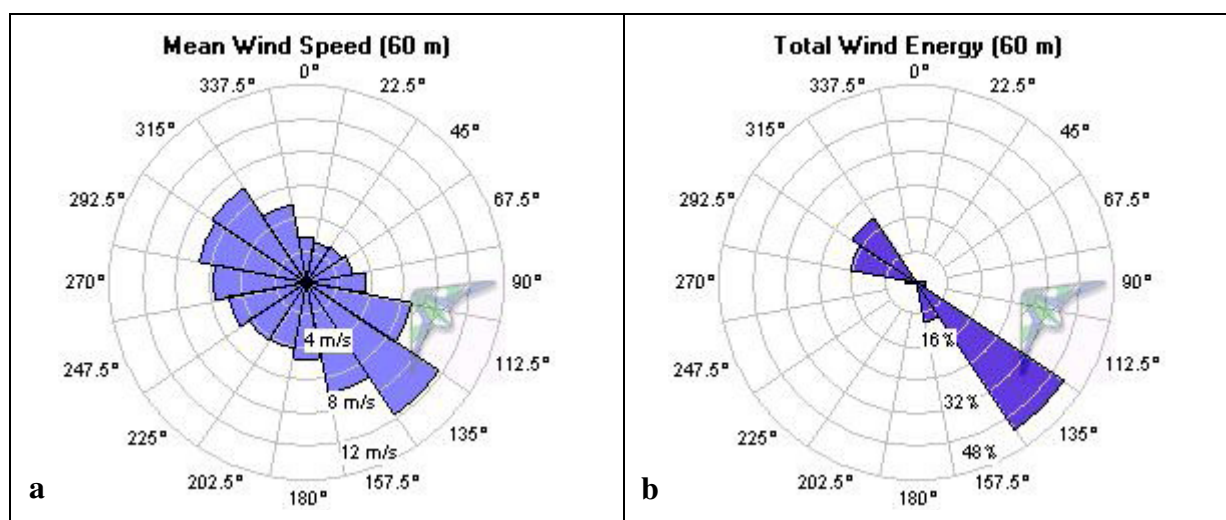


Figura 3-16 – Rosa de velocidade média (a) e energia (b) para P₃₈₅ h = 60 m

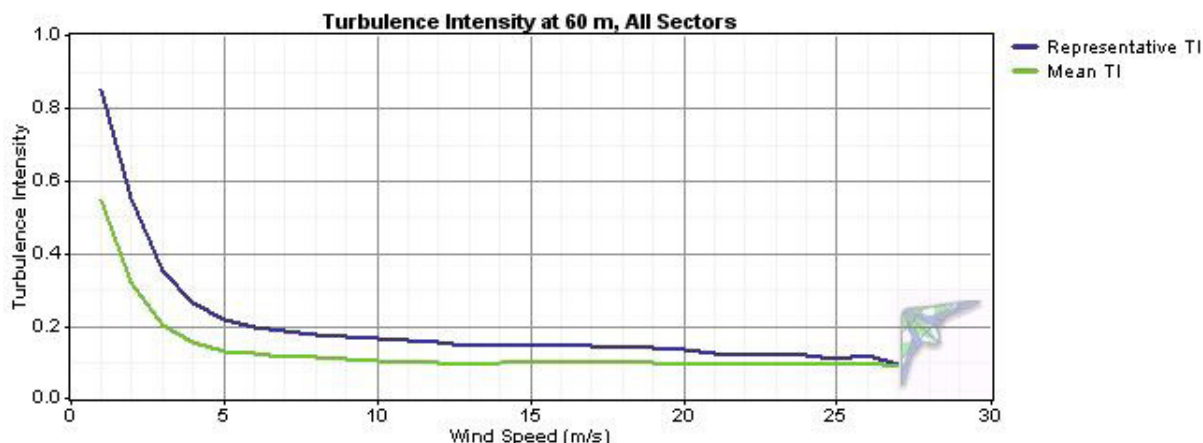


Figura 3-17 – Variação intensidade turbulência para P_385 h = 60 m

A variação da intensidade de turbulência para a altura de medição a 60 m segue a mesma tendência observada para uma altura de 30 m verificando-se que para velocidades acima de 5m/s a intensidade de turbulência fica abaixo dos 20%.

3.4 Observações finais

Com base nas medições de campo mostradas atrás conclui-se que os ventos mais frequentes são os dos sectores Sudeste e Noroeste, direcções que serão objecto das simulações computacionais do capítulo seguinte. Porém, a análise apresentada, típica dos estudos de análise de recurso eólico, dizem respeito a valores médios, que abrangem períodos longos, com pelo menos um ano de duração, e podem não reproduzir a simultaneidade do vento em dois ou mais mastros. Por exemplo, rosas-dos-ventos com ventos dominantes no sector 120° e 210° em dois mastros (A e B) pode não significar que quando o vento sopra de 120° no mastro a sua direcção no mastro B seja de 210° , ou que entre um e o outro mastro o vento rode 90° .

As rosas-dos-ventos na análise de recurso eólico dizem apenas que os ventos mais frequentes nos mastros A e B são de 120° e 210° , mas podem ocorrer em momentos diferentes. Os resultados das simulações, pelo contrário, dizem respeito a valores que ocorrem em condições de vento bem definidas com uma semelhança maior com os ventos existentes durante 10 min do que com os ventos médios anuais.

Estes factos terão de ser tomados em conta ao se realizar a comparação dos resultados medidos com os resultados obtidos utilizando técnicas de CFD.

4 . Simulação computacional

4.1 Introdução

Uma breve descrição do programa e das características particulares que se acharam relevantes é feita neste capítulo tais como a definição de “Mapping” e Síntese. Depois desta parte inicial será encontrada a definição dos parâmetros das simulações realizadas para obter os resultados pretendidos.

4.2 Descrição da ferramenta numérica

Como já foi referido atrás o Meteodyn WT é um *software* comercial que para resolver as equações de Navier-Stokes, sob a forma de médias de Reynolds (RANS) para fluido isotérmico e incompressível. O programa incorpora o “*solver*” MIGAL. O MIGAL é um “*solver*” iterativo de equações lineares que aplica um algoritmo que simultaneamente actualiza a velocidade do vento e a pressão através de todo o domínio computacional (resolução acoplada) (“coupled resolution”).

A principal suposição do programa passa pela consideração de que o escoamento não é considerado dependente do número de Reynolds (significando que as características direccionais do escoamento não são dependentes da velocidade do vento).

Após se ter definido um projecto (Pré-processamento), fornecendo dados de entrada (como por exemplo: dados topográficos, tamanho do parque e localização...), condições de forte vento são simuladas para uma série de direcções sinópticas (Computações direccionais).

Assim que os resultados direccionais são obtidos, os resultantes *speed-up factors* (V_h) e desvios são usados de forma a transferir os dados estatísticos medidos do vento para todos os pontos de resultado calculados (referido no programa como “*Synthesis*” ou Síntese em português)

O *speed-up factor* é calculado a partir da equação (4.1) sendo V_{ref} uma velocidade de referência definida a 10 m do solo sobre terreno plano.

$$\frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{V_{ref}} \quad (4.1)$$

Dos resultados direccionais, ainda se obtém outros resultados de interesse nomeadamente o desvio do escoamento, a inclinação do escoamento e a intensidade da turbulência.

Uma vez obtida a descrição estatística do vento num ponto de resultado, as características das turbinas (ou aerogeradores) são usadas para obter a produção esperada e calcular os efeitos de esteira.

Na parte inicial de pré processamento para além do referido anteriormente, também se definem as localizações dos mastros e das turbinas que o programa designa como “*Result points*”, neste podemos escolher definir pontos em coordenadas x,y,h ou x,y,z onde o que varia é a definição de altura escolhendo entre definir altura do solo para a primeira e altitude para a segunda e podemos ainda aqui definir os perfis verticais escolhendo o ponto, o degrau e a altura dos pontos do perfil.

Uma particularidade deste programa é o facto de realizar um refinamento automático nos pontos de resultando, variando a densidade da malha conforme o número de pontos quando se mantêm constantes os parâmetros da malha. Relativamente ao refinamento da malha, o programa permite um refinamento da malha numa determinada zona do parque ou mesmo sobre o parque chamado de “*Mapping*”, que limita essa zona às resoluções mínimas horizontais e verticais definidas.

No Meteodyn WT são sugeridas resoluções mínimas padrão que são uma resolução horizontal mínima de 25 m com um “coeficiente de expansão” de 1.1 e uma resolução mínima vertical mínima de 4 m. O “coeficiente de expansão” é usado para diminuir a resolução horizontal da malha no campo afastado dos pontos de interesse.

4.3 Definição das simulações

O tamanho do domínio escolhido foi de 16×16 km, com centro no rectângulo que limita o parque, este será o tamanho padrão para as simulações realizadas. Com este tamanho de domínio, o escoamento antes de chegar à área do parque, percorre pelo menos 6 km, que se

espera que seja o suficiente para incluir as características orográficas de maior relevo que influenciem o escoamento. Todas as simulações foram feitas em regime neutro.

Para realização deste trabalho, foi definido que o tamanho da malha não fosse muito elevado de forma a permitir de certa forma a comparação com outros trabalhos. Para atingir esse objectivo foram realizadas diversas simulações na fase de aprendizagem do programa até se obter um tamanho de malha desejável. A simulação final tem como pontos de resultado as localizações das 13 turbinas o que com os 5 pontos de medição das estações meteorológicas dá um total de 18 pontos. Os parâmetros definidos no programa são os seguintes:

- Resolução mínima horizontal: 25 m
- Resolução mínima vertical: 4 m
- Coeficiente de expansão horizontal: 1,1
- Parâmetro de verticalidade: 0,7
- Classe de estabilidade térmica: 2 (2 = regime neutro)
- Pontos de Resultado: 18
- Mapping: Não
- Massa volúmica: 1.225 kg/m^3

Na tabela 3-8 pode-se ver para cada direcção que foi simulada o tamanho da malha gerada e o tempo total gasto pelo computador para o cálculo de todas as simulações apresentadas na tabela simulação estando apresentado na coluna de Tempo de computação.

Tabela 3-6 – Direcções simuladas

Direcção simulada	Convergência	Malha	Duração Global	Tempo de computação
105.0°	97.4%	1155462 nós (154 × 183 × 41)	30mn	21mn 30sec
112.5°	99.9%	1066840 nós (149 × 179 × 40)	24mn	17mn 12sec
120.0°	99.3%	1113840 nós (153 × 182 × 40)	26mn	18mn 14sec
127.5°	99.7%	1043400 nós (141 × 185 × 40)	24mn	16mn 52sec
135.0°	98.5%	1011816 nós (141 × 184 × 39)	24mn	16mn 40sec
142.5°	98.9%	1075035 nós (149 × 185 × 39)	25mn	17mn 19sec
285.0°	99.1%	1112640 nós (152 × 183 × 40)	26mn	18mn 08sec
292.5°	99.5%	1084720 nós (149 × 182 × 40)	25mn	17mn 50sec
300.0°	99.0%	1092000 nós (150 × 182 × 40)	26mn	18mn 04sec
307.5°	99.9%	1043400 nós (141 × 185 × 40)	23mn	16mn 54sec
315.0°	100%	1006317 nós (141 × 183 × 39)	21mn	14mn 54sec
322.5°	100%	1101243 nós (151 × 187 × 39)	21mn	13mn 25sec
Totais			4h 54mn	3h 27mn 24sec

Para além desta simulação aqui apresentada foi realizada uma segunda em que o único parâmetro que se mudou foi o regime térmico que passou de 2 (neutro) para 3 (estável) para testar a mudança do regime térmico nos resultados.

5 . Análise de resultados

5.1 Introdução

Este capítulo está organizado em quatro partes:

1. Nesta parte será feita a comparação entre os resultados medidos e os calculados para validar a precisão do modelo;
2. Para a segunda parte, uma análise dos resultados obtidos agregados para toda a rosa-dos-ventos sendo portanto uma comparação de valores médios anuais do vento;
3. De seguida, o “*layout*” do parque será avaliado segundo restrições impostas pelos fabricantes/normas da indústria;
4. Por fim será testada a influência nos resultados, a activação no programa da simulação dos efeitos de esteira e mudanças de regimes térmicos.

5.2 Validação dos resultados

Para a comparação entre resultados computacionais e medições é preciso que estes resultados sejam submetidos a um tratamento apropriado pelo motivo que foi apresentado no final do capítulo 3.

A questão é saber qual a direcção e intensidade do vento no mastro B que ocorre simultaneamente para uma direcção e intensidade do vento em A, o mastro de referência. Para uma simulação do vento de por exemplo 285° na secção de entrada do escoamento, é determinada a direcção do vento no local da estação P_042, o mastro de referência. Sabida esta direcção, θ_1 , é construído um subconjunto de todos os dados do vento em que a direcção medida na P_042 é igual a $\theta_1 \pm 3^\circ$. De seguida, são determinadas as direcções e intensidades de vento nos restantes mastros que ocorreram simultaneamente com o subconjunto atrás definido.

Para realizar a comparação de velocidades foi preciso também alguma manipulação, e decidiu-se realizar essa comparação a partir de um quociente de velocidades, em que, o que será utilizado como termo de comparação, não será as velocidades absolutas mas sim o quociente entre a velocidade (ou *speed-up factor*) na estação de referência, e a velocidade ou (speed-up factor) na outra estação criando a variável RV (relação de velocidades). Exemplificando fica o seguinte: em vez de se comparar a velocidade medida em B (V_{b_med}), com a velocidade calculada em B (V_{b_calc}), irá ser antes comparado o quociente entre a velocidade medida na estação de referência A (V_{a_med}) e a velocidade medida em B com, a velocidade calculada na estação de referência A (V_{a_calc}) e a velocidade calculada em B. Colocando em forma de equação fica: V_{a_med}/V_{b_med} com V_{a_calc}/V_{b_calc} em vez de V_{b_med} com V_{b_calc} .

5.3 Comparação para estação de referência P_042

O observando a Figura 6-1 a) relativa à comparação das direcções medidas e calculadas, pode-se constatar que existe alguma concordância entre os dados medidos e calculados nos dois sectores.

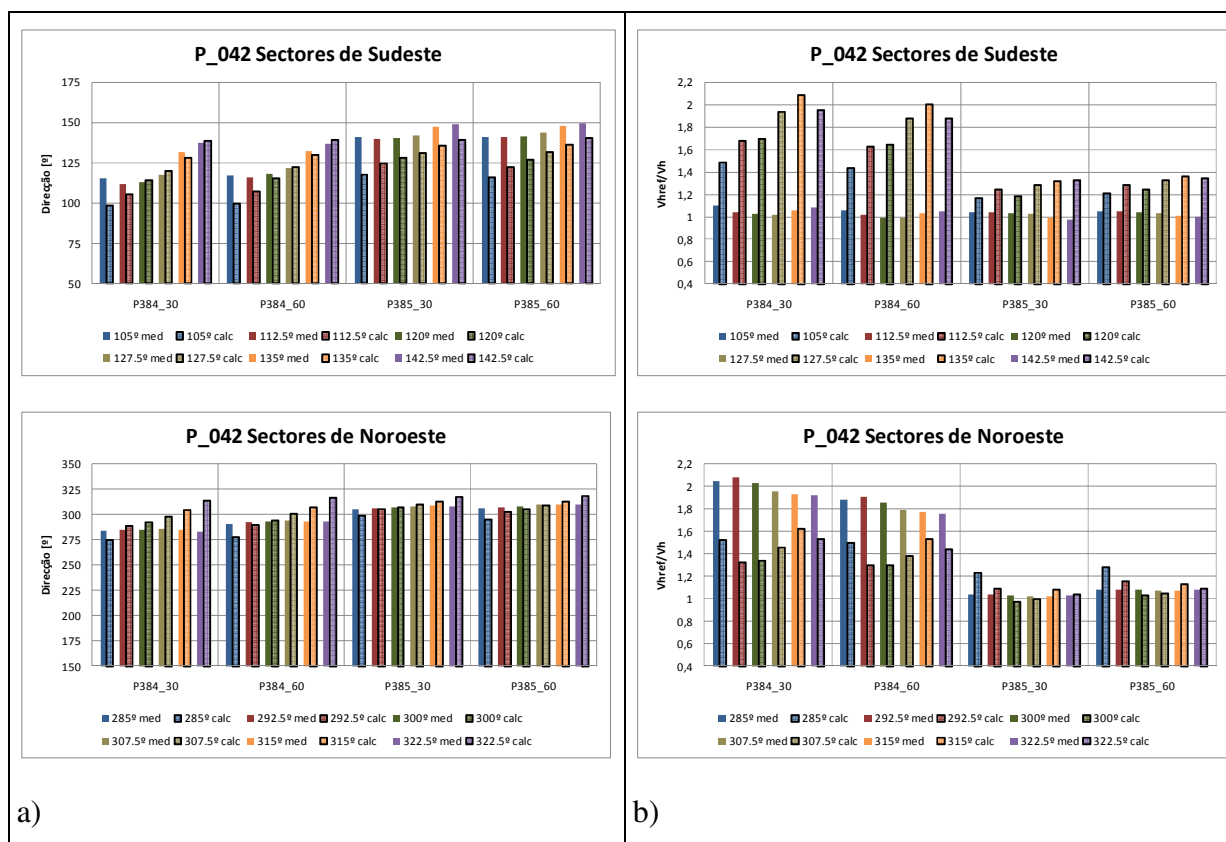


Figura 5-1 – Direcções do vento a) e relação de velocidades b), medidas e calculadas nas estações P_384 e P_385, condicionais à direcção do vento em P_042

Para os rumos de Sudeste, na maior parte das direcções, as previsões são realizadas por defeito registando-se a maior diferença na direcção de 105° para a estação P_385 a 60 m de -25° sendo nesta estação onde se registam as maiores diferenças mas com tendência a diminuir conforme se avança da direcção de 105° até a direcção 142,5°, tendência essa verificada também para a outra estação. Para os rumos de Noroeste, as previsões são feitas maioritariamente por excesso, verificando-se um valor máximo de 31° para a estação P_384 a 30 m.

Quanto à variável RV, para as direcções de Sudeste verificam-se grandes diferenças para a estação P_384 nas duas alturas de medição registando-se o menor valor na direcção de 105° de 35 % a 60 m, aumentando gradualmente para as restantes direcções alcançando uma diferença máxima de 97% na direcção 135° a 60 m. Para a estação P_385, ainda nos sectores de Sudeste, verifica-se a mesma tendência mas registando-se neste caso diferenças menores, sendo a diferença mínima registada de 16% a 60 m e a máxima de 36% a 30 m na direcção 142,5°. Para as direcções de Noroeste inverteu-se a tendência verificada nas direcções de Sudeste de previsões por excesso. Quanto às diferenças verificadas, a maior (-37 %) encontra-se na direcção 292,5 a 30 m, em média estas diferenças rondam os -26 %.

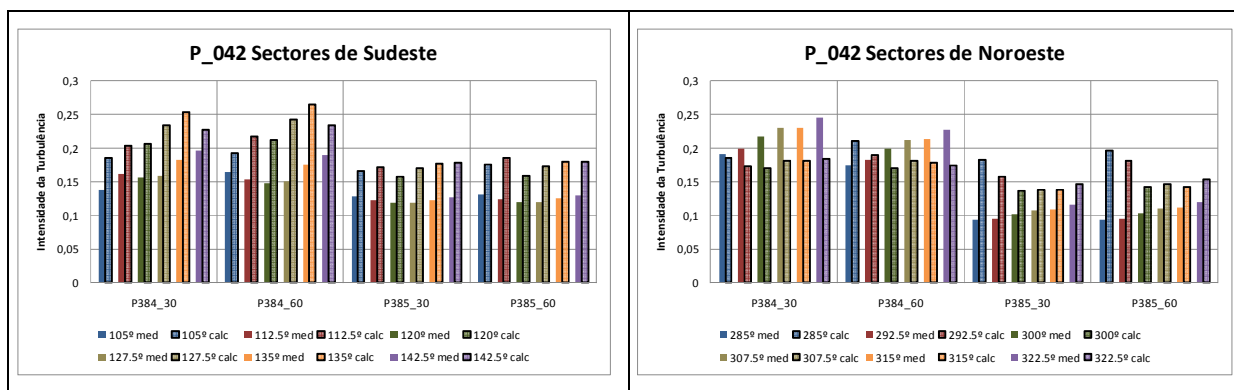


Figura 5-2 – Intensidade da turbulência medida e calculadas nas estações P_384 e P_385, condicionais à direcção do vento em P_042

Como se pode ver na figura acima e na Tabela C 1 em anexo, para a intensidade da turbulência, relativamente às direcções de Sudeste existe uma tendência de previsão por excesso registando-se para P_384 uma diferença máxima de 61% na direcção 127,5° e mínima de 17% na direcção 105° à altura de medição de 60 m. Para a estação P_385 a 60 m regista-se a diferença máxima de 49% para a direcção 112,5 e a mínima de 32% para a direcção de 120°.

5.4 Comparação para estação de referência P_384

Para esta estação de referência a análise feita não será tão detalhada quanto a anterior sendo essa análise remetida para a consulta das tabelas em anexo (Tabela C 2 e Tabela C 4).

Para a estação P_384 como referência, analisando as diferenças para as direcções, a maior diferença absoluta registada em Sudeste é de -18° e para Noroeste é de 25° .

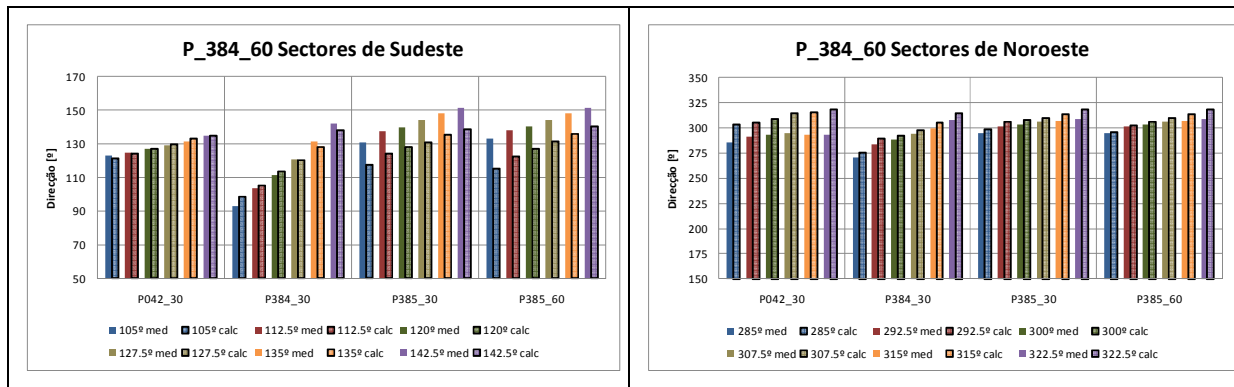


Figura 5-3 – Direcções do vento medidas e calculadas nas estações P_384 a 30 m do solo, P_042 e P_385, condicionais à direcção do vento em P_384 a 60 m do solo

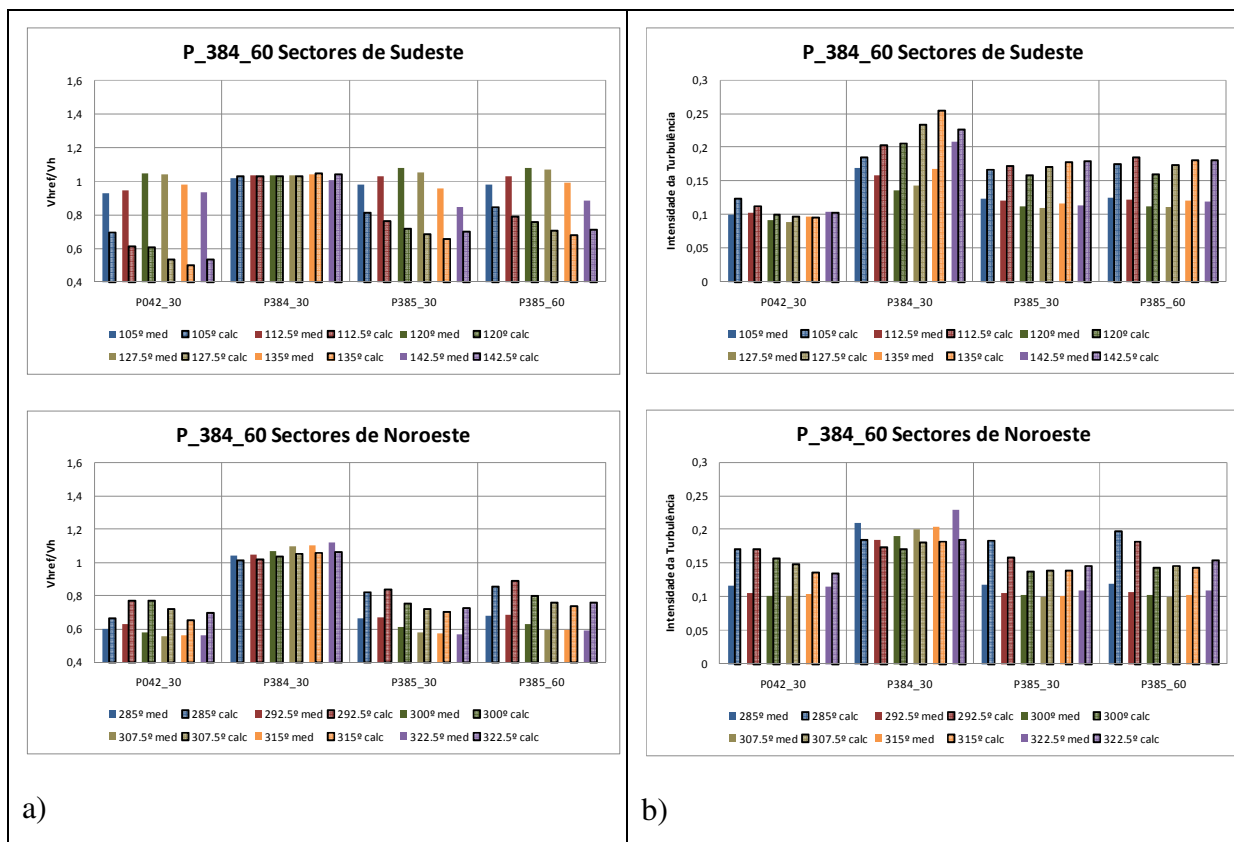


Figura 5-4 – Relação de velocidades a) e intensidade da turbulência b), medidas e calculadas nas estações P_042, P_384 a 30 m do solo e P_385, condicionais à direcção do vento em P_384 a 60 m do solo

Analisando a relação de velocidades, a maior diferença relativa entre os valores medidos e calculados é de -48,86% em Sudeste e de 32,88% Noroeste.

Relativamente à IT a maior diferença regista-se entre os sectores de Sudeste com 87,93%, para Noroeste é de 70,47%.

5.5 Comparação para estação de referência P_385

Para esta estação de referência a análise feita não será tão detalhada quanto a realizada para a estação P_042 sendo essa análise remetida para a consulta mais atenta das tabelas em anexo (Tabela C 3 e Tabela C 5).

Para a estação P_385 como referência, analisando as diferenças para as direcções, a maior diferença absoluta registada em Sudeste é de 28° e para Noroeste é de 21°

Analisando a relação de velocidades, a maior diferença relativa entre os valores medidos e calculados é de -48,86% em Sudeste e de 32,88% Noroeste.

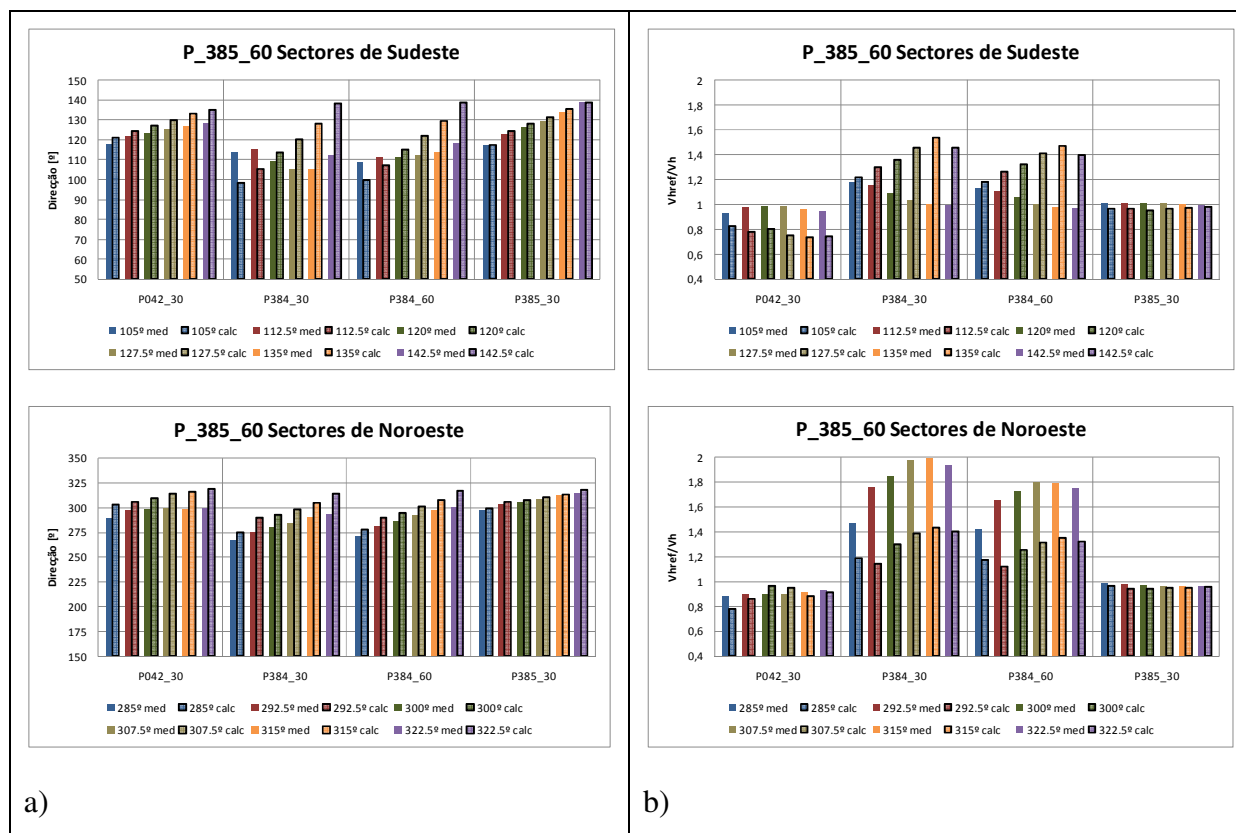


Figura 5-5 – Direcções do vento a) e relação de velocidades b), medidas e calculadas nas estações P_042, P_384 e P_385 a 30 m do solo, condicionais à direcção do vento em P_385 a 60 m do solo

Relativamente à IT a maior diferença regista-se entre os sectores de Noroeste com 89,57% como se pode verificar analisando a Tabela C 5, para Sudeste é de 70,47%.

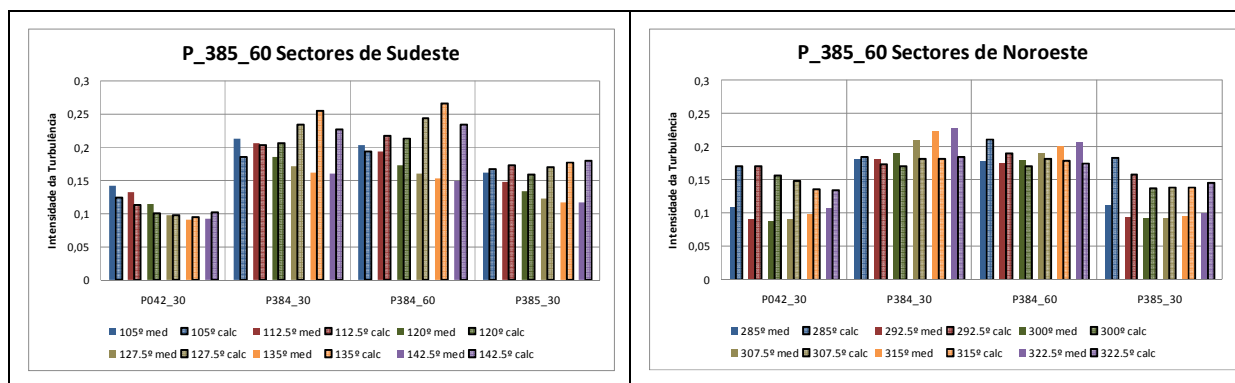


Figura 5-6 – Intensidade da turbulência medida e calculada nas estações P_042, P_384 e P_385 a 30 m do solo, condicionais à direcção do vento em P_385 a 60 m do solo

5.6 Avaliação do layout do parque

Uma das vantagens principais de estudar o escoamento sobre terreno complexo utilizando simulações numéricas é obter mais informações que podem complementar aquela obtida através das medições de campo. A análise do posicionamento dos aerogeradores será feita segundo os valores de referência indicados mais adiante. Para guiar a avaliação e verificar padrões de escoamento, foram construídos mapas 2D cobrindo a área do parque e perfis verticais nas posições dos aerogeradores para as grandezas de interesse, estando apresentados nos Anexos A e B. Relativamente aos aerogeradores em si, estes possuem uma potência de 2000 kw, a altura até o centro da turbina é de 85 m e o diâmetro das pás é de 82 m.

Uma das grandezas de interesse, o *shear factor* (SF) não fazia parte do *output* dos dados do programa. Para o seu cálculo a fórmula apresentada (5.1) foi utilizada:

$$SF = \alpha_k = \frac{\log\left(V_{h\ k+1}/V_{h\ k-1}\right)}{\log\left(Z_{ans\ k+1}/Z_{ans\ k-1}\right)} \quad (5.1)$$

Em que α_k é o expoente da lei de potência do perfil de velocidades, V_h é a velocidade horizontal do vento e Z_{ans} é a altura normal ao solo.

5.6.1 Avaliação individual

Os valores referência que poderão inviabilizar a instalação das turbinas utilizados para a análise individual do posicionamento de cada turbina, são os seguintes:

- intensidade da turbulência $> 18\%$
- $0,00 > shear\ factor > 0,20$
- $-8^\circ > \text{inclinação do escoamento} > 8^\circ$

Relativamente à **Turbina 1** o único parâmetro desfavorável é o SF, com os valores a 44 m de altura a variarem entre os -0,05 e 0,09 com tendência de descida para alturas superiores mas mantendo-se inferiores a zero. Fazendo uma análise dos valores do SF médio⁴ (ver Tabela C 6), vê-se que excede o valor de referência em todas as direcções.

A **Turbina 2** apresenta um caso semelhante mas menos grave relativamente ao SF. As únicas direcções em que a partir de aproximadamente 44 m do solo registam valores dentro dos parâmetros são a de 105° e $112,5^\circ$. A Figura B 8 mostra que a partir dos 50 m os valores na direcção 285° entram dentro dos valores de referência ocorrendo o mesmo para a direcção de 285° mas só a partir dos 65 m com valores muito perto de zero.

Quanto à **Turbina 3**, excede o limite para IT na direcção 285° a 85 m do solo. O parâmetro mais problemático é o SF tendo para as direcções de 120° a 120° a partir dos 60 m valores dentro dos parâmetros. Ainda no SF mas analisando as direcções de Noroeste a direcção de 285° é a menos problemática atingindo valores aceitáveis a partir do 55 m como se pode ver na Figura B 9, as direcções mais problemáticas são as direcções de 315° e $322,5^\circ$.

Relativamente à **Turbina 4** a IT apresenta valores da ordem dos 20% na direcção de 285° em todas as alturas e na direcção $292,5^\circ$ a 44 m. Para SF os valores a partir dos 60 m para as direcções de 105° a 120° , 285° a 300° e 315° , entram em valores dentro dos parâmetros. As direcções problemáticas são as de $127,5^\circ$ a $142,5^\circ$ para Sudeste e para Noroeste as direcções $307,5^\circ$ e $322,5^\circ$.

Para a **Turbina 5** verifica-se novamente na direcção 285° problemas de turbulência registando valores acima de 20% nas três alturas. Nas direcções 105° e $292,5^\circ$ só ocorrem nas alturas 44 m e 85 m. Quanto ao SF regista-se valores a 44 m do solo que não excedem os -

⁴ Shear factor calculado utilizando as velocidades inferior e superior da área de varrimento do rotor.

0.05 e sensivelmente a partir de mais ou menos 60 m todas entram nos parâmetros (ver Figura B 10) com excepção das direcções 142,5° e 322,5°.

A **Turbina 6**, em termos de IT, as direcções de Sudeste excedem o valor de referência a 44 m e a 85 m, nas direcções de Nordeste 300°, 292,5° e 285° excede nas três alturas de referência. Quanto à inclinação do escoamento, o valor de referência é ultrapassado nas três alturas nas direcções de Nordeste 307,5° 315° e 322,5°. Em termos do SF as direcções de Sudeste 135° e 142,5 são problemáticas, ultrapassando o limite imposto de 0,2. Para as restantes direcções, os sectores de Sueste restantes estão dentro dos parâmetros e as de Noroeste a partir de pouco mais acima dos 44 m do solo entram nos valores de referência.

Para a **Turbina 7**, esta apresenta problemas de IT nos sectores de Sudeste e de Nordeste excepto nas direcções de 307,5° e 322,5°. Quanto ao SF, nas direcções de Nordeste a 44m apresenta inferiores a -0,05 passando todas do zero entre os 50m e os 60m (Figura B 11). Em Sudeste a direcção de 112,5° só entra em valores aceitáveis a partir dos 50m, a direcção 142.5 excede o valor máximo de 0,2 a partir 90 m.

De todas as analisadas até agora a **Turbina 8** é a mais afectada em termos de IT só não excedendo o valor de referência na direcção 307,5. Para o SF a direcção de Sudeste 142,5 excede o valor máximo a partir dos 100m, para Nordeste a direcção problemática é a de 300°, só a partir de pouco antes dos 60m passa a estar dentro dos limites.

A **Turbina 9** apresenta valores excessivos de IT nas direcções de Sudeste 105° e 135° e de Noroeste 285° 2 292,5. Quanto ao SF, apresenta valores próximos abaixo de -0.07 a 44 m em quase todas as direcções, para Noroeste o conjunto de 300° a 322,5° é problemático sendo a mais problemática a direcção 300°.

Para a **Turbina 10**, as direcções de Sudeste 127,5 e 135 são problemáticas tais como as de Noroeste 285° e 292,5 quando falamos de IT. Em termos de SF as direcções de Nordeste 300° a 322,5° são nitidamente problemáticas.

Quanto à **Turbina 11** relativamente à IT a direcção de Sudeste 135° a 44m excede o valor de referência, as direcções de Noroeste 285° e 292,5 excedem nas três alturas. Para o SF, no geral os seus valores a partir dos 60m passam a ser aceitáveis sendo as únicas excepções as direcções de 120° e 300° que são as mais problemáticas.

Para a **Turbina 12** existem valores excessivos nas direcções 115° e 285°, nas direcções 135° e 142,5° a 44m, a IT ronda os 19%. Quanto ao SF, este deixa de ser ultrapassado em

quase todas as direcções a partir dos 60/70 m sendo as direcções 292,5° e 300° as mais problemáticas.

Por fim a **Turbina 13** ultrapassa a IT nas direcções 113°, 120°, 135° e 285°. Para o SF par quase todas as direcções não se registam valores excessivos entre os pontos superior e inferior da área de varrimento das pás. A única direcção problemática é a 292,5 que só a partir dos 60 m deixa de exceder o valor de referência.

5.6.2 Resumo Geral

A partir das análises individuais pode-se afirmar que as Turbinas 6, 7, e 8 são as que mais problemas apresentam em termos de IT, especialmente nas direcções simuladas de Sudeste e nas de Noroeste 285° 292,5 e 300°.

Este resultado não é uma surpresa, já que, o braço onde estão localizadas estas turbinas encontra-se numa posição menos elevada que as restantes turbinas sendo que para as direcções de Sudeste este braço encontra-se “abrigado” do vento pelo outro braço do V onde estão localizadas as turbinas, que como se encontra numa posição superior perturba o escoamento do ar para as turbinas 6, 7 e 8 como se pode ver na Figura 5-7.

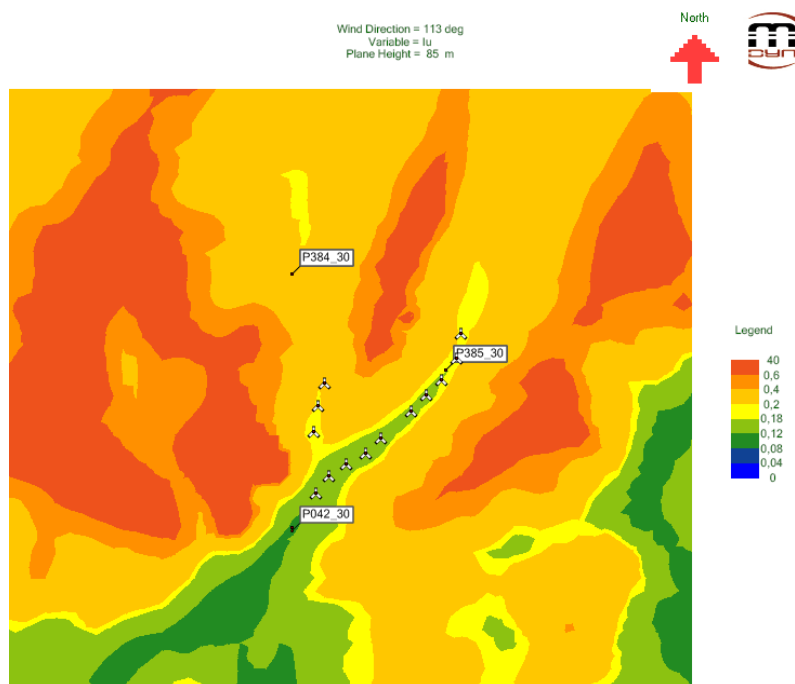


Figura 5-7 – Mapa 2D IT para direcção de 112,5°

Nas direcções de Noroeste nota-se a perturbação do escoamento causada por uma elevação a montante do escoamento que o perturba até à direcção de 300°.

A única turbina com inclinação do escoamento excessiva é a turbina 6, com inclinações acima de 8° nas direcções de Noroeste 307°, 315°, 222,5°.

As turbinas 1 e 2 são as mais afectadas por valores excessivos de SF nos sectores de Sudeste e Noroeste, e as turbinas 7, 9 e 10 nos sectores de Noroeste.

Resumidamente as turbinas mais problemáticas são as turbinas 6, 7 com valores excessivos em pelo menos um sector (Noroeste ou Sudeste) e em dois dos três parâmetros. Por ordem de gravidade aparece de seguida as turbinas 1 e 2 devido a ultrapassar o valor de SF permitido nos dois sectores e a turbina 8 excedendo o valor de IT em quase todas as direcções dos dois sectores. Depois seguem-se as turbinas 9, 10, porque excedem o valor de SF em quase todas as direcções para o sector de Noroeste e por fim a turbina 13 devido a valores de IT nas direcções de Noroeste.

5.7 Comparação utilizando os resultados agregados

Para esta comparação será feita utilizando os resultados agregados de toda a rosa-dos-ventos após a realização da síntese no *Meteodyn WT* com a média ponderada dos dados de vento para o período de um ano.

5.7.1 Estação de referência P_042

Na Tabela 5-1 pode-se ver os resultados obtidos utilizando como estação de referência a P_042. Os resultados aproximam-se, especialmente na previsão da estação P_385 relativamente à velocidade. Para a IT os resultados na P_384 são bastante parecidos, para a P_385 caso diferente em existe alguma diferença especialmente a 30 m.

Tabela 5-1 – Síntese na estação P_042

Síntese 1 P_042 30 m							
Estação	H [m]	V_calc [m/s]	Vmed [m/s]	Dif [%]	IT_calc [%]	IT_med [%]	Dif [%]
P385	60	7.21	7.02	2.72	18.4	14.44	27.46
P385	30	7.39	7.17	3.05	17.1	14.14	20.95
P384	60	6.58	5.99	9.89	20.7	20.44	1.29
P384	30	6.42	5.81	10.49	19.3	21.03	-8.21
P042	30	8.40	8.40	-0.02	14.4	12.96	11.91

5.7.2 Estação de referência P_384

Utilizando como referência a estação P_384 os resultados para a velocidade não são tão bons quanto os obtidos para a estação anterior, mas são mais consistentes sendo que a diferença entre os valores calculados e os medidos andam na mesma ordem de grandeza. A IT segue a mesma tendência da estação anterior sendo a estação P_385 a que possui pior previsão. A estação P_384 prevê para ela própria, valores de IT com alguma proximidade.

Tabela 5-2 - Síntese na estação P_384

Síntese 2 P_384 30 m							
Estação	H [m]	V_calc [m/s]	Vmed [m/s]	Dif [%]	IT_calc [%]	IT_med [%]	Dif [%]
P385	60	7.34	7.02	4.57	18.5	14.44	28.15
P385	30	7.51	7.17	4.73	17.5	14.14	23.78
P384	60	5.94	5.99	-0.79	21.3	20.44	4.22
P384	30	5.77	5.81	-0.69	19.7	21.03	-6.31
P042	30	8.78	8.40	4.50	14.9	12.96	14.96
Síntese 3 P_384 60 m							
Estação	H [m]	V_calc [m/s]	Vmed [m/s]	Dif [%]	IT_calc [%]	IT_med [%]	Dif [%]
P385	60	7.40	7.02	5.43	18.2	14.44	26.07
P385	30	7.61	7.17	6.12	17.3	14.14	22.37
P384	60	5.94	5.99	-0.79	20.9	20.44	2.27
P384	30	5.77	5.81	-0.69	19.5	21.03	-7.26
P042	30	8.93	8.40	6.29	14.6	12.96	12.65

5.7.3 Estação de referência P_385

Para esta estação as previsões de velocidade estão bastante próximas dos resultados medidos. Para a IT o caso é diferente em que existe uma melhor previsão para a estação P_384, para a P_385 registam-se valores de IT acima do valor medido de 2% e 4%.

Tabela 5-3 - Síntese na estação P_385

Síntese 4 P_385 30 m							
Estação	H [m]	V_calc [m/s]	Vmed [m/s]	Dif [%]	IT_calc [%]	IT_med [%]	Dif [%]
P385	60	6.95	7.02	-0.98	17.8	14.44	23.30
P385	30	7.12	7.17	-0.71	16.6	14.14	17.42
P384	60	5.66	5.99	-5.47	22.8	20.44	11.56
P384	30	5.50	5.81	-5.34	20.6	21.03	-2.03
P042	30	8.25	8.40	-1.80	14.2	12.96	9.57
Síntese 5 P_385 60 m							
Estação	H [m]	V_calc [m/s]	Vmed [m/s]	Dif [%]	IT_calc [%]	IT_med [%]	Dif [%]
P385	60	6.97	7.02	-0.70	17.4	14.44	20.53
P385	30	7.17	7.17	-0.02	16.3	14.14	15.29
P384	60	5.55	5.99	-7.31	22.8	20.44	11.56
P384	30	5.38	5.81	-7.41	20.8	21.03	-1.08
P042	30	8.34	8.40	-0.73	13.8	12.96	6.48

5.8 Efeitos de esteira

Como se Pode ver na Figura 5-8 podemos ver que as Turbinas 4 e 5 são as mais afectadas. Olhando para o “*layout*” do parque fornecido e tendo em conta que as direcções predominantes são as de Sudeste e Noroeste era esperado que as máquinas colocadas nas pontas fossem as menos afectadas como se verificou para as Turbinas 1, 2, 12 e 12 e 13.

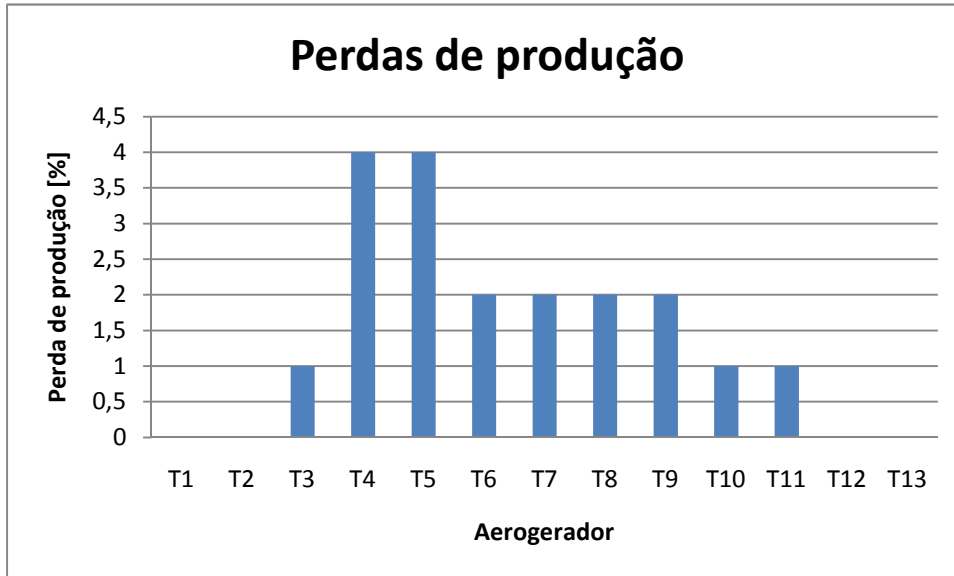


Figura 5-8 – Perdas de produção devido aos efeitos de esteira

Seria também esperado que o conjunto colocado na cumeeira de menor altitude, afectasse e fosse afectado pelas turbinas colocadas no centro já que o afastamento entre elas não é muito elevado mas o suficiente para introduzir perdas de produção baixas.

5.9 Efeitos Térmicos

Para a avaliação da activação dos regimes térmicos foi realizada uma simulação com os mesmos parâmetros que a simulação só mudando de regime térmico quase neutro-2 para o estável-3. Para estudar o seu efeito nos resultados foi usado como ponto de referência a estação P_385 a 60 m. Como seria de esperar a IT diminuiu ao passar do regime quase neutro para o regime estável como se pode verificar na Figura 5-9.

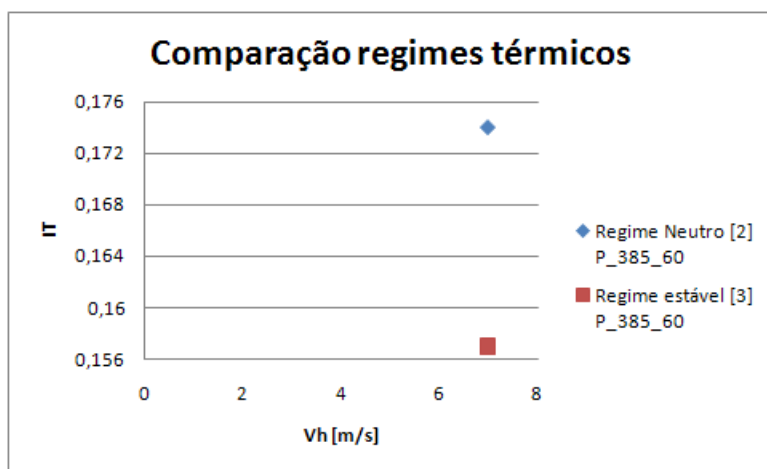


Figura 5-9 – Comparação da IT para regimes térmicos diferentes

6 . Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

No presente trabalho foi realizada uma análise do escoamento atmosférico sobre uma região montanhosa utilizando técnicas de mecânica dos fluidos computacional. Uma das vantagens obtidas pela utilização deste tipo de técnicas é a melhor compreensão do escoamento na região de interesse e a possibilidade de prever melhores zonas problemáticas como as de ocorrência de separação do fluido. Uma outra vantagem é poder estimar grandezas que na realidade não são fáceis de se medir como é o caso da IT.

Na comparação entre os resultados medidos e calculados verificou-se o seguinte:

- A maior diferença absoluta registada para as direcções foi de -25° para os sectores de Sudeste e para os sectores de Noroeste foi de 31° e foram registadas quando se usou a estação P_042 como referência;
- As maiores diferenças verificadas para RV foram de 96,97% (valor medido=1,0; valor calculado=2,09) quando a estação de referência foi P_042;
- Para a intensidade da turbulência o valor máximo foi de 111% (valor medido=9.3% ; valor calculado=19.7%).
- Após a realização da síntese e comparado os resultados de toda a rosa-dos-ventos para o mesmo período de um ano, verifica-se de uma forma geral para todas as estações de referência uma previsão da velocidade média por defeito que não excede os 8% e uma diferença para a intensidade da turbulência de no máximo 30%.

Pode-se dizer que no geral as direcções são previstas com alguma proximidade, o mesmo não acontecendo para os restantes em que as diferenças são maiores. Após a realização da síntese o programa consegue prever melhor o regime médio de ventos na região.

O período para aprendizagem do *Meteodyn* foi de certa forma curto, não para obter resultados com o programa em si, mas a compreensão de como o programa obtinha alguns dos resultados, caso verificado para a velocidade que não se obtinha para as direcções simuladas directamente sendo fornecido um *speed-up* e a forma de obtenção da velocidade em

todos os pontos do domínio não estava claramente presente. Uma outra dificuldade encontrada foi a por muitas vezes falta de informação detalhada no manual e por vezes confusa levando por vezes a se ter que utilizar a tentativa erro para se perceber.

Como trabalho futuro fica sugerido que se ultrapasse a principal dificuldade encontrada neste trabalho que foi a determinação directa da velocidade em todo o campo de escoamento. Uma outra proposta será a de testar a mudança no regime de ventos usando os dados de várias estações em simultâneo caso que não foi testado no presente trabalho.

7 . Referências e Bibliografia

- [1] P. J. Hurley (1997) *An evaluation of several turbulence schemes for the prediction of mean and turbulent fields in complex terrain*
- [2] Stull, R. B. (1988) *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*.
- [3] Patankar, S. V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow* McGraw-HILL Book Company
- [4] Stangroom P. (2004) *CFD Modelling of Wind Flow Over Terrain*. Civil Engineering. Nottingham, University of Nottingham
- [5] Tony Burton. (2001) *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons
- [6] Meteodyn User's Manual WT 3.6.2 Feb 2009

ANEXO A: Mapas 2D

*Mapas 2D do speed-up factor
para $h = 44\text{ m}$; $h = 85\text{ m}$ e
 $h = 126\text{ m}$ Sectores de Sudeste
e Noroeste*

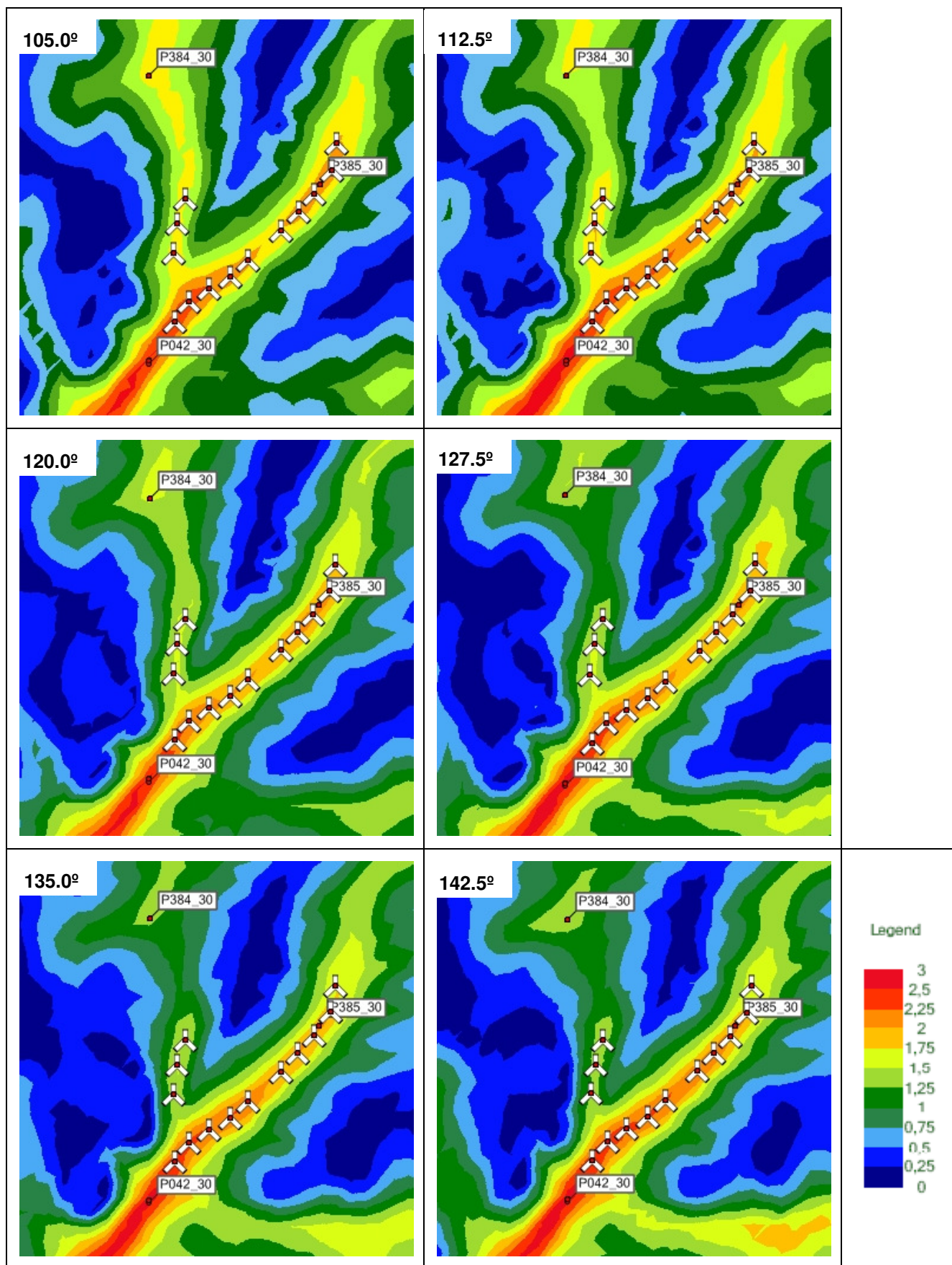


Figura A 1 – Mapas 2D *speed-up factor* para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m

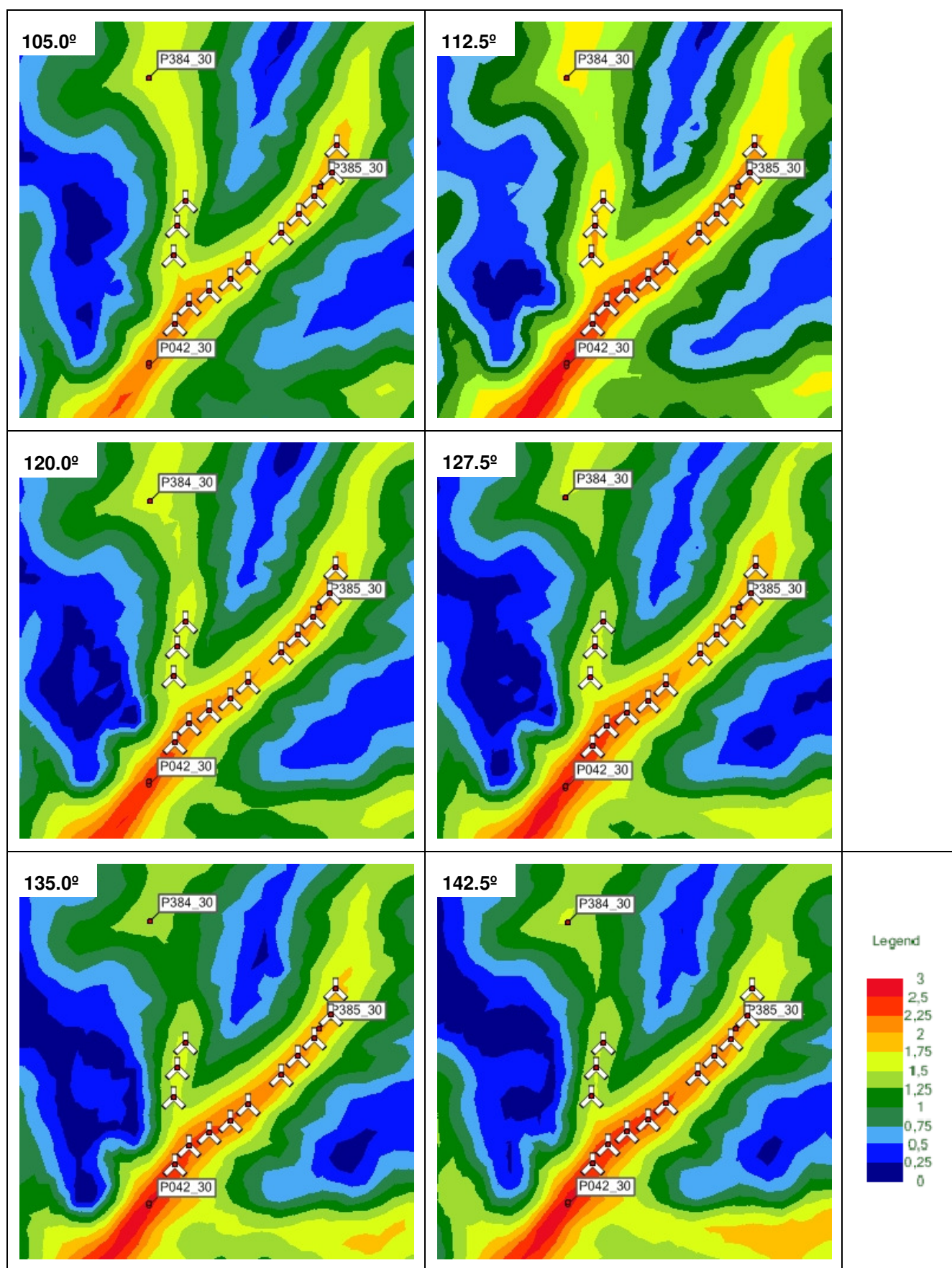


Figura A 2 – Mapas 2D *speed-up factor* para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m

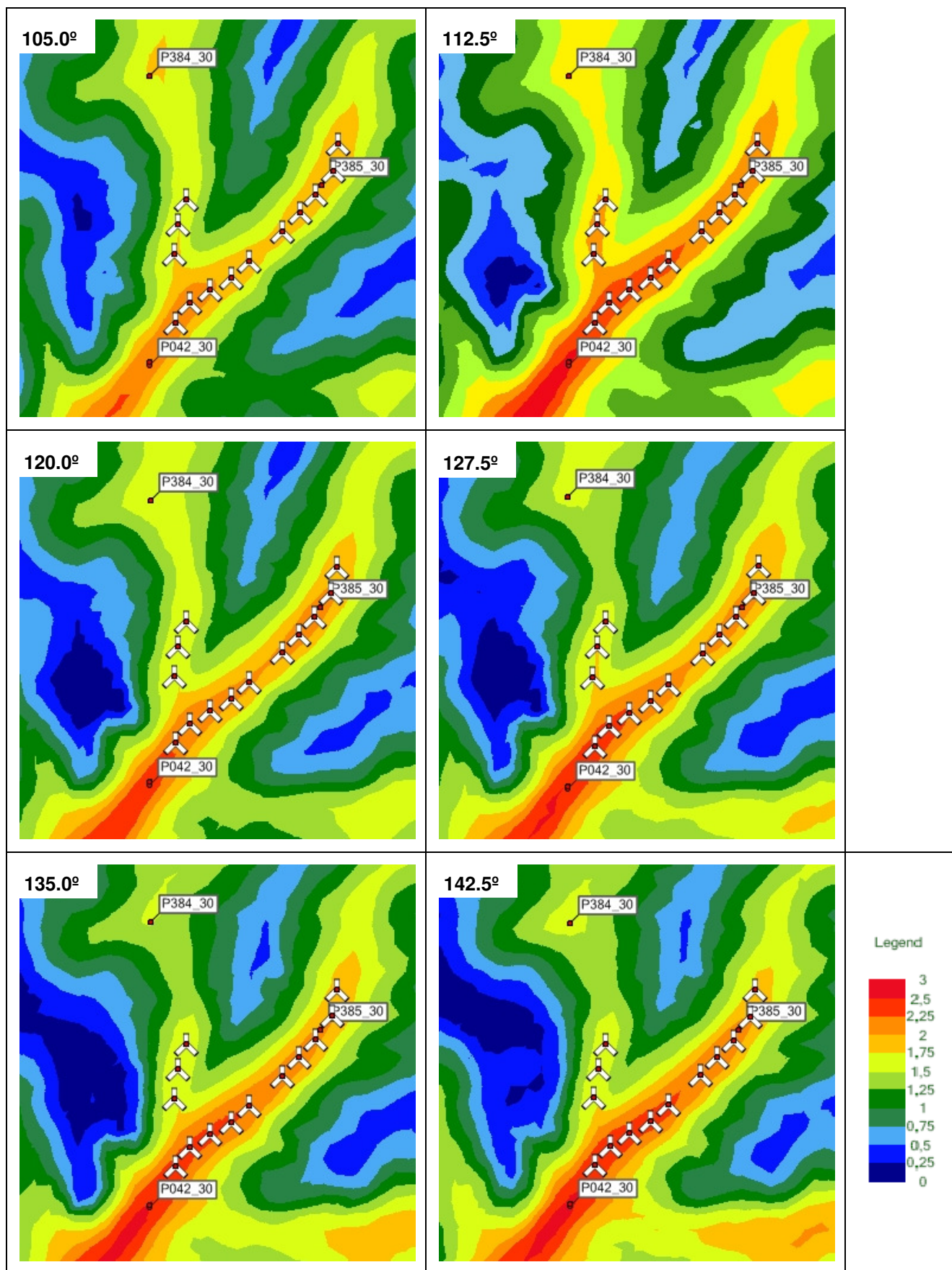


Figura A 3 – Mapas 2D *speed-up* factor para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m

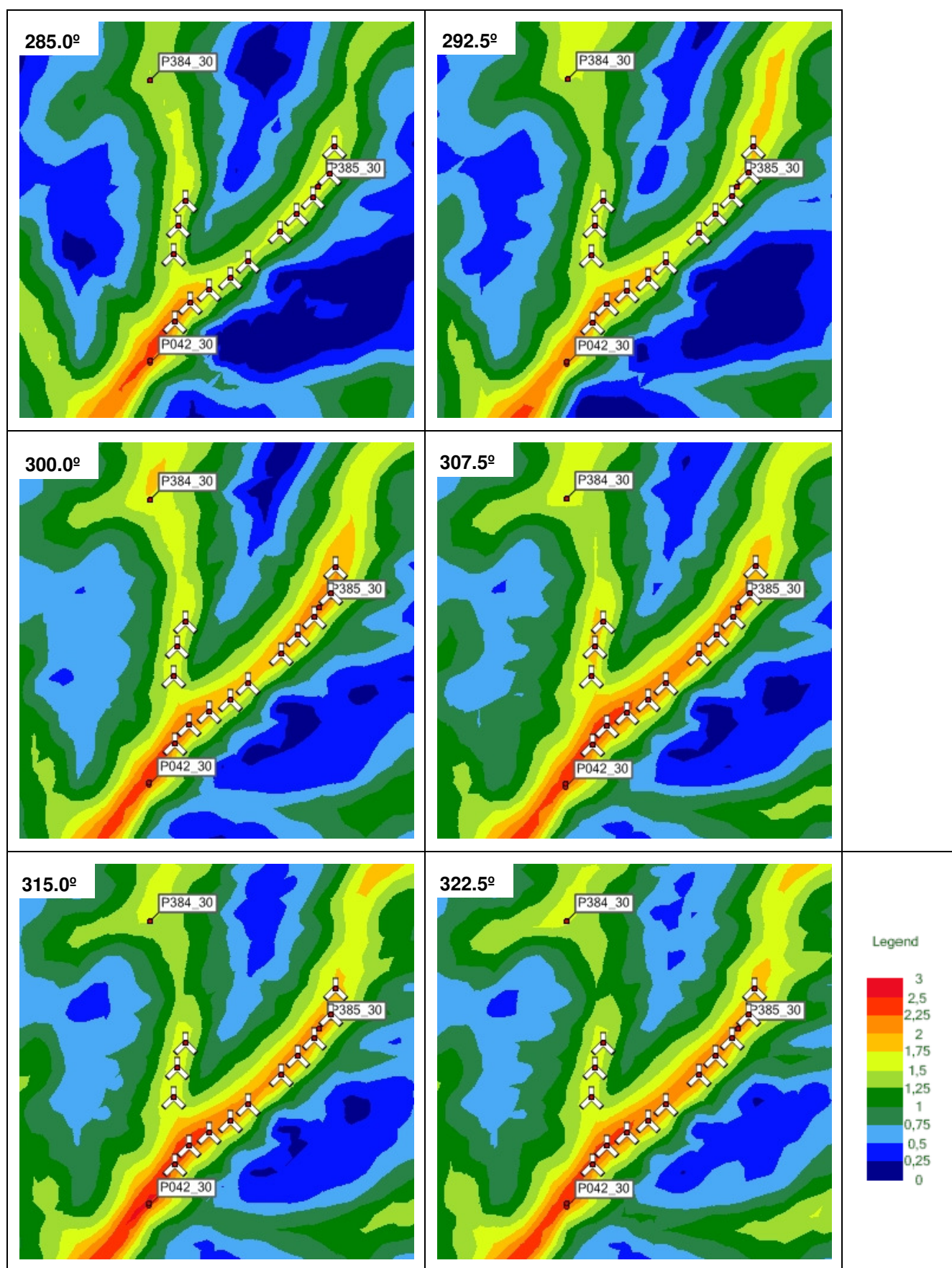


Figura A 4 – Mapas 2D *speed-up factor* para os sectores de Noroeste para $h = 44$ m

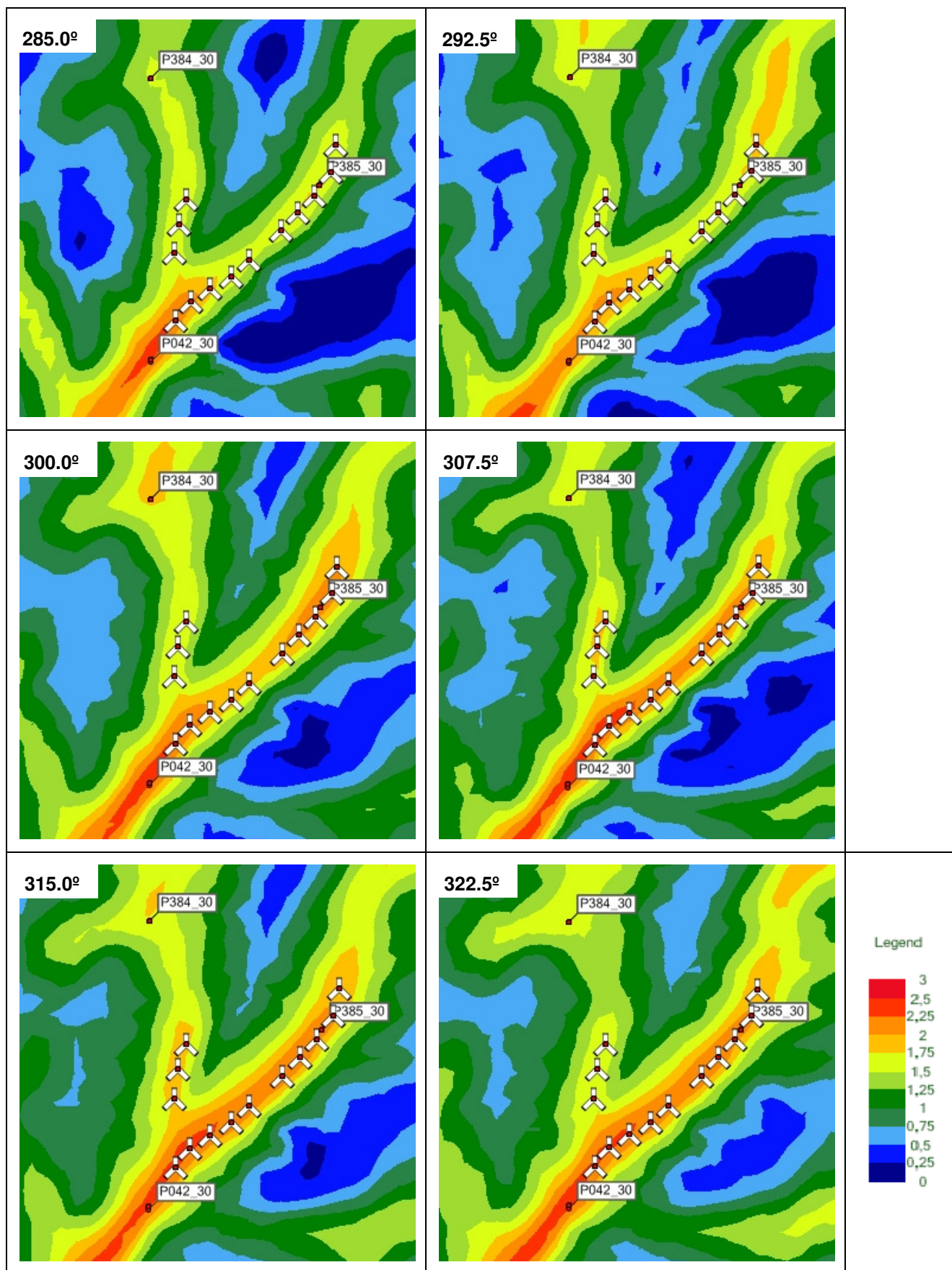


Figura A 5 – Mapas 2D *speed-up factor* para os sectores de Noroeste para $h = 85$ m

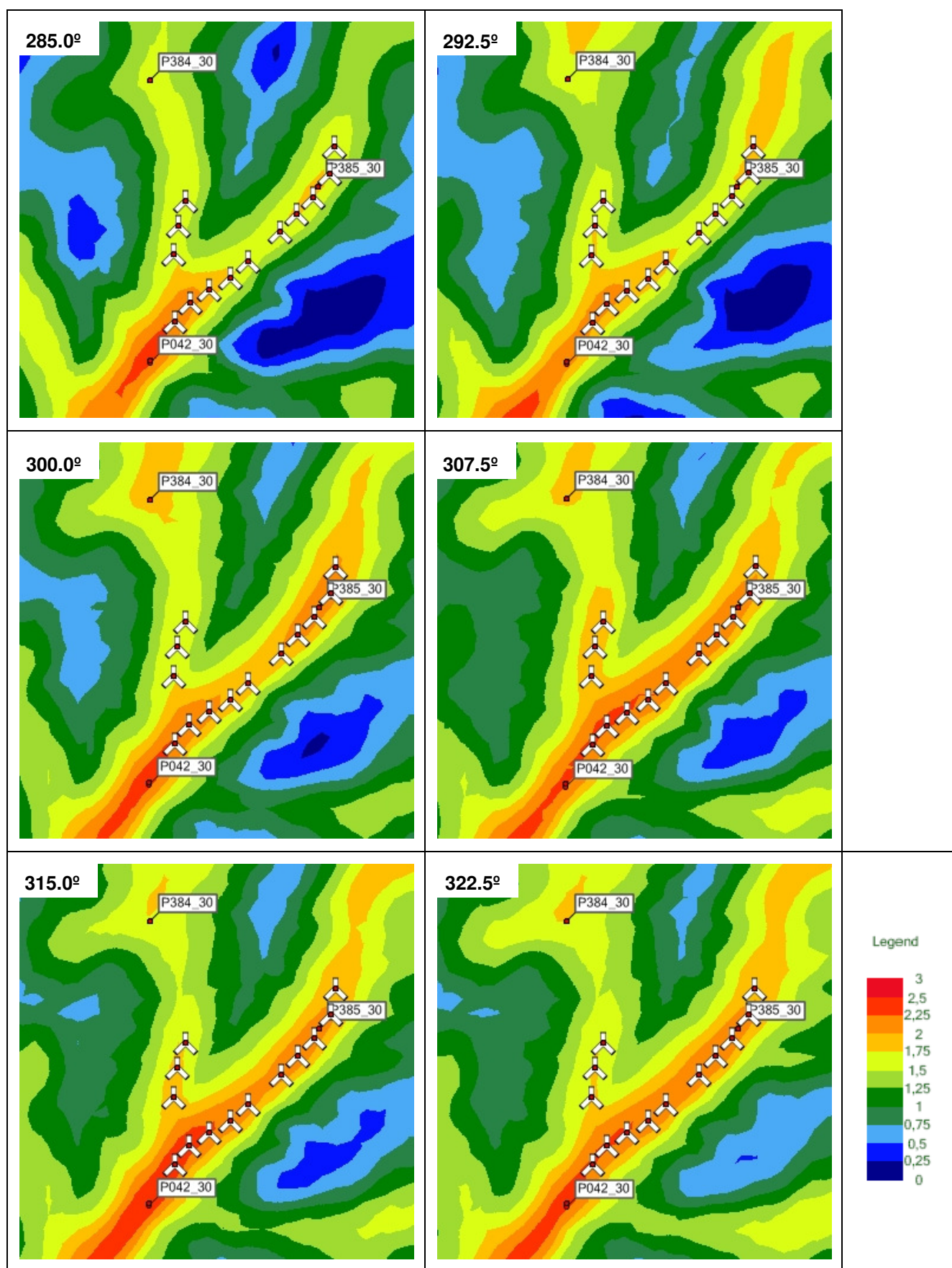


Figura A 6 – Mapas 2D *speed-up factor* para os sectores de Noroeste para $h = 126$ m

*Mapas 2D da intensidade da
turbulência para
 $h = 44\text{ m}$; $h = 86\text{ m}$ e $h = 126\text{ m}$
Sectores de Sudeste e Noroeste*

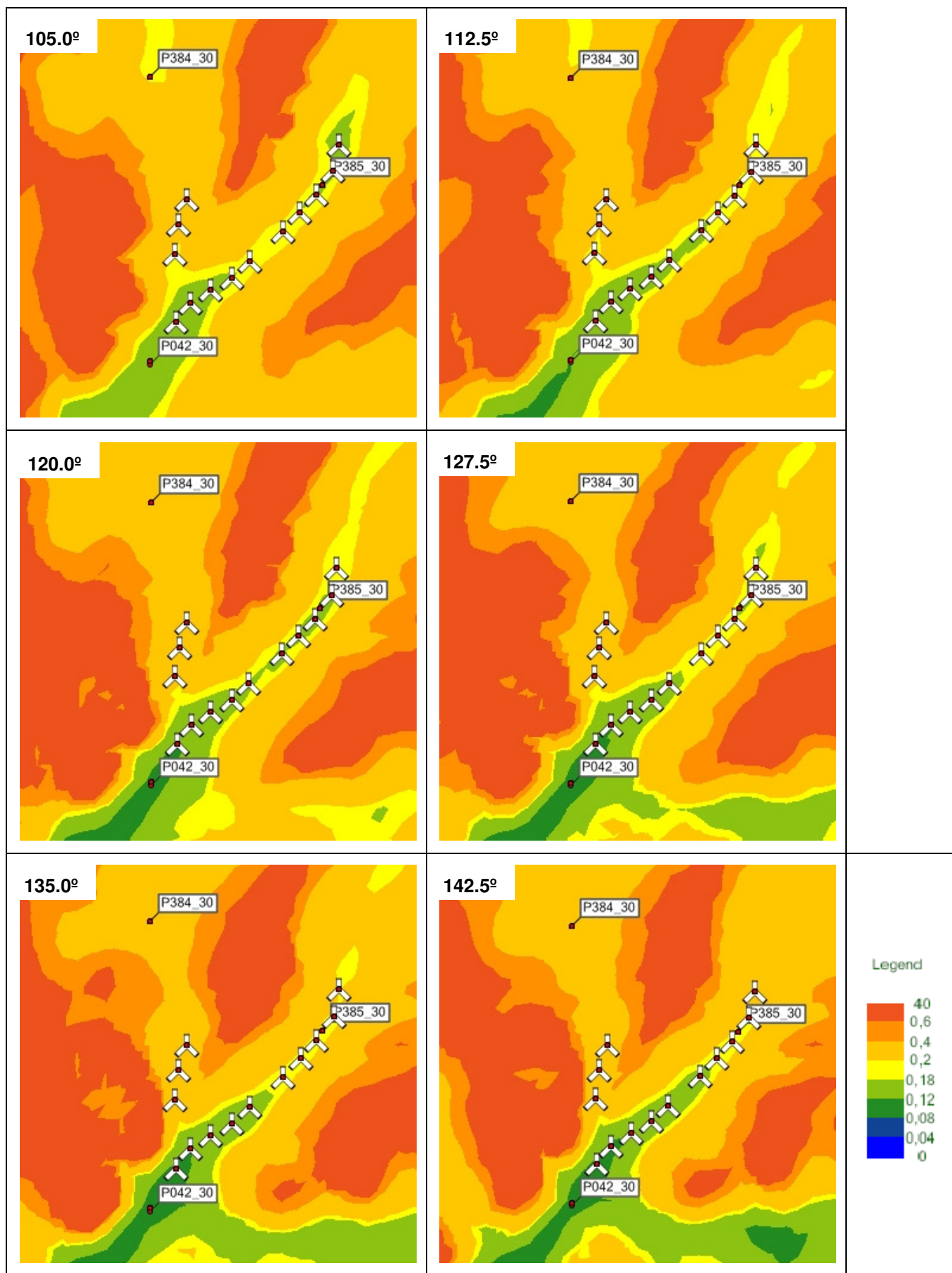


Figura A 7 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m

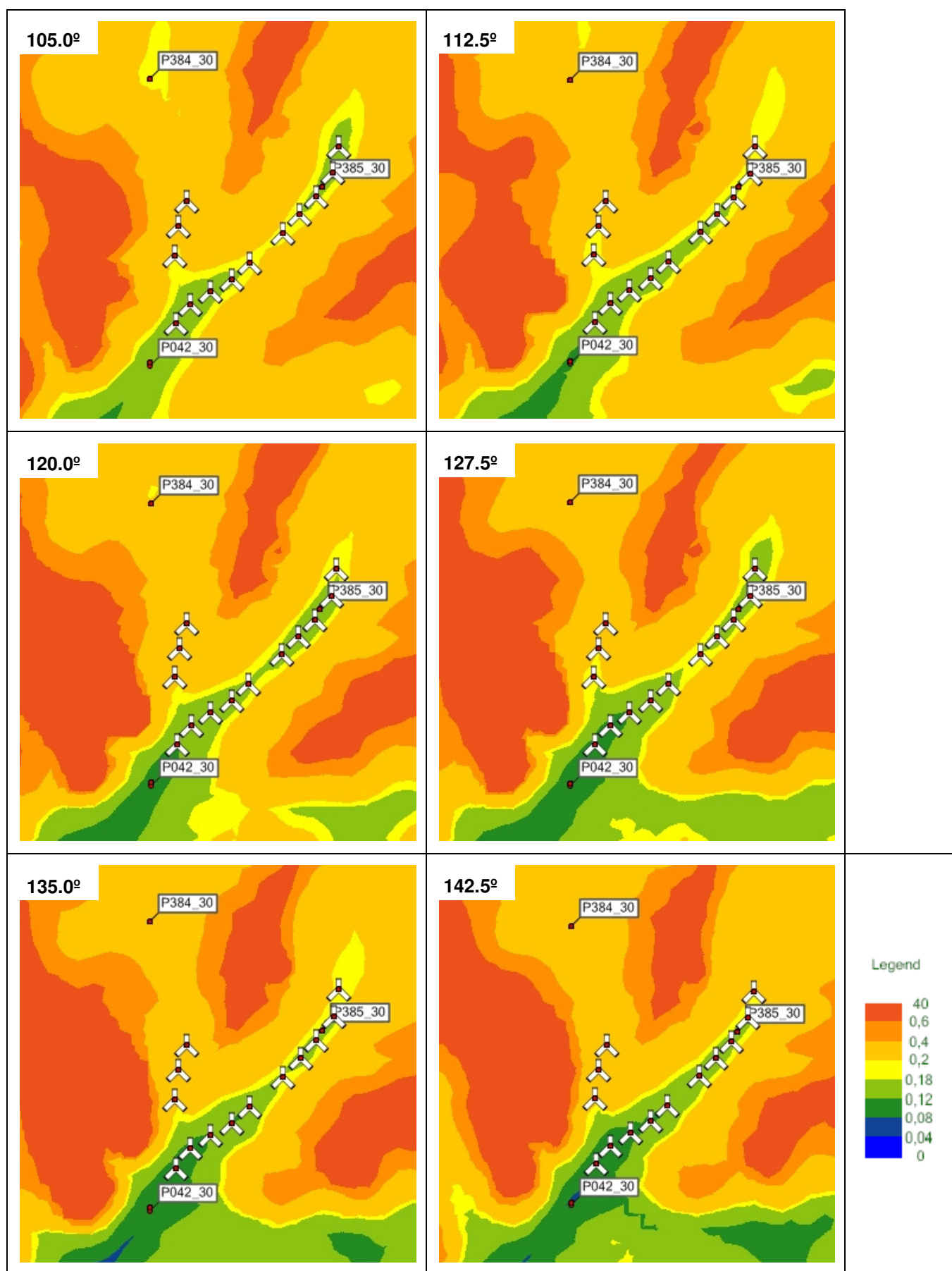


Figura A 8 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m

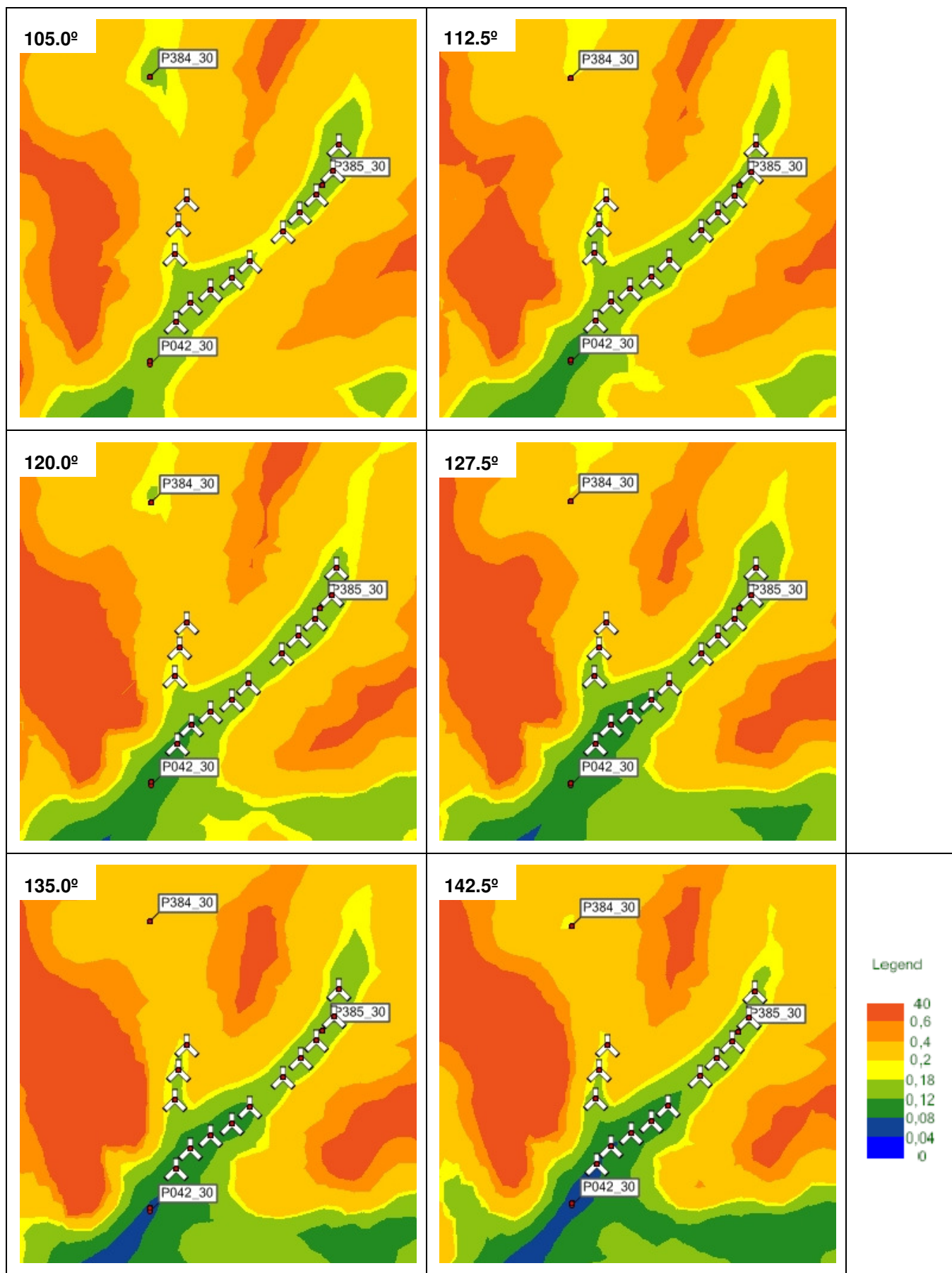


Figura A 9 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m

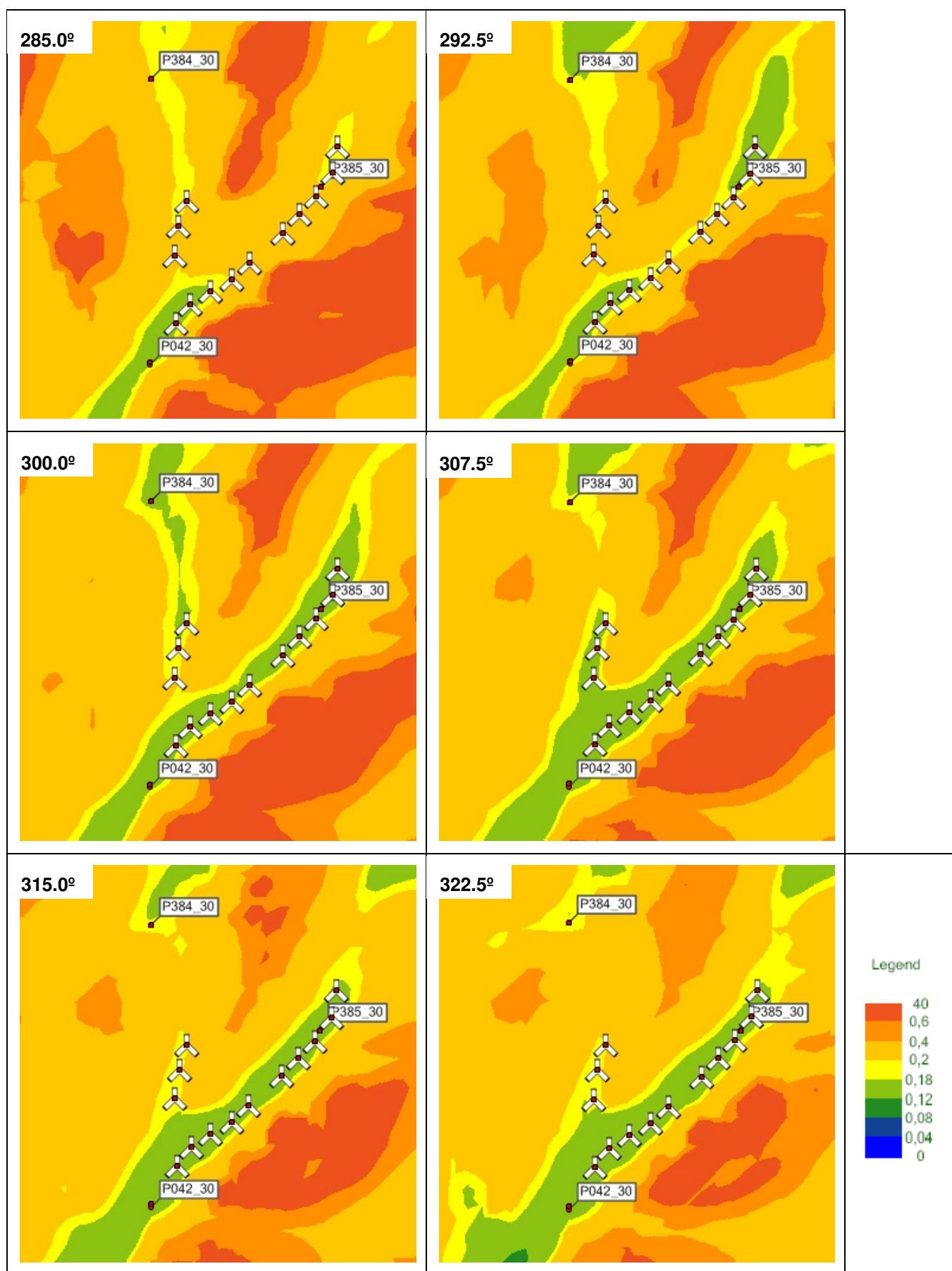


Figura A 10 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Noroeste para $h = 44$ m

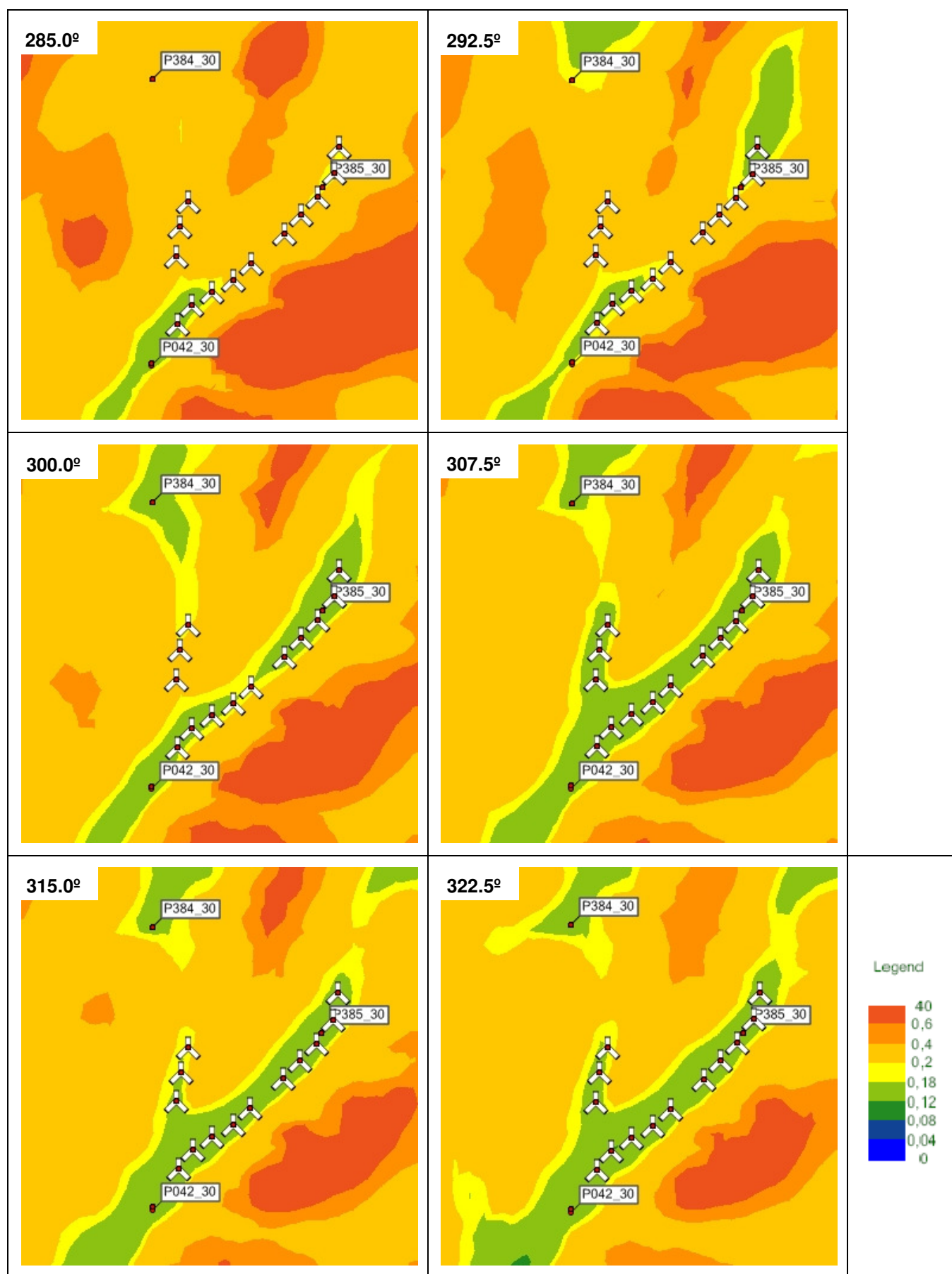


Figura A 11 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Noroeste para $h = 85$ m

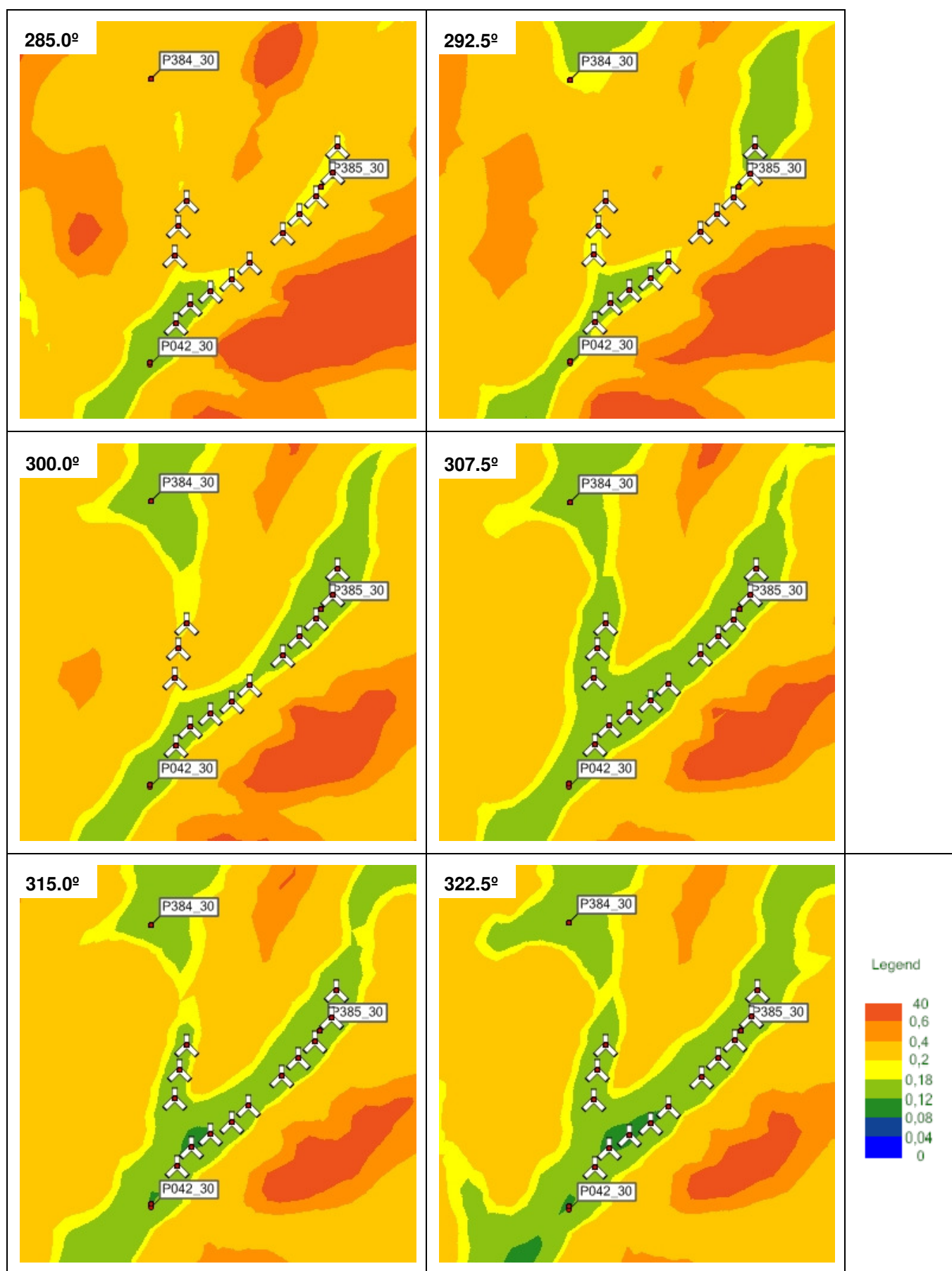


Figura A 12 – Mapas 2D intensidade da turbulência para os sectores de Noroeste para $h = 126$ m

*Mapas 2D da inclinação do
escoamento para
 $h = 44\text{ m}; h = 86\text{ m}$ e $h = 126\text{ m}$
Sectores de Sudeste e Noroeste*

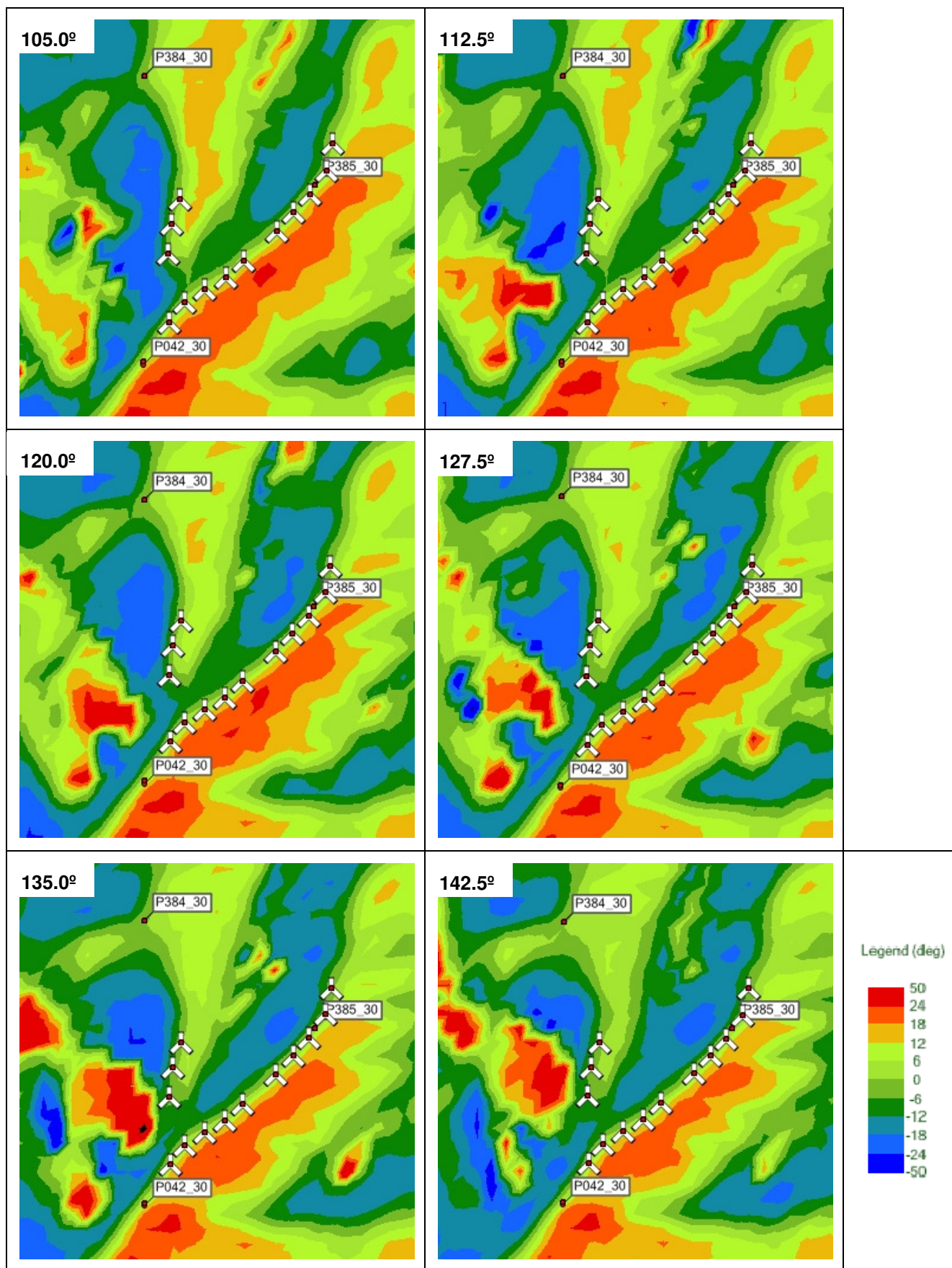


Figura A 13 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m

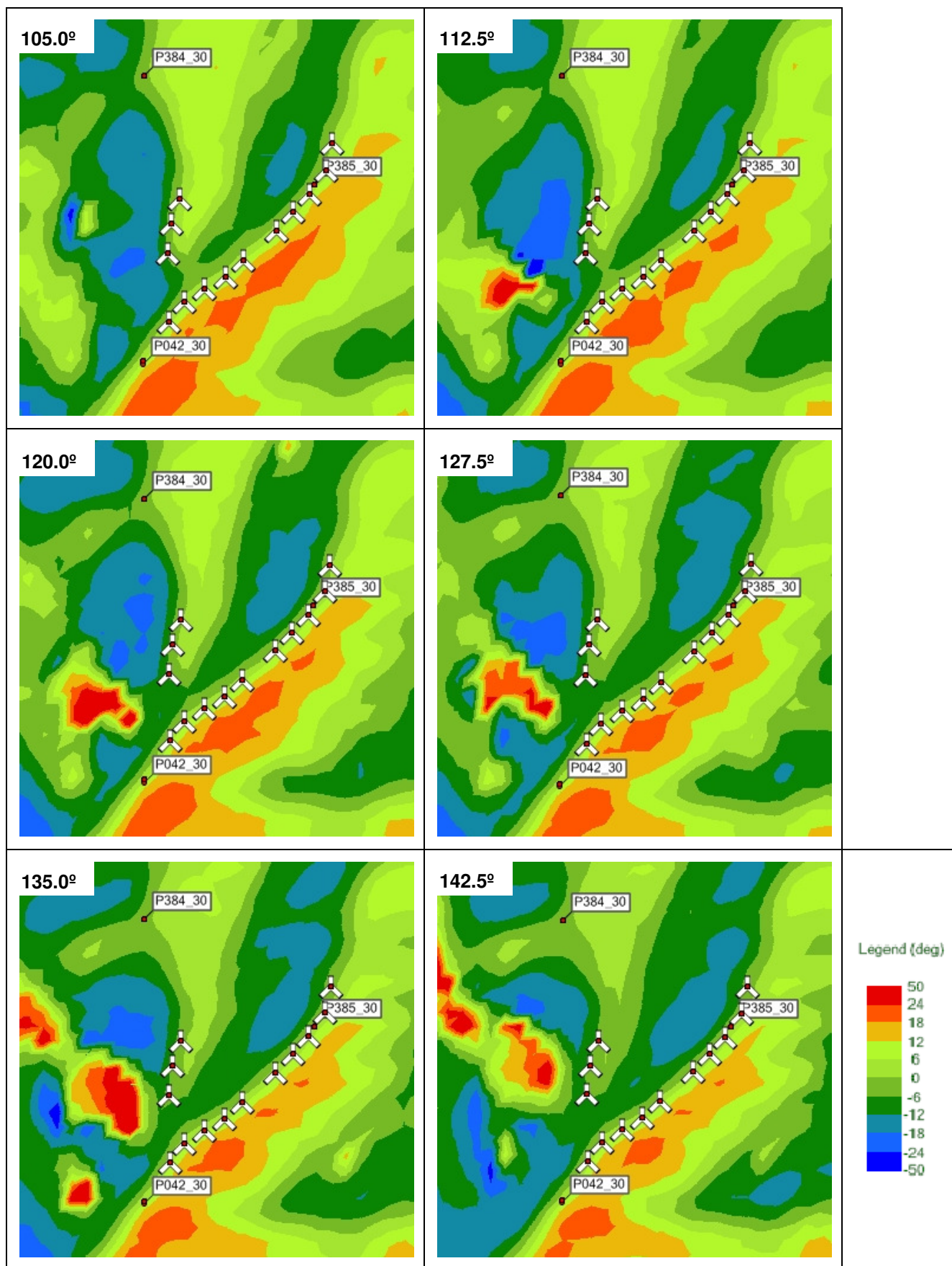


Figura A 14 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m

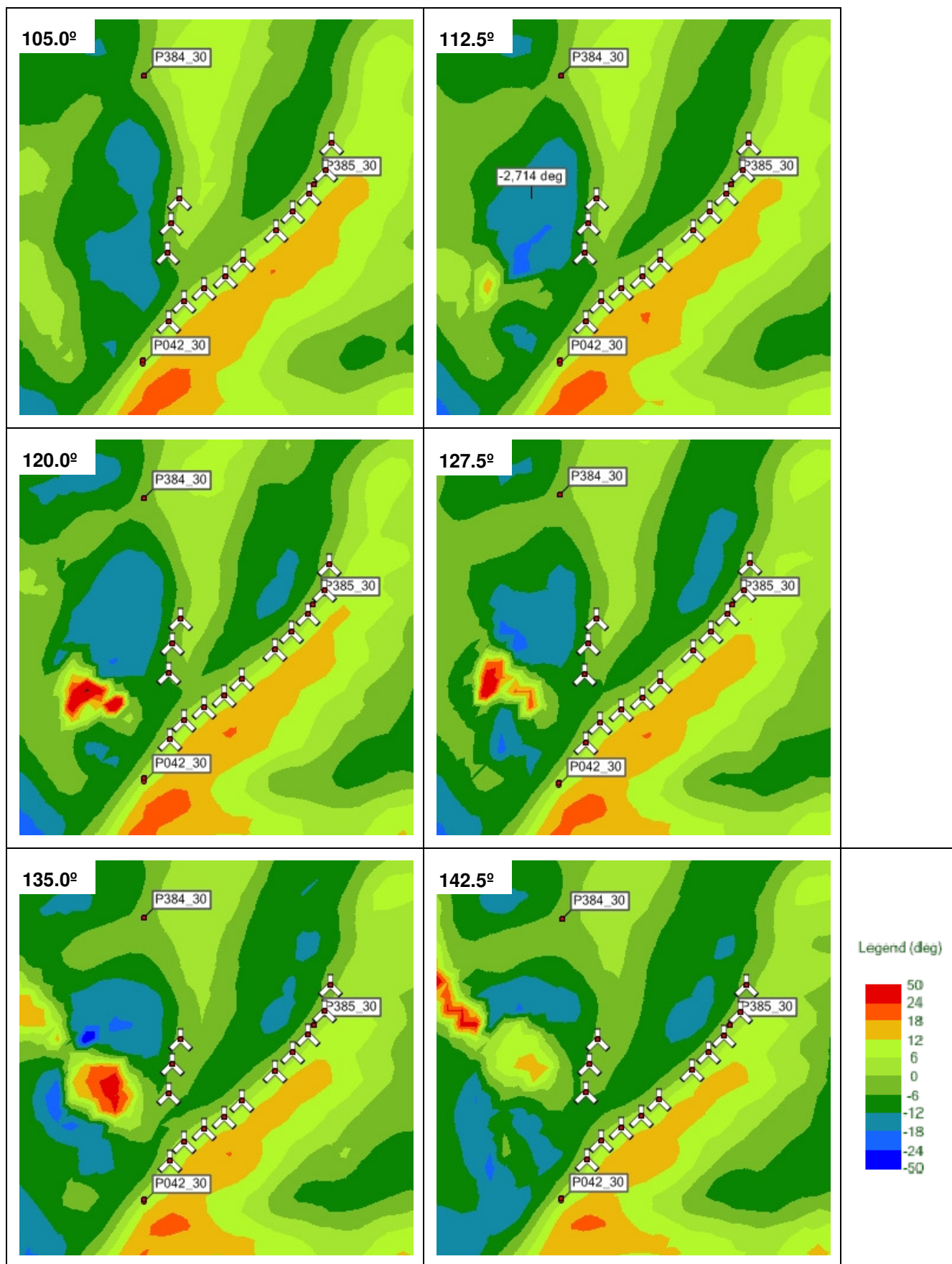


Figura A 15 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m

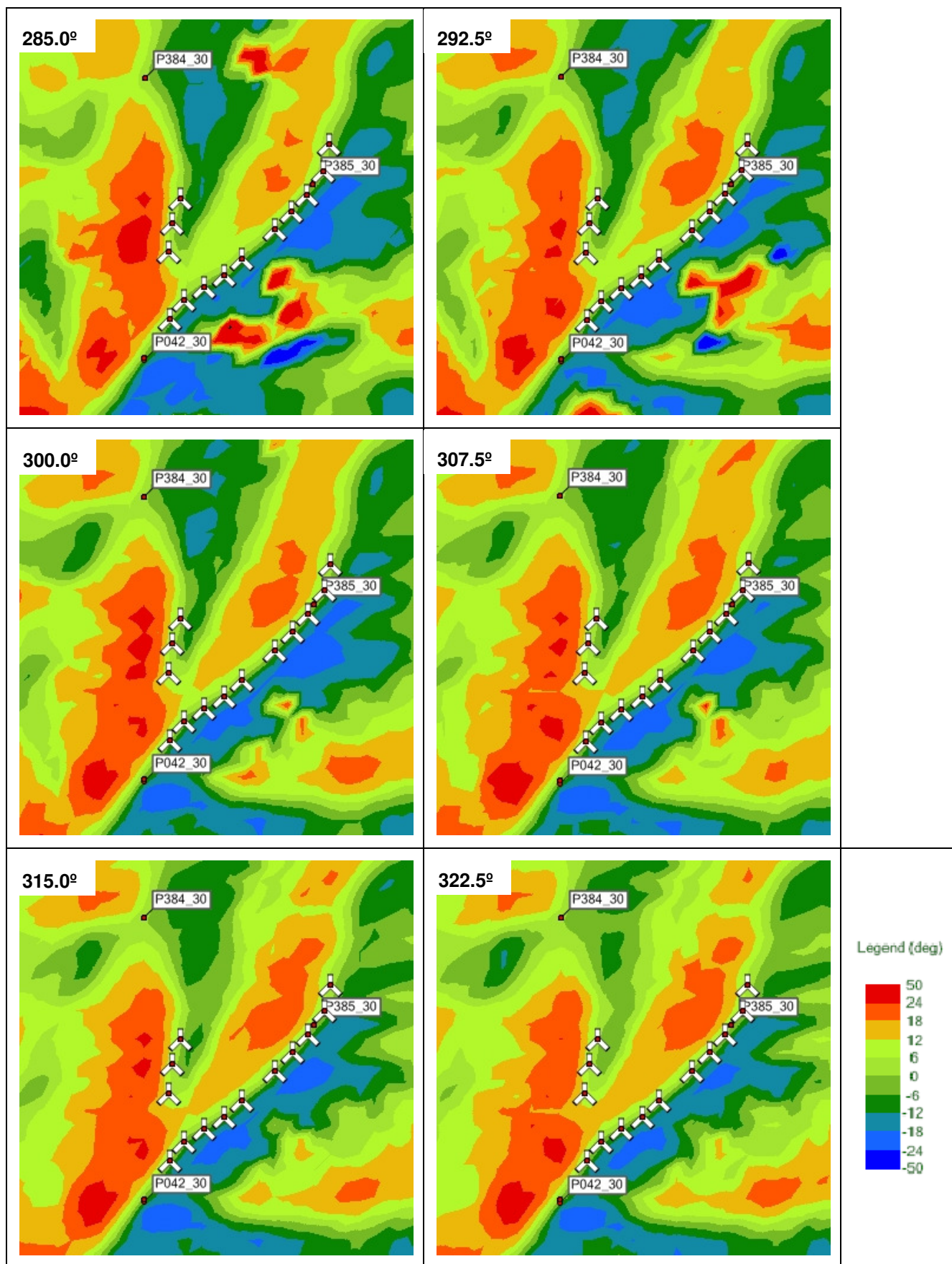


Figura A 16 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Noroeste para $h = 44$ m

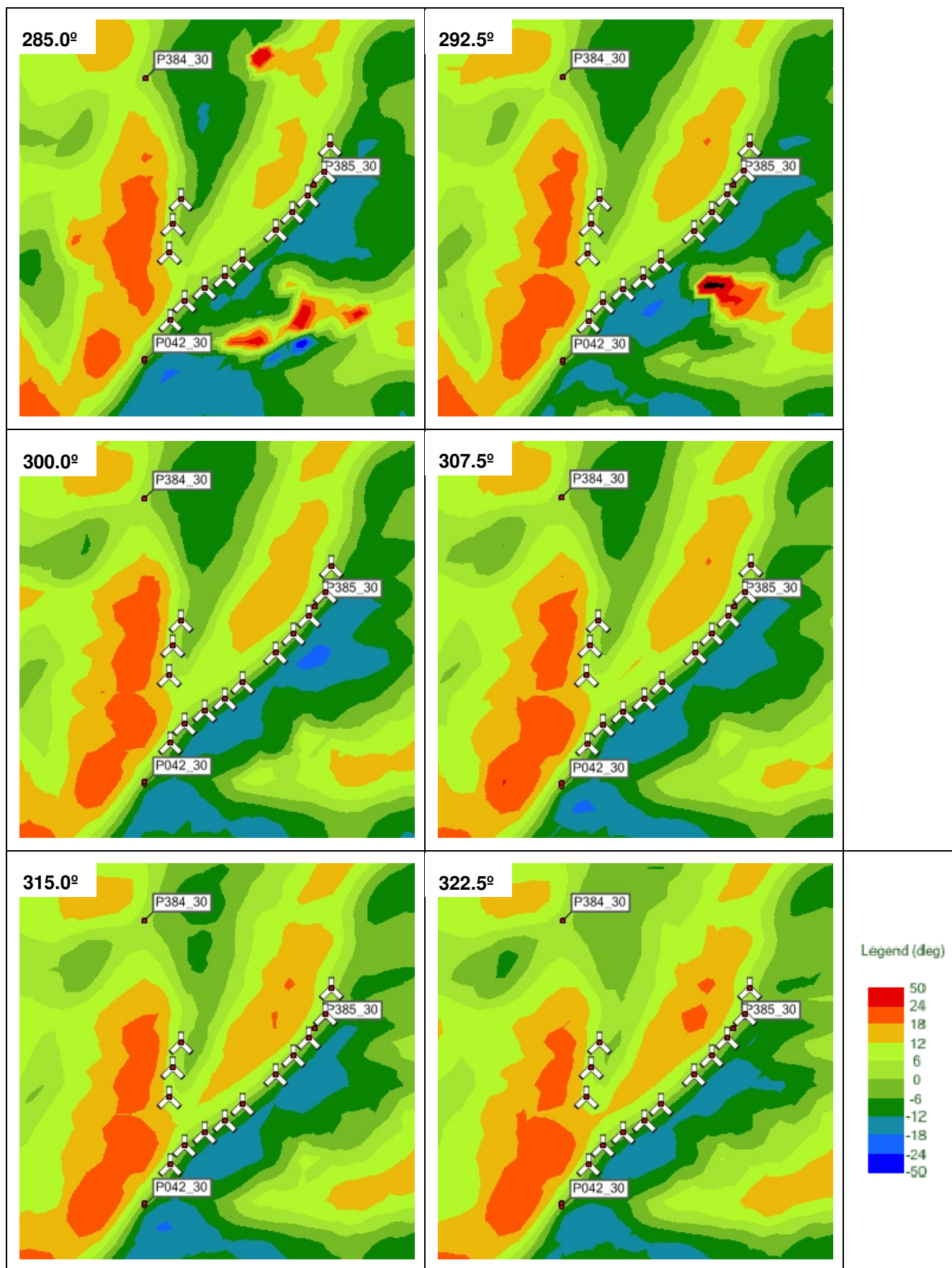


Figura A 17 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Noroeste para $h = 85$ m

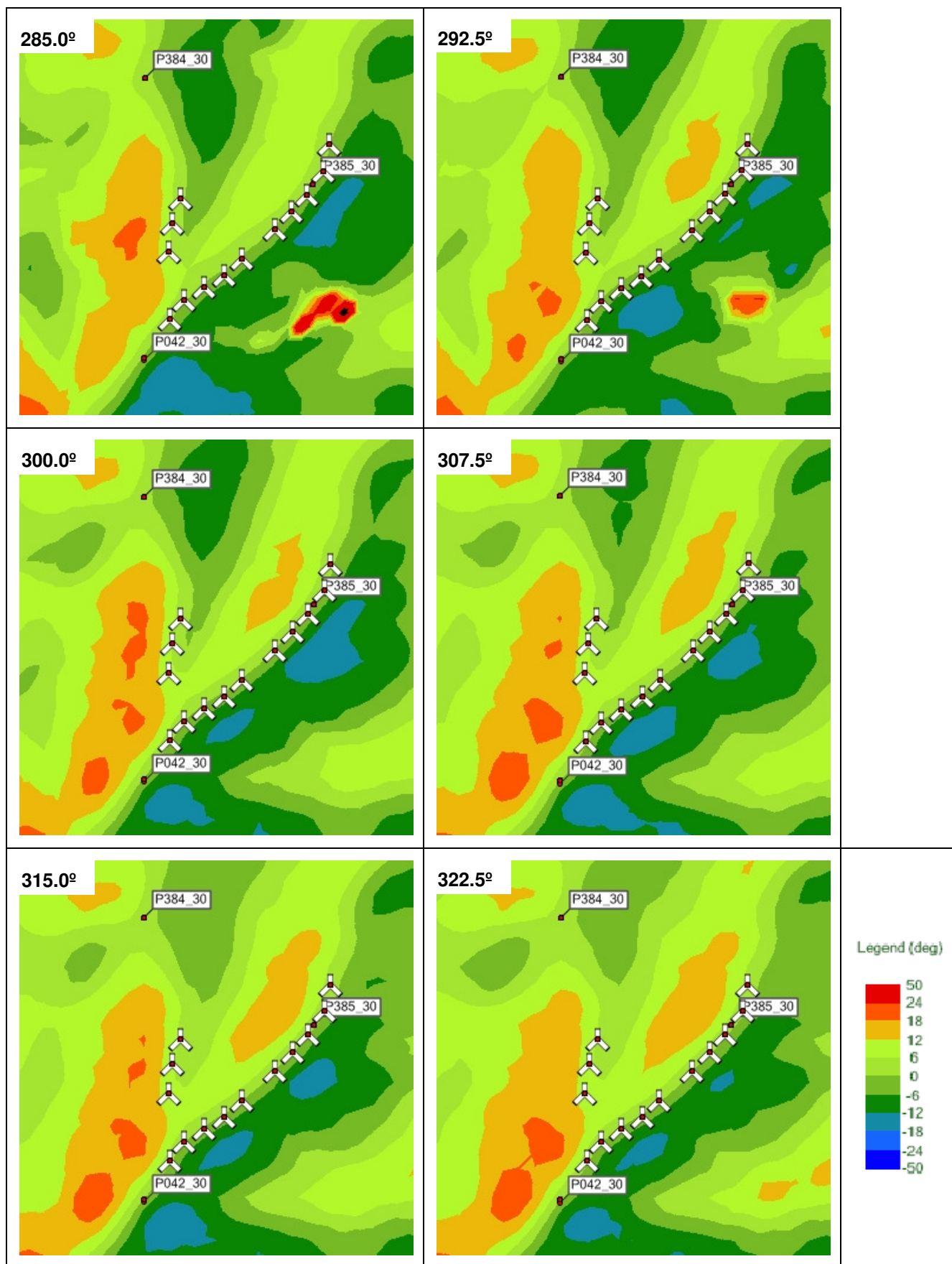


Figura A 18 – Mapas 2D inclinação do escoamento para os sectores de Noroeste para $h = 126$ m

*Mapas 2D do desvio do
escoamento para
 $h = 44\text{ m}$; $h = 86\text{ m}$ e $h = 126\text{ m}$
Sector de Sudeste e Noroeste*

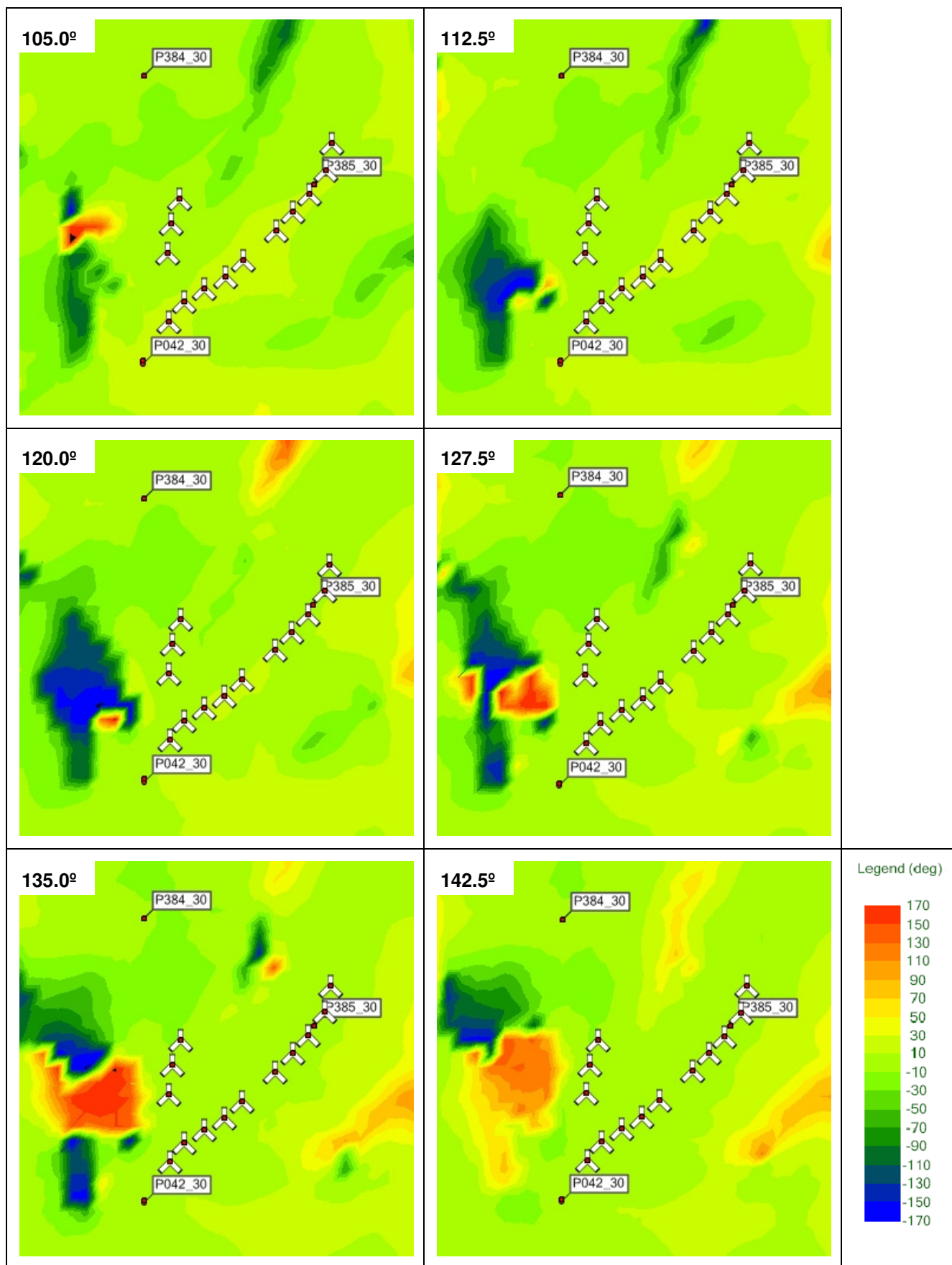


Figura A 19 – Mapas 2D desvio escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 44$ m

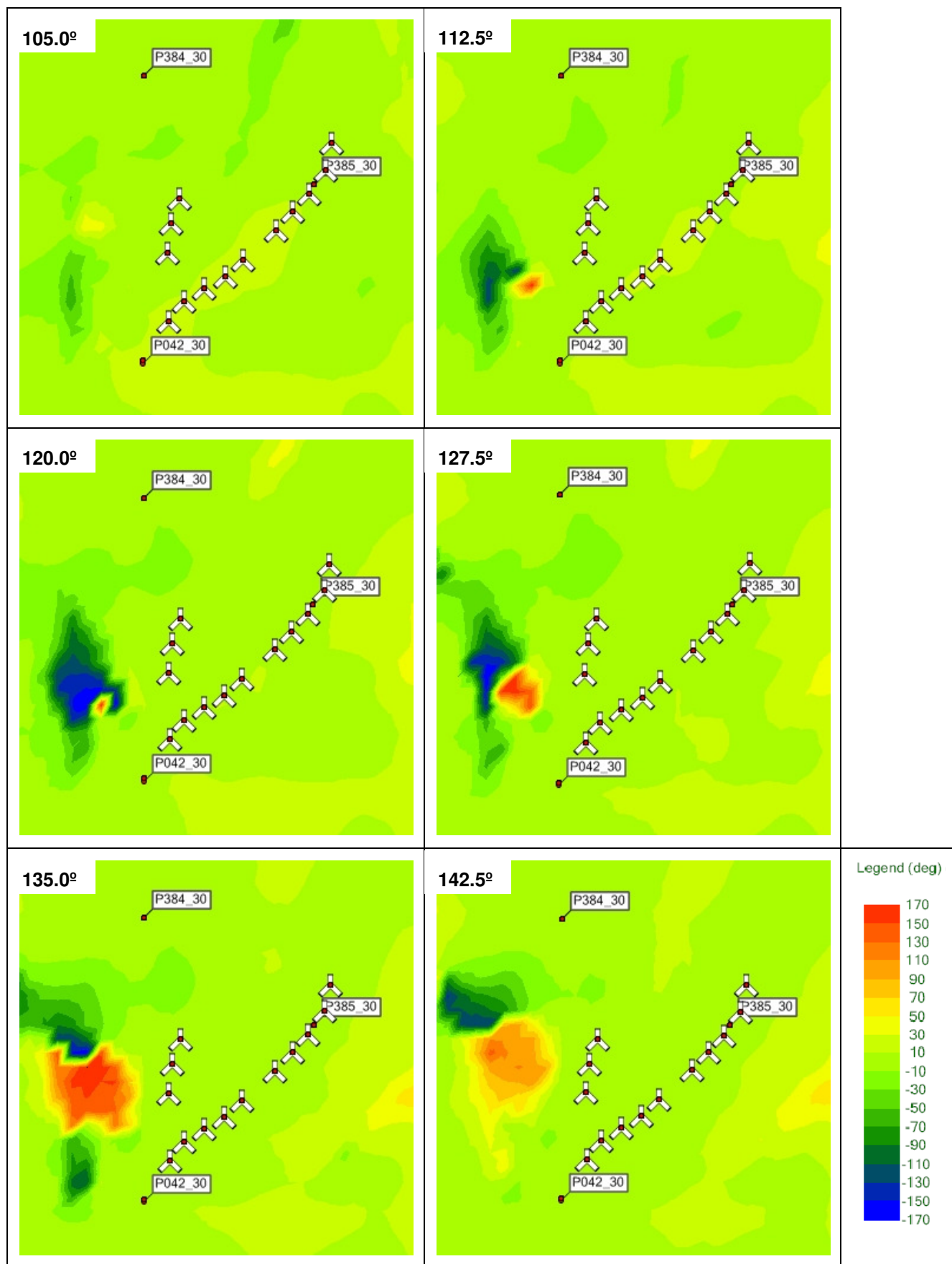


Figura A 20 – Mapas 2D desvio escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 85$ m

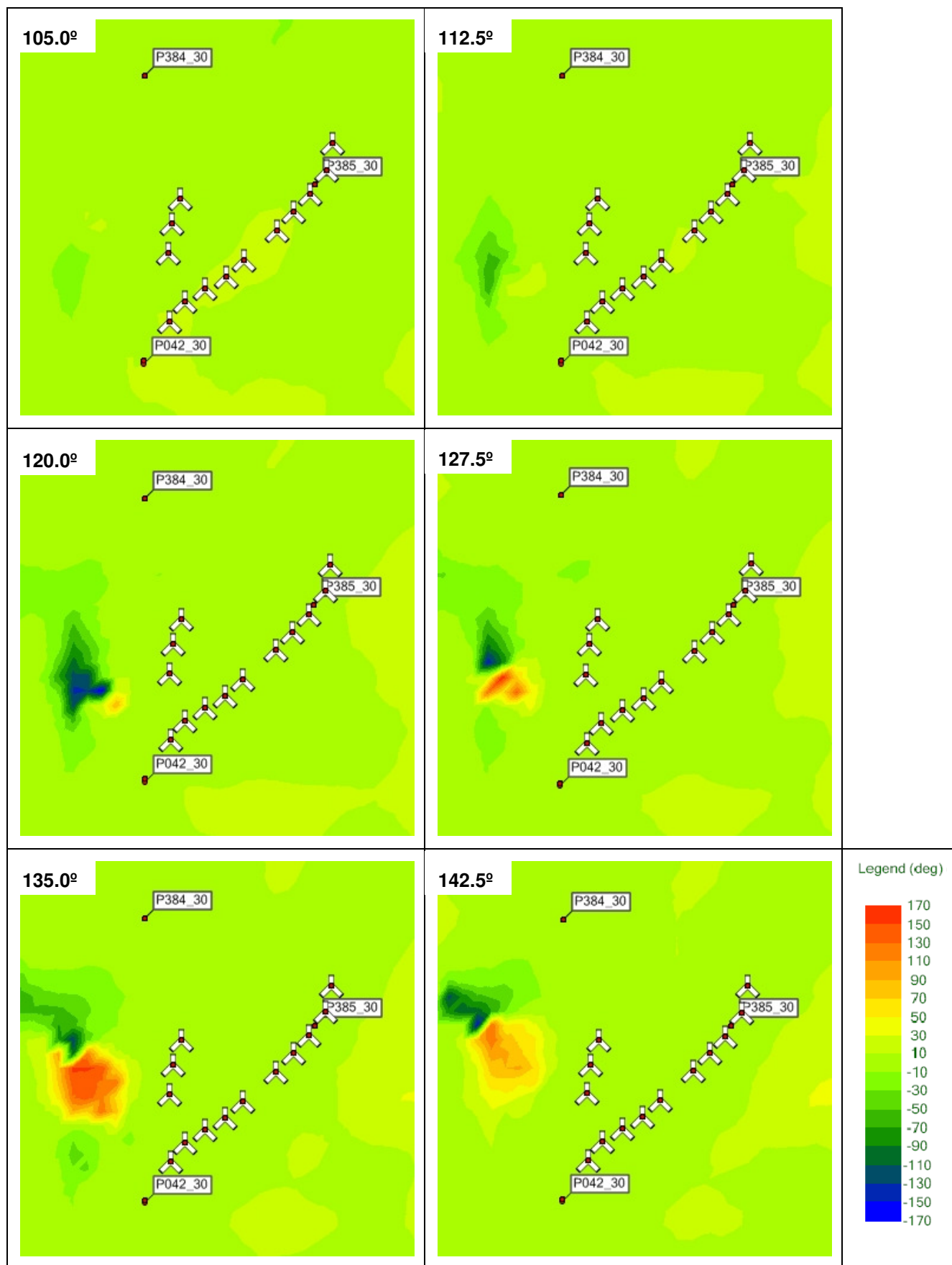


Figura A 21 – Mapas 2D desvio escoamento para os sectores de Sudeste para $h = 126$ m

ANEXO B: Gráficos

Perfis verticais de velocidade

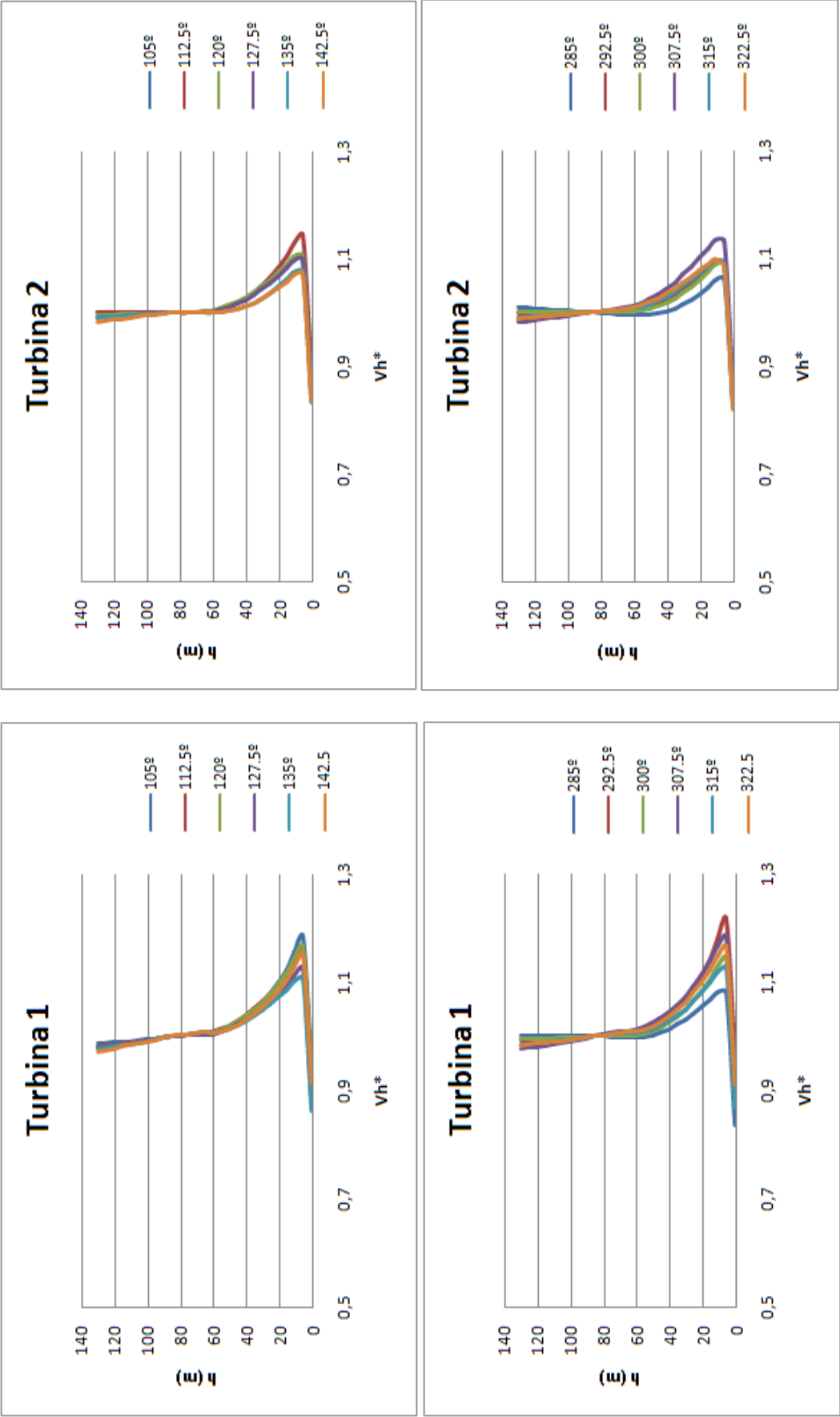


Figura B 1 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{85m}$)

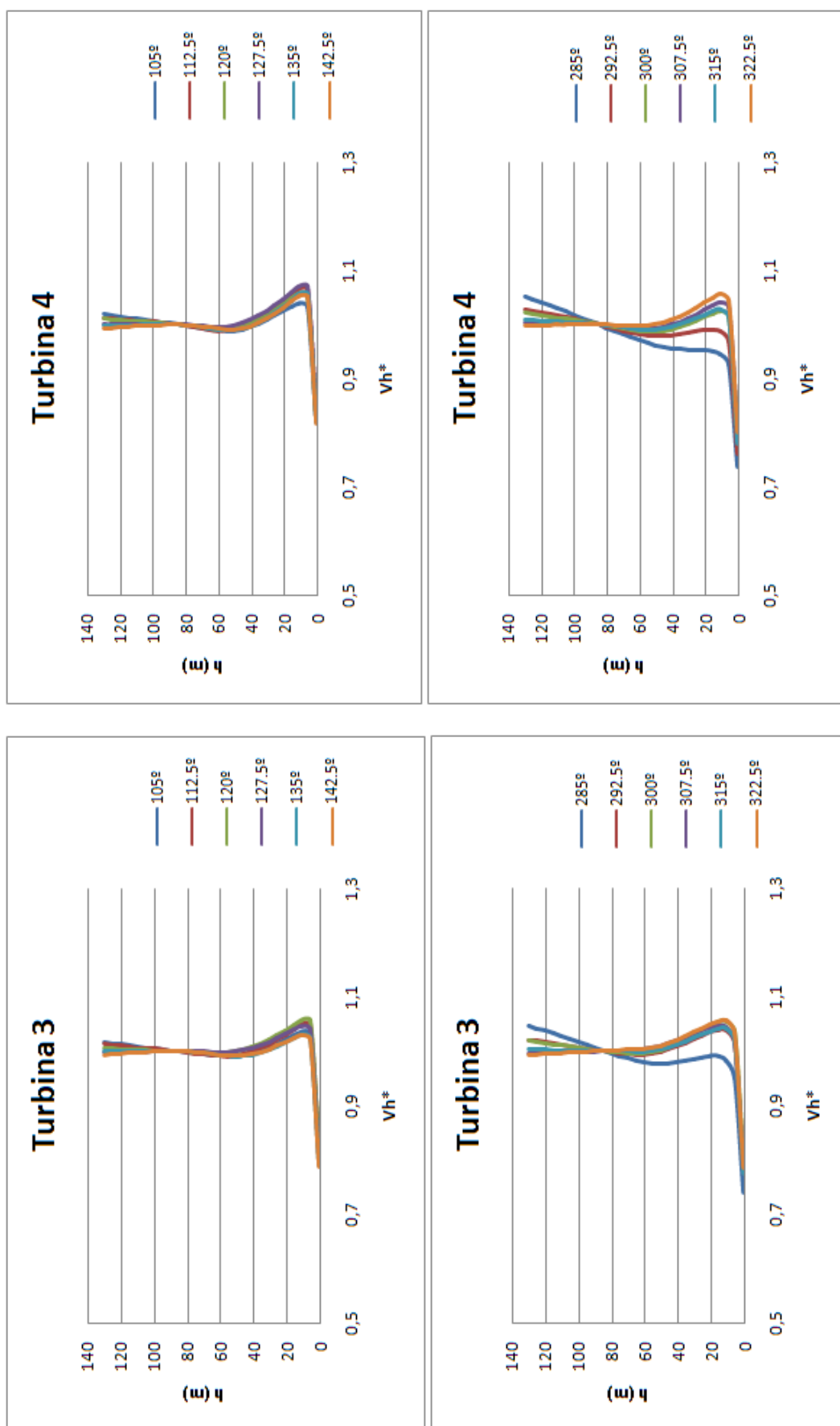


Figura B 2 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{85m}$)

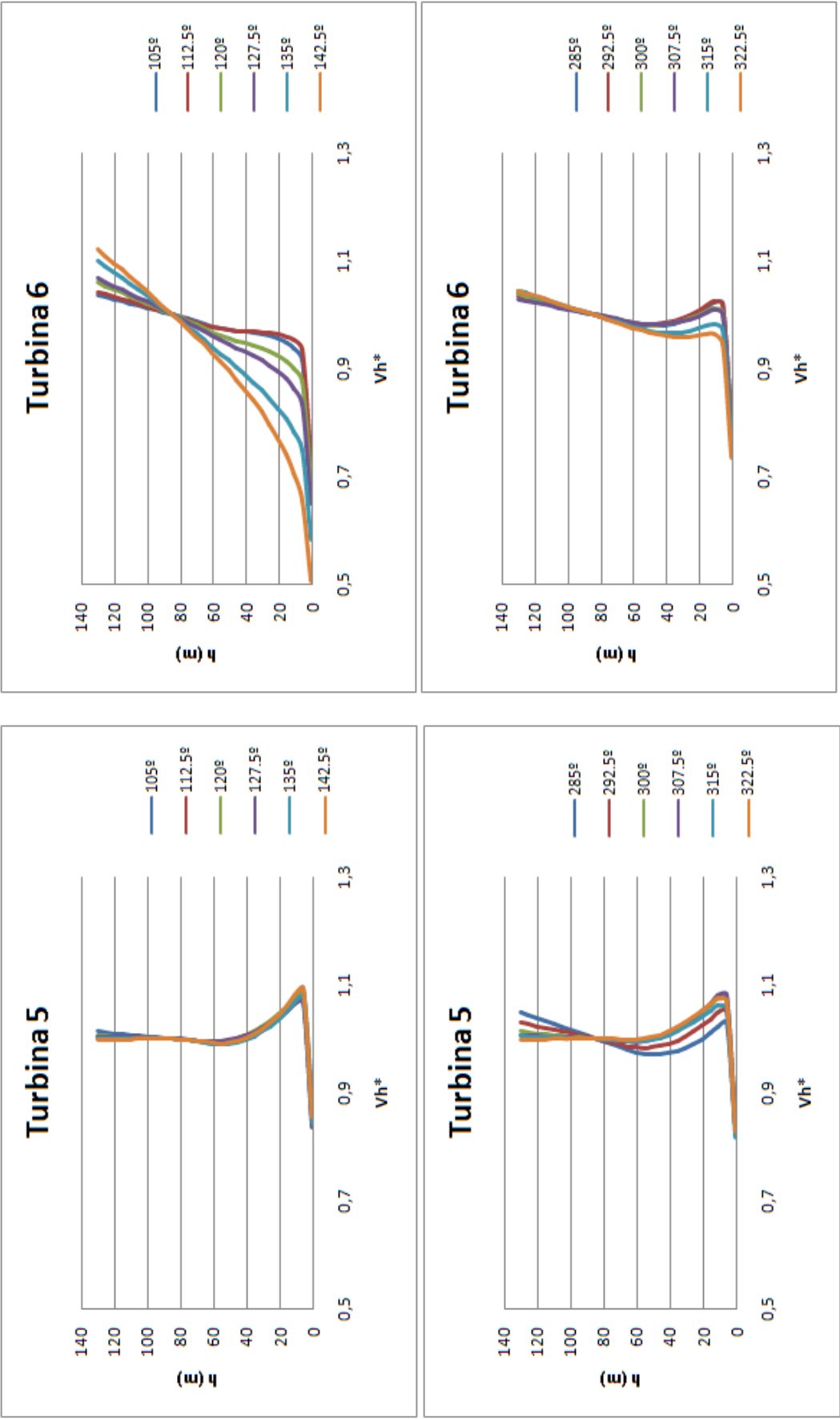


Figura B 3 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{85m}$)

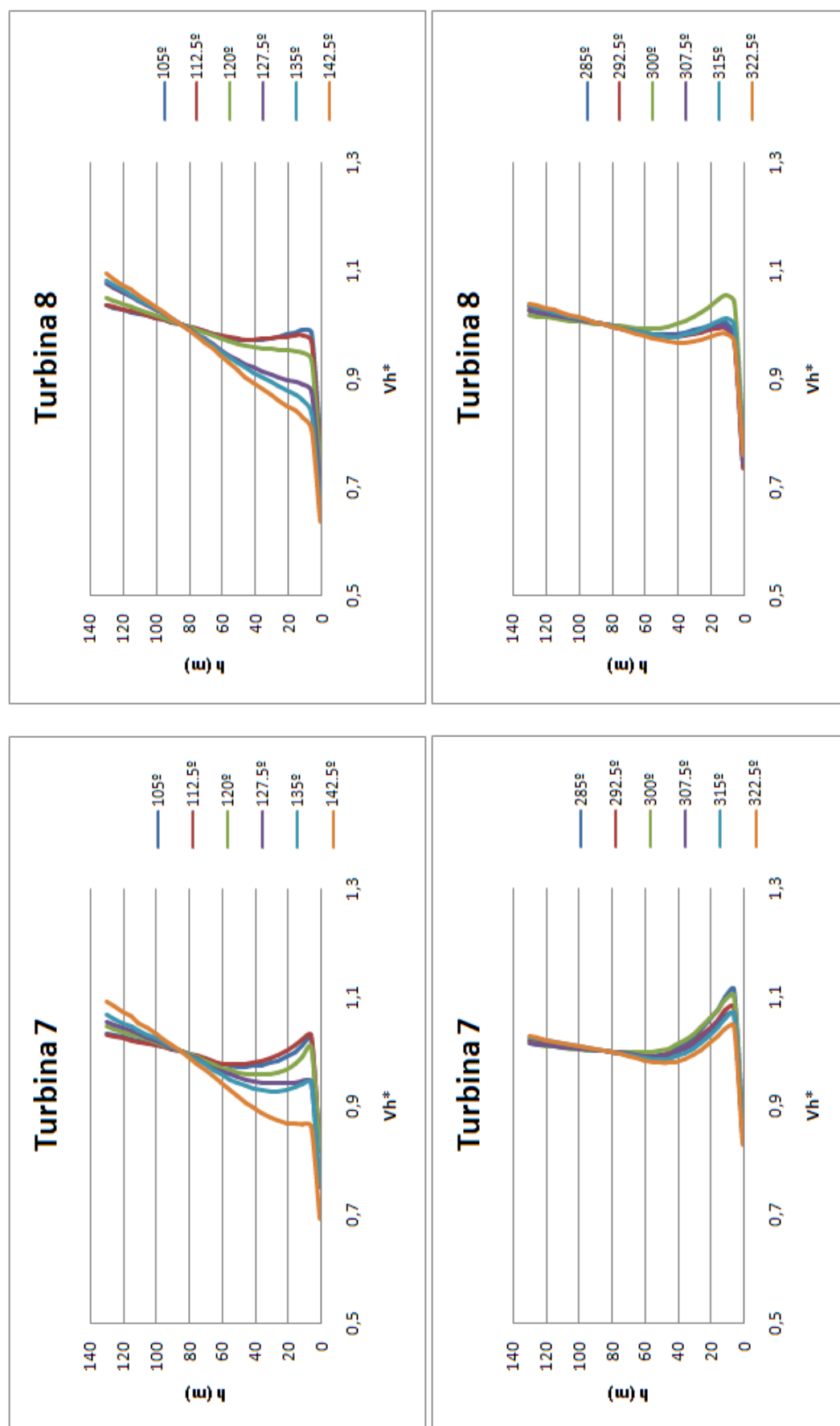


Figura B 4 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{85m}$)

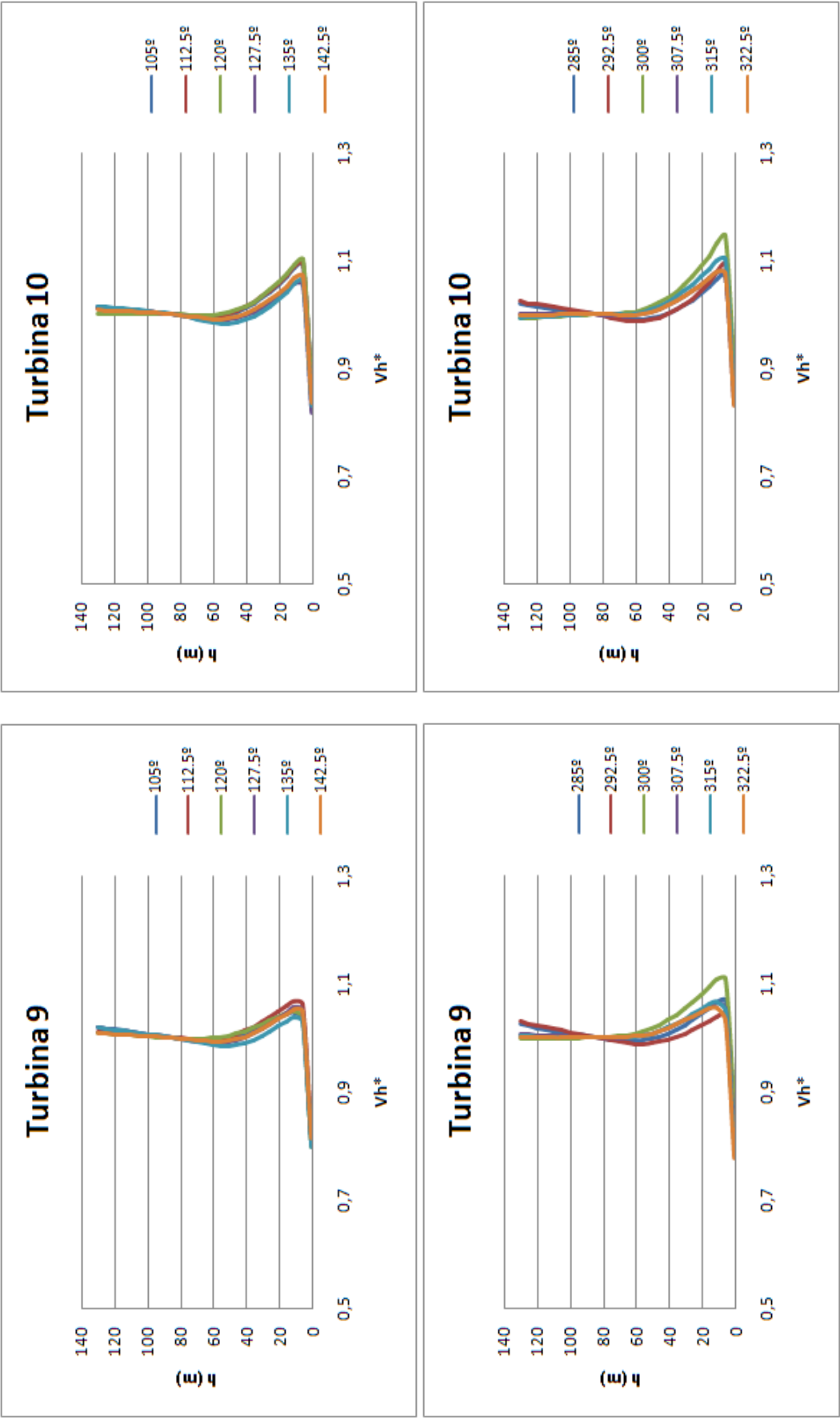


Figura B 5 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{85m}$)

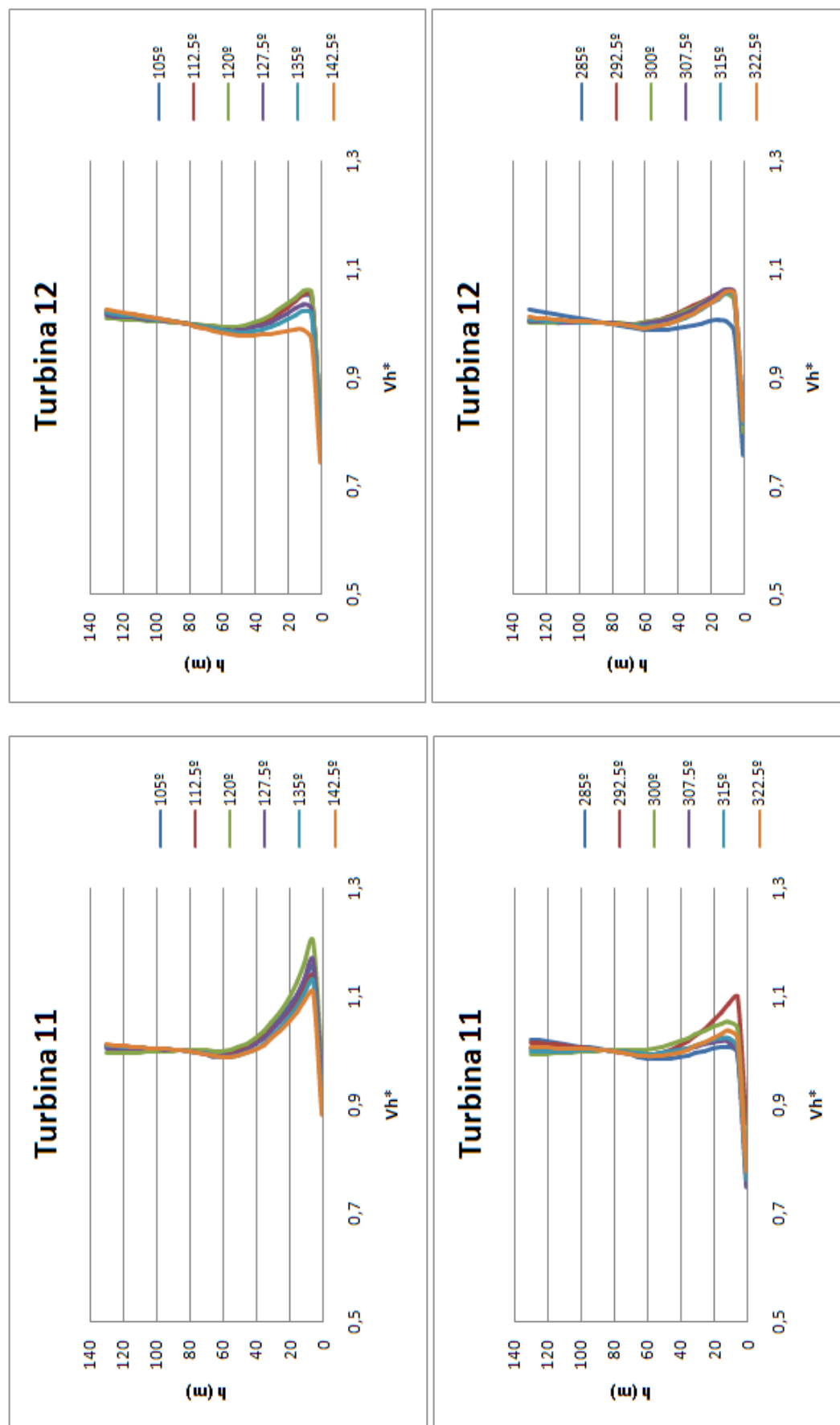


Figura B 6 – Perfis verticais de velocidade para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{8m}$)

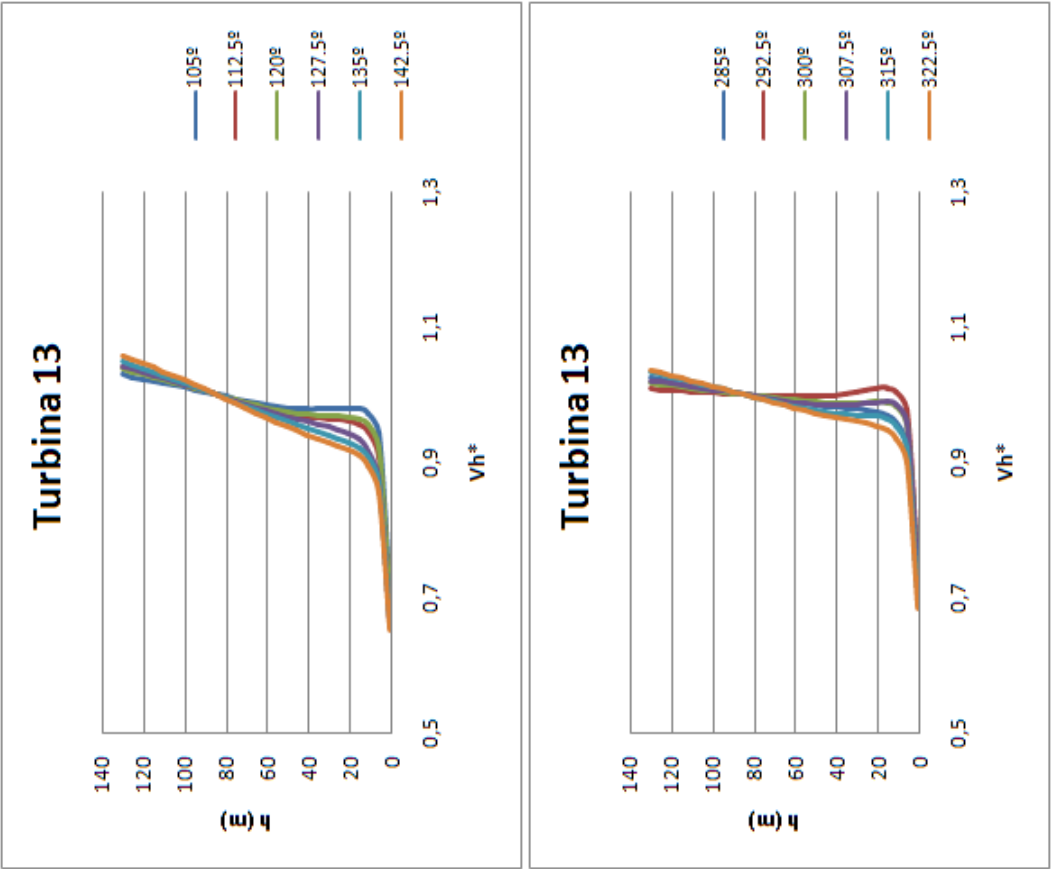


Figura B 7 – Perfis verticais de velocidade para Turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste ($Vh^* = Vh/Vh_{85m}$)

Perfis verticais de shear factor

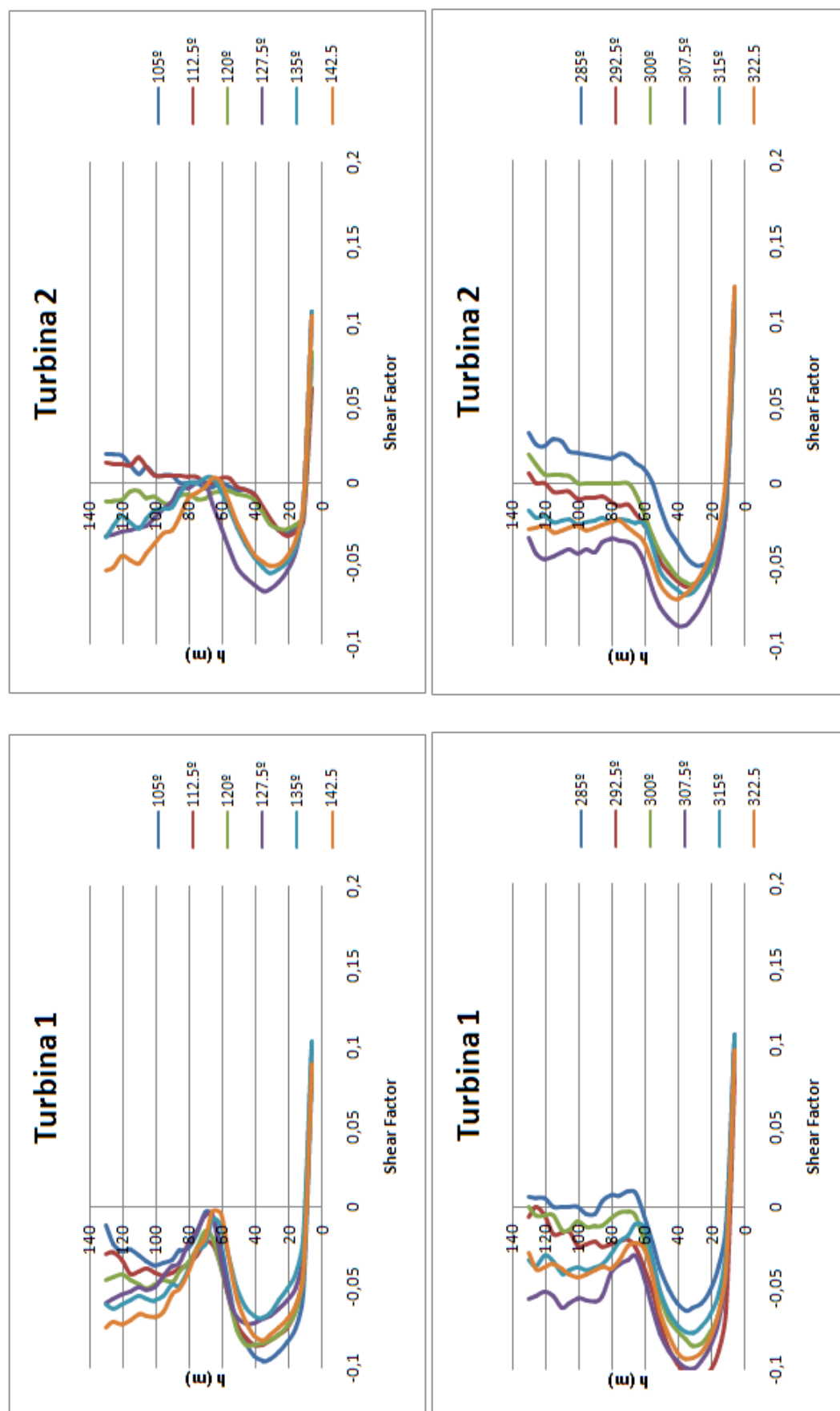


Figura B 8 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste

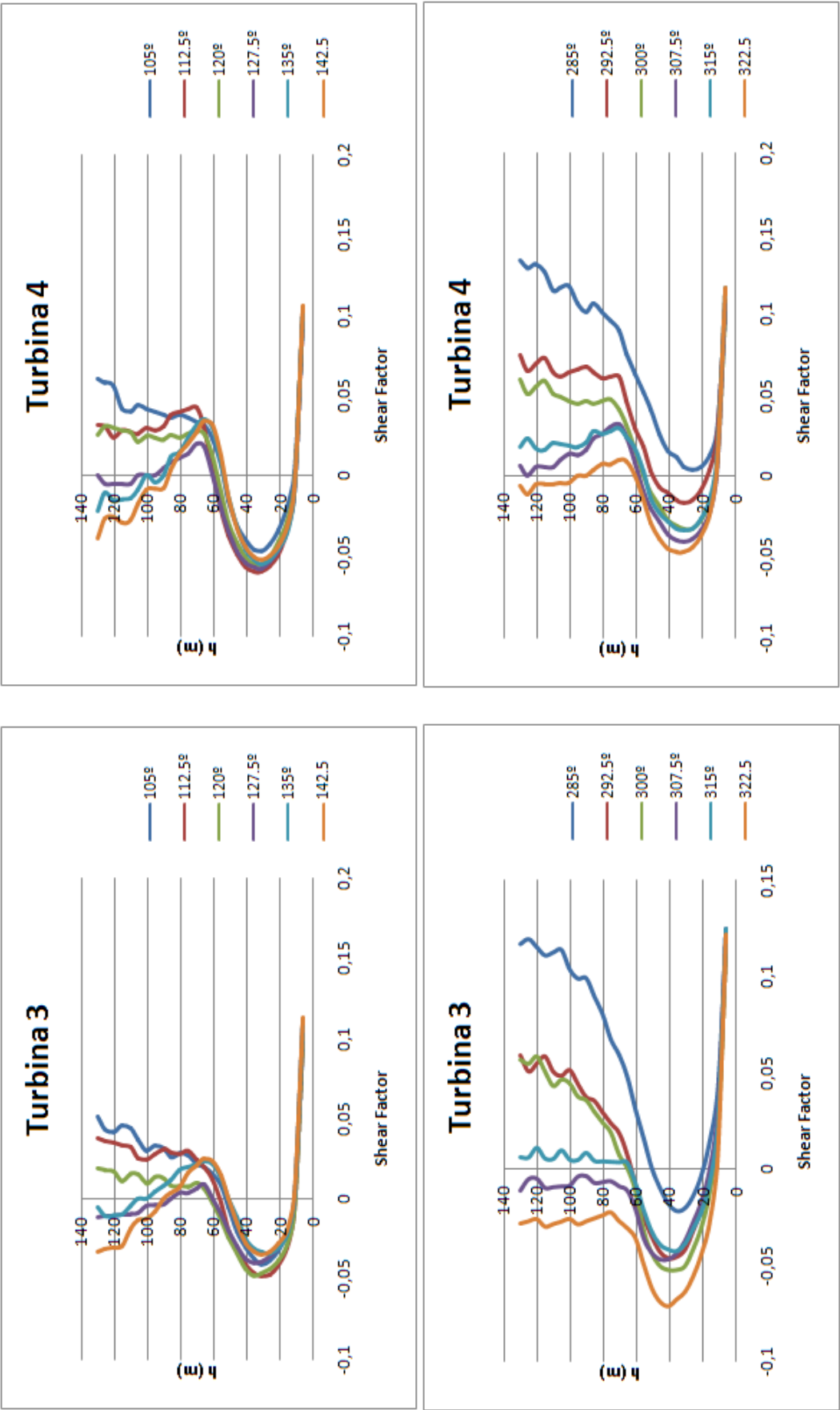


Figura B 9 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste

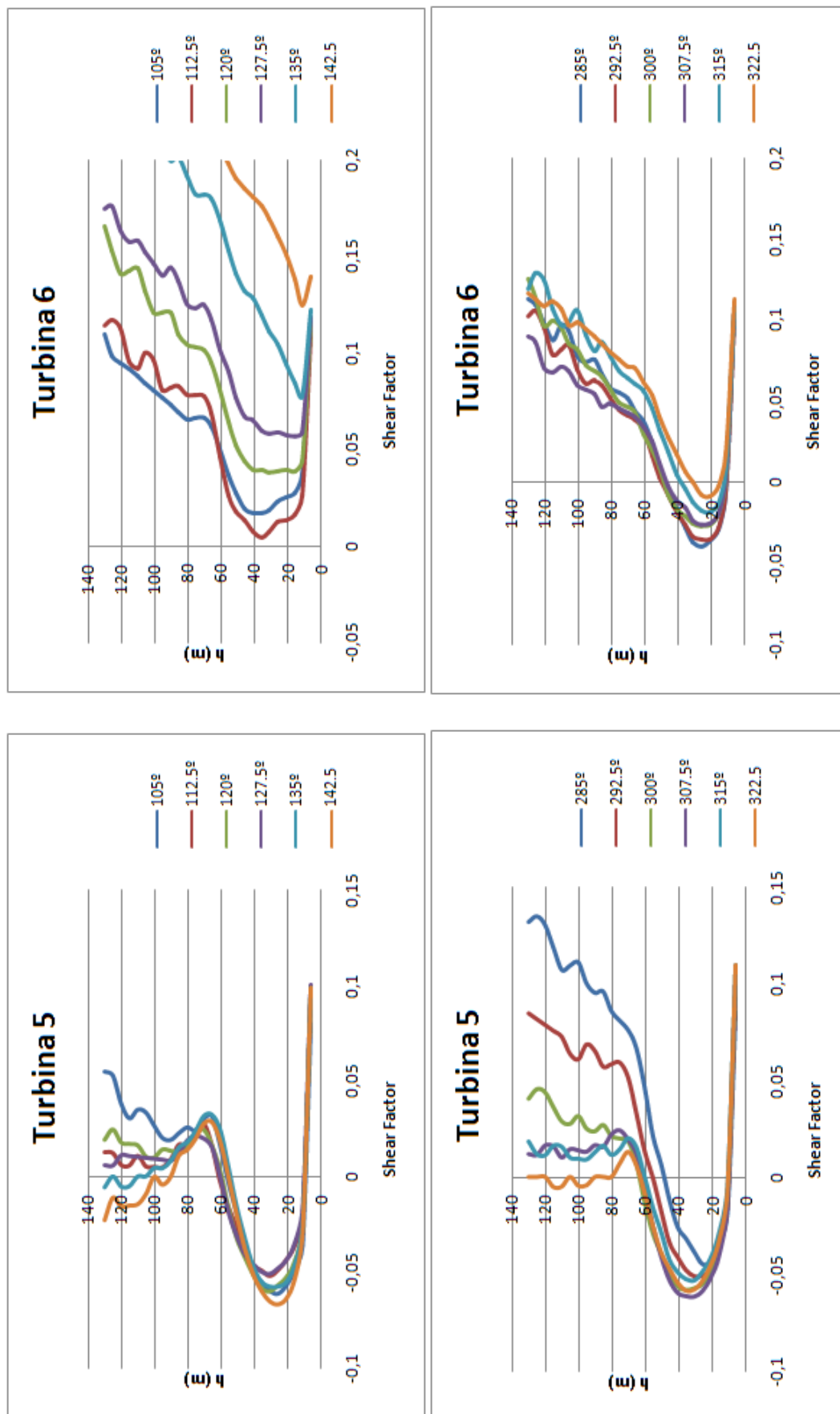


Figura B 10 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste

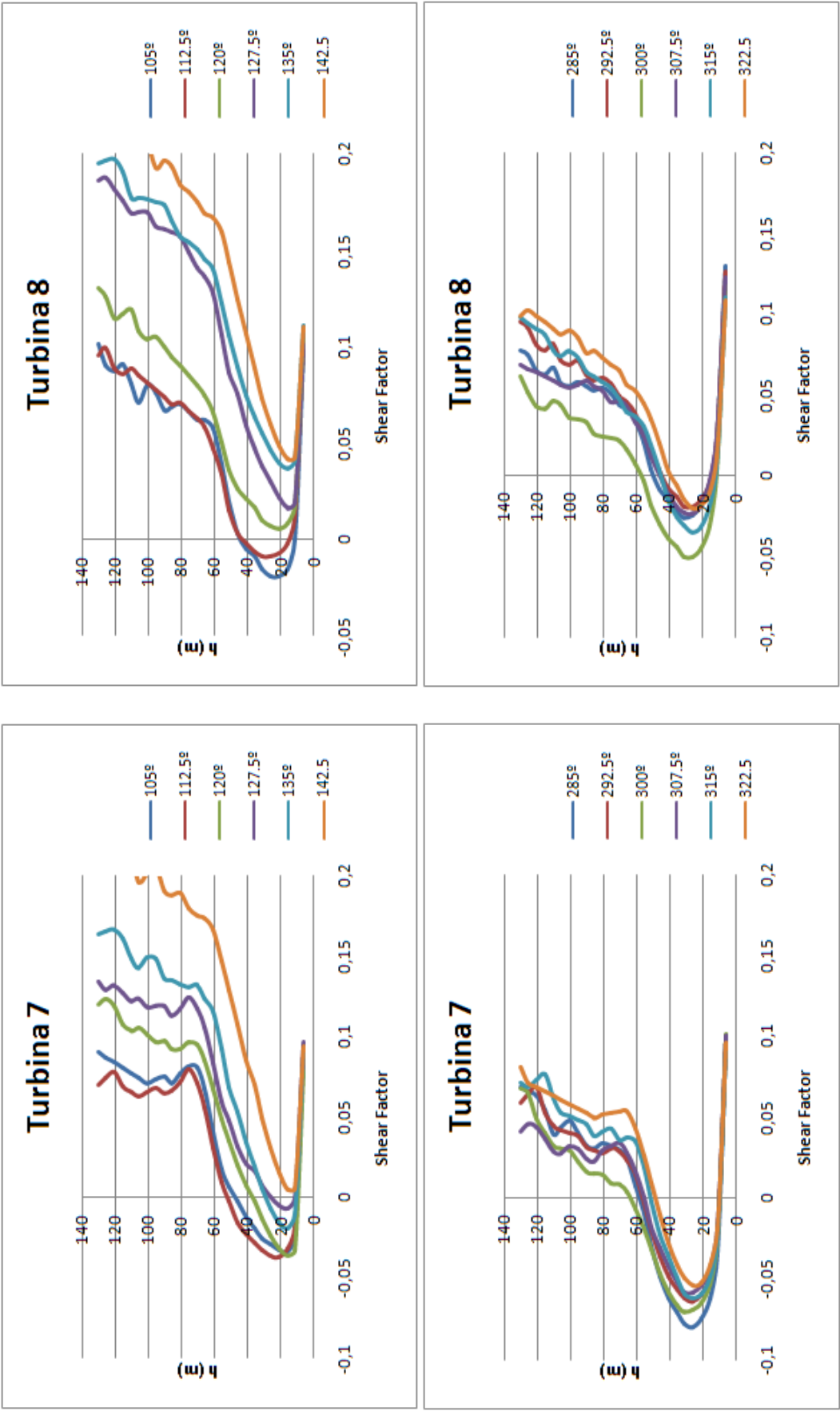


Figura B 11 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste

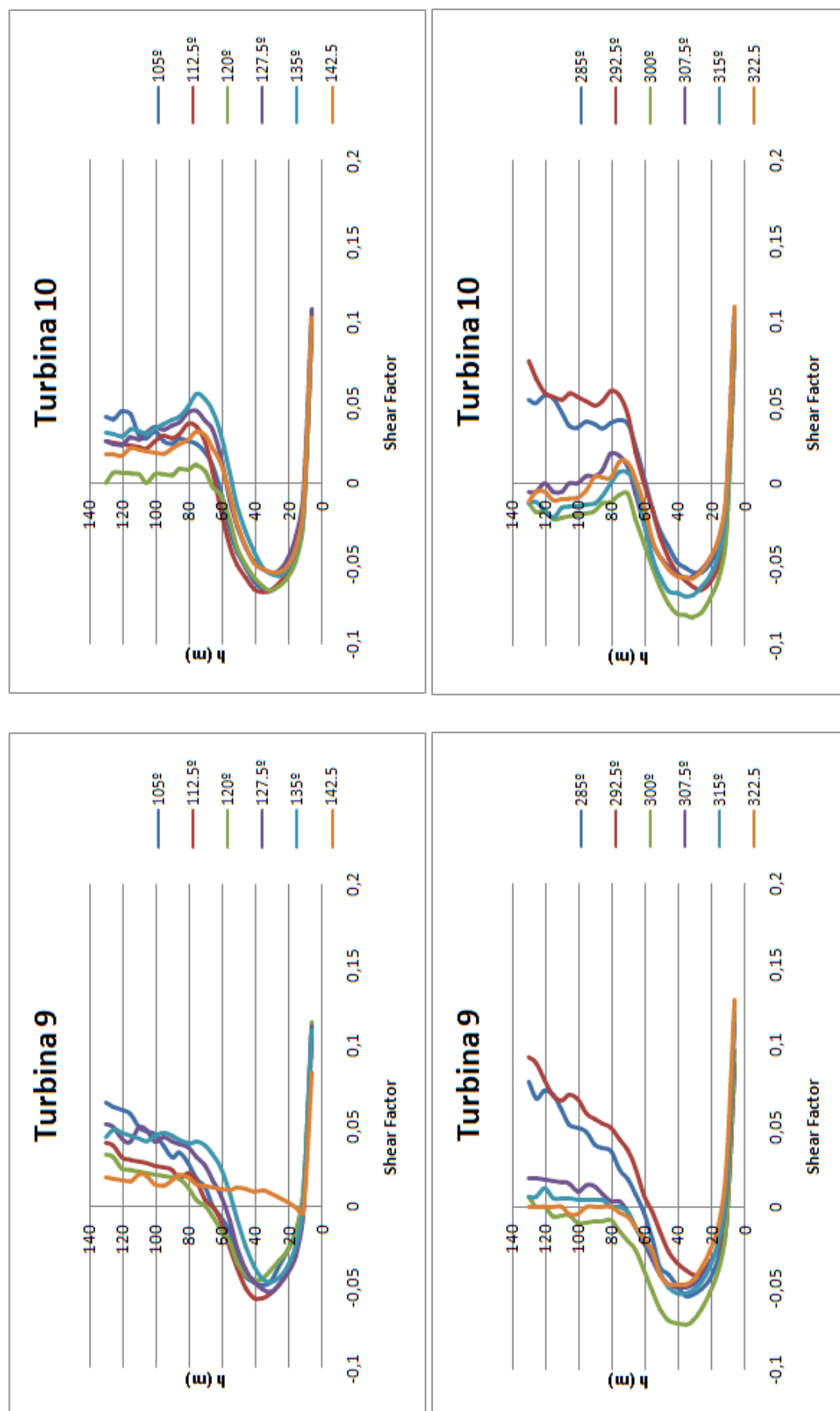


Figura B 12 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste

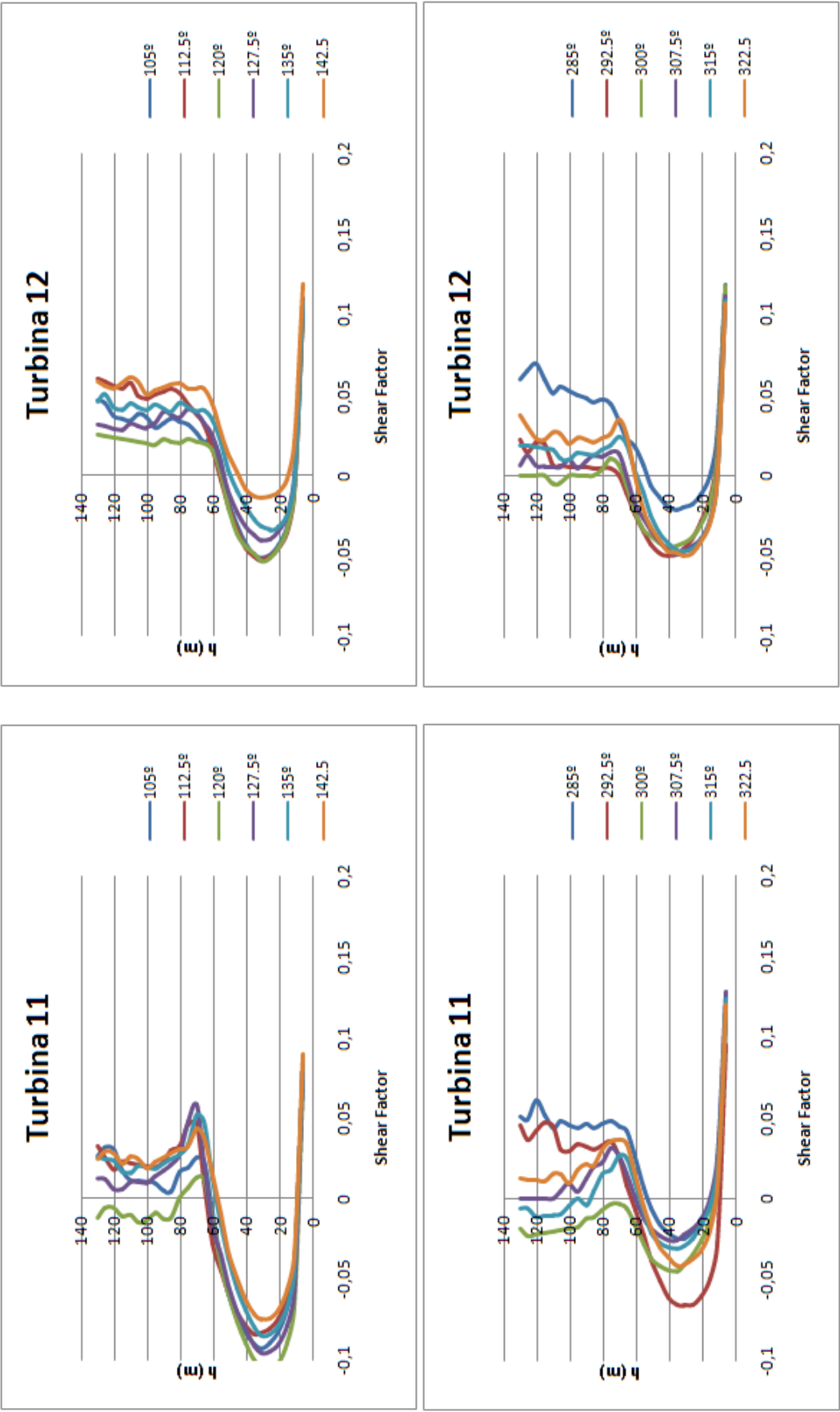


Figura B 13 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste

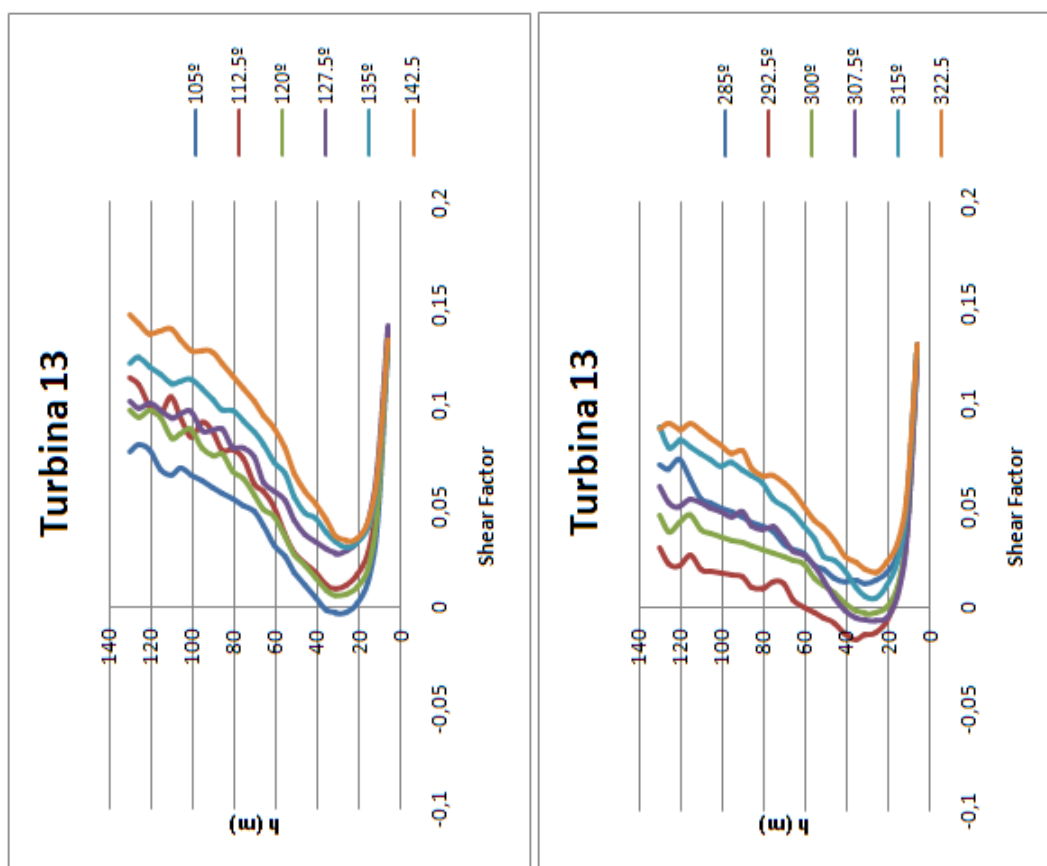


Figura B 14 – Perfis verticais de *shear factor* para Turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste

*Perfis Verticais de Intensidade
da Turbulência*

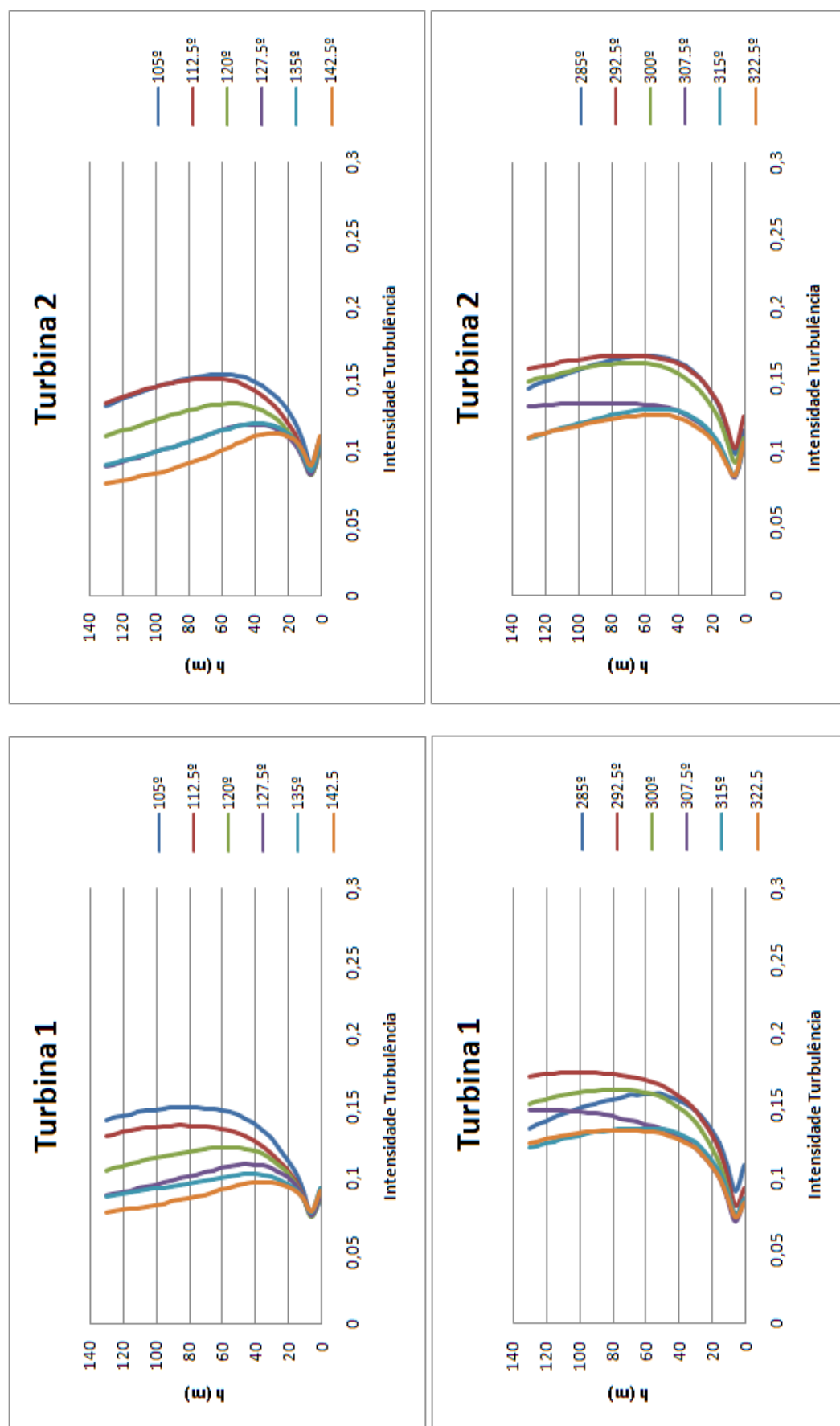


Figura B 15 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste

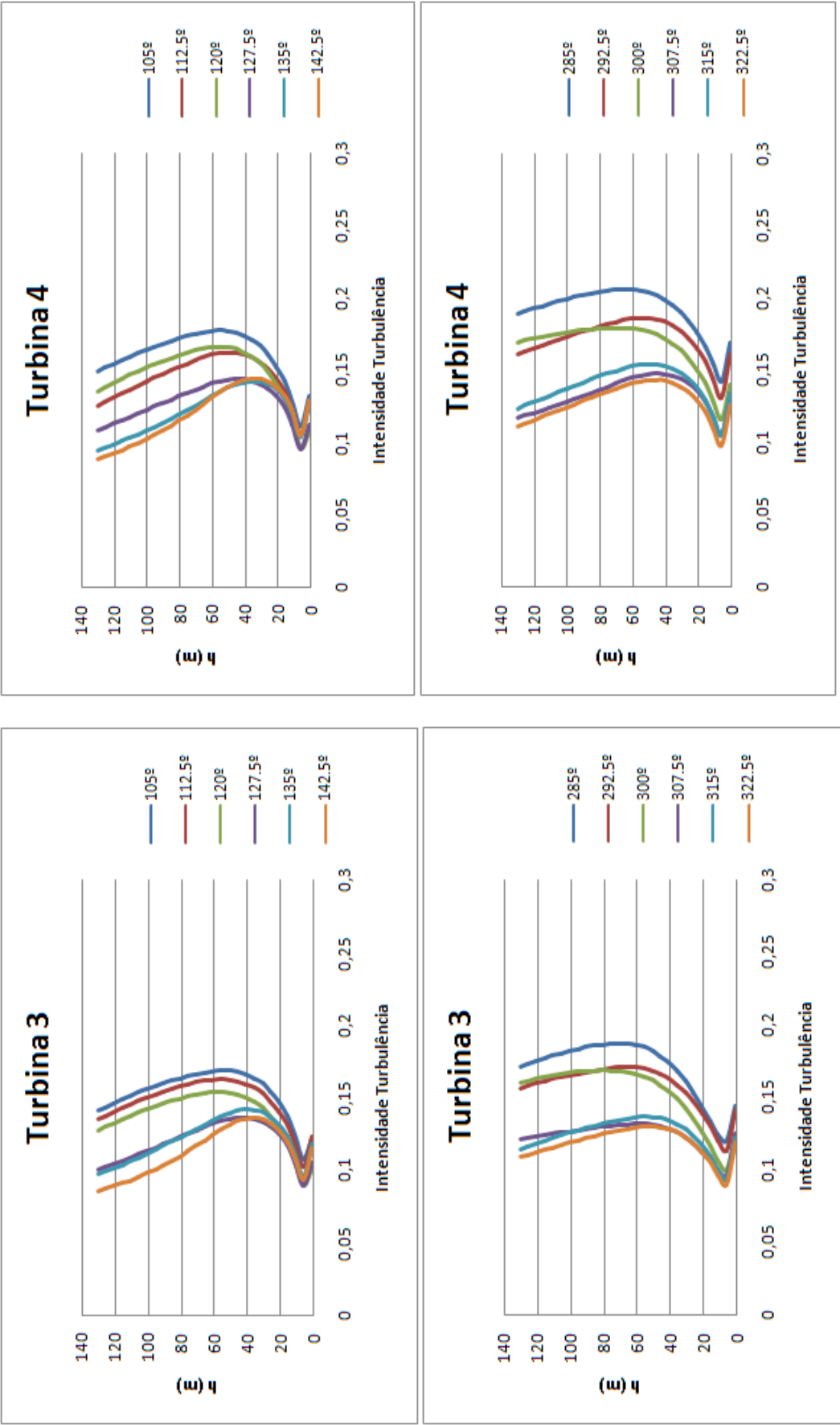


Figura B 16 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste

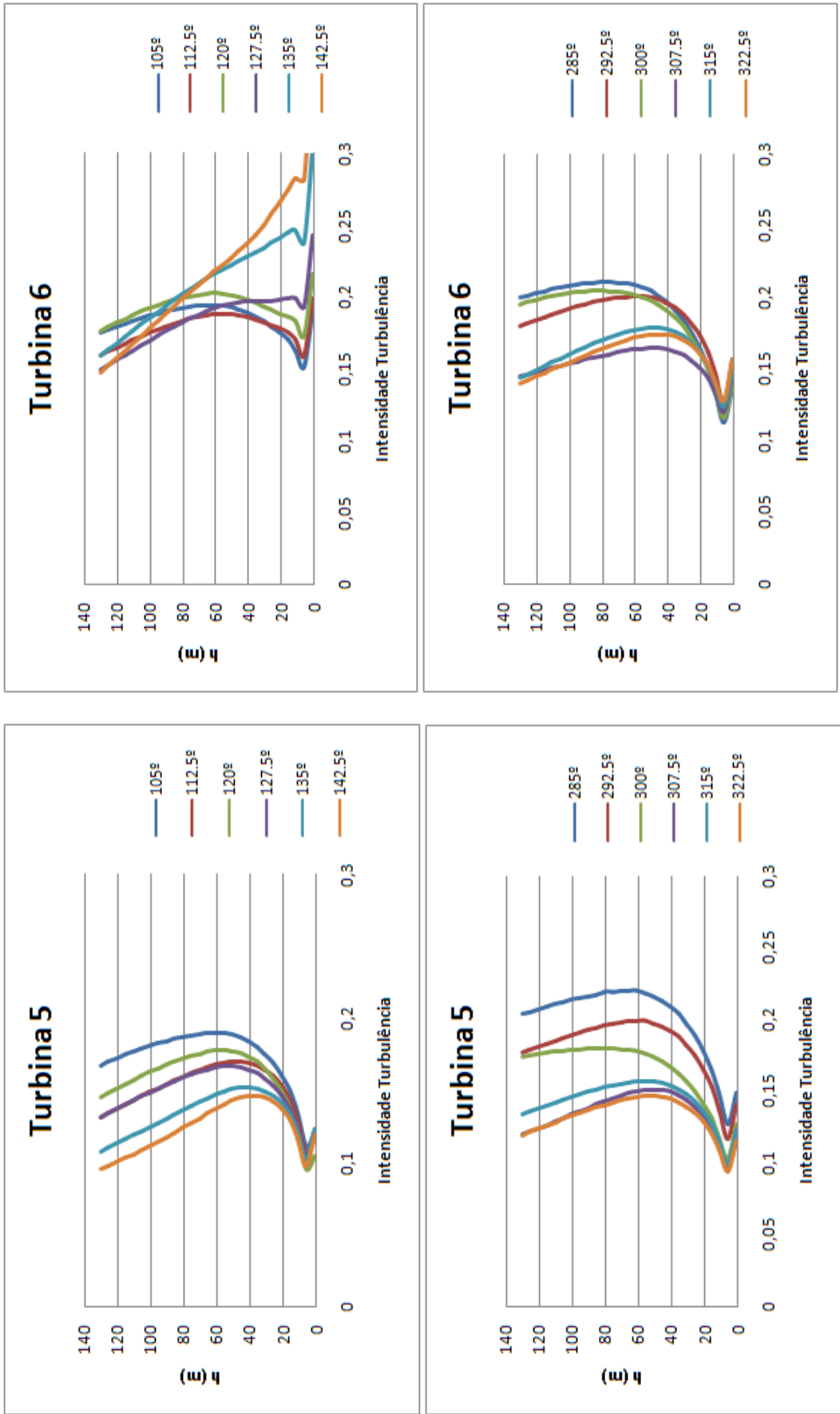


Figura B 17 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste

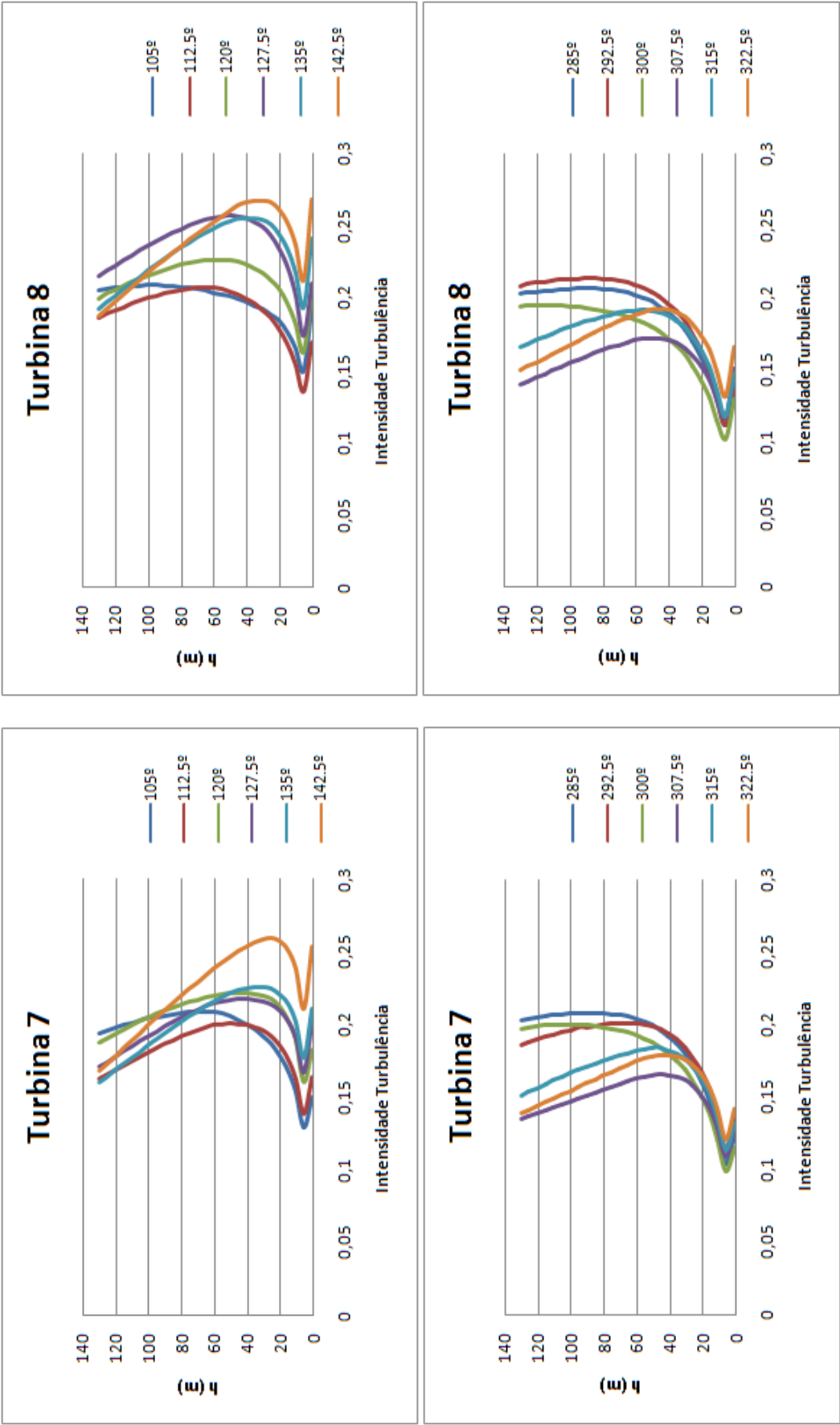


Figura B 18 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste

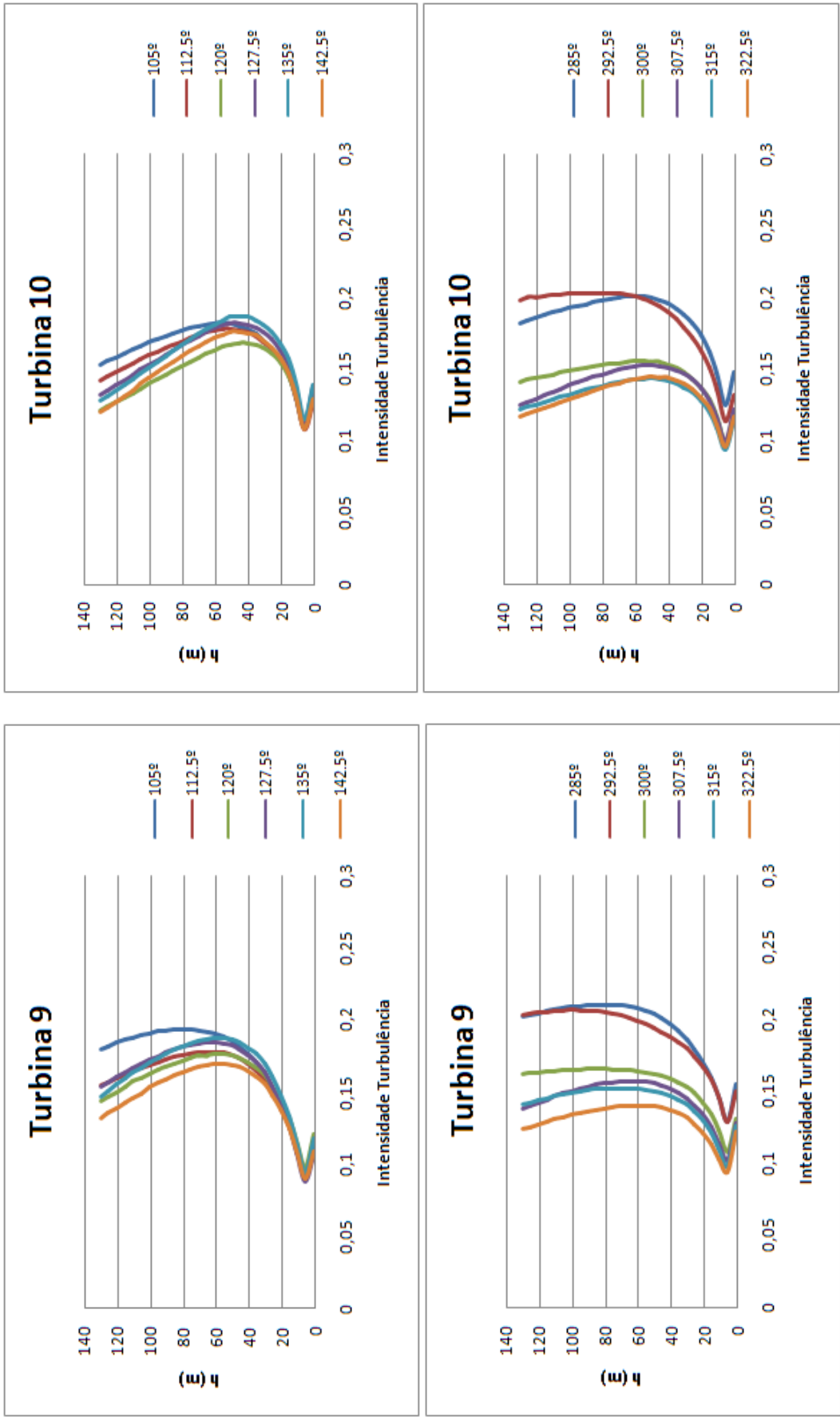


Figura B 19 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste

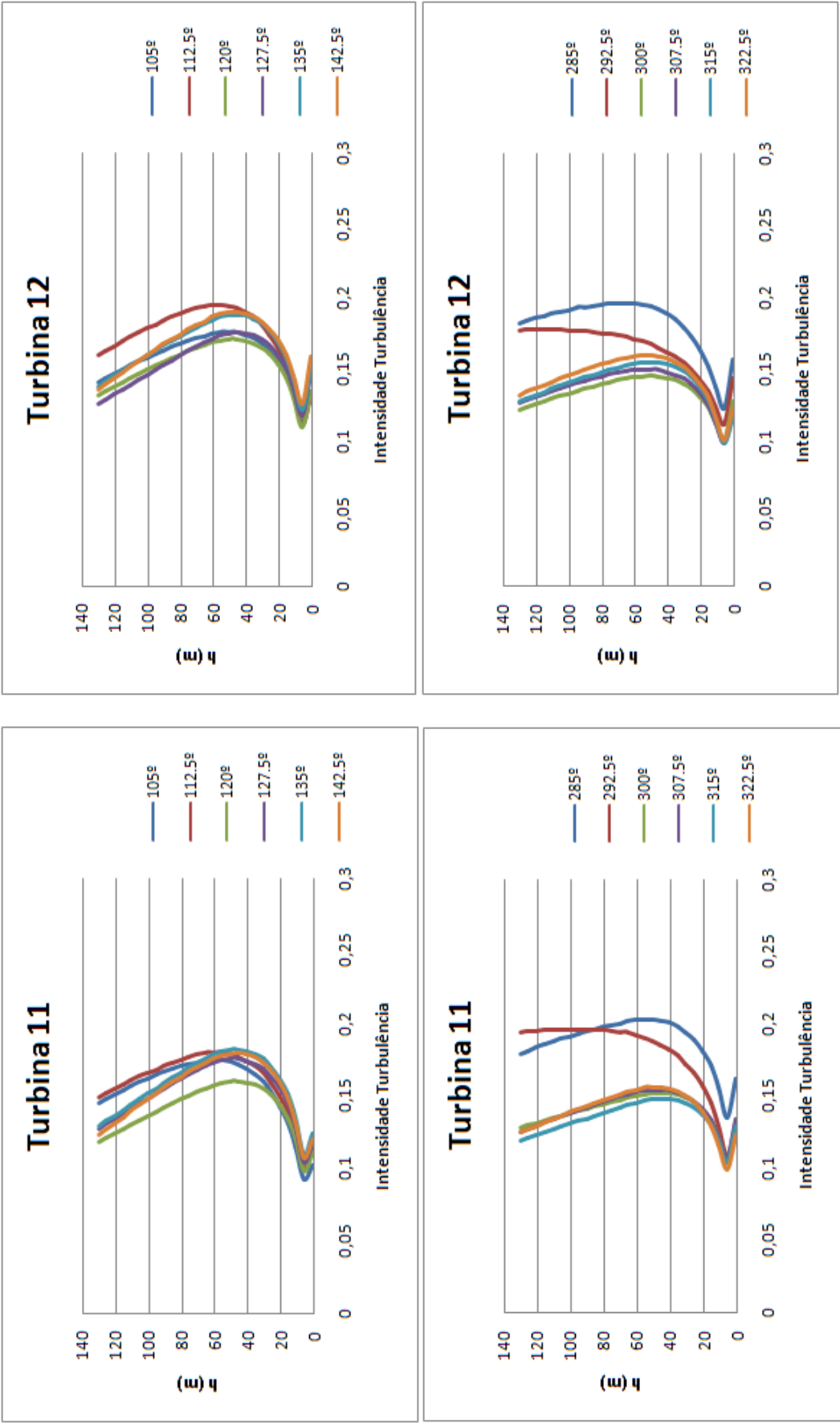


Figura B 20 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste

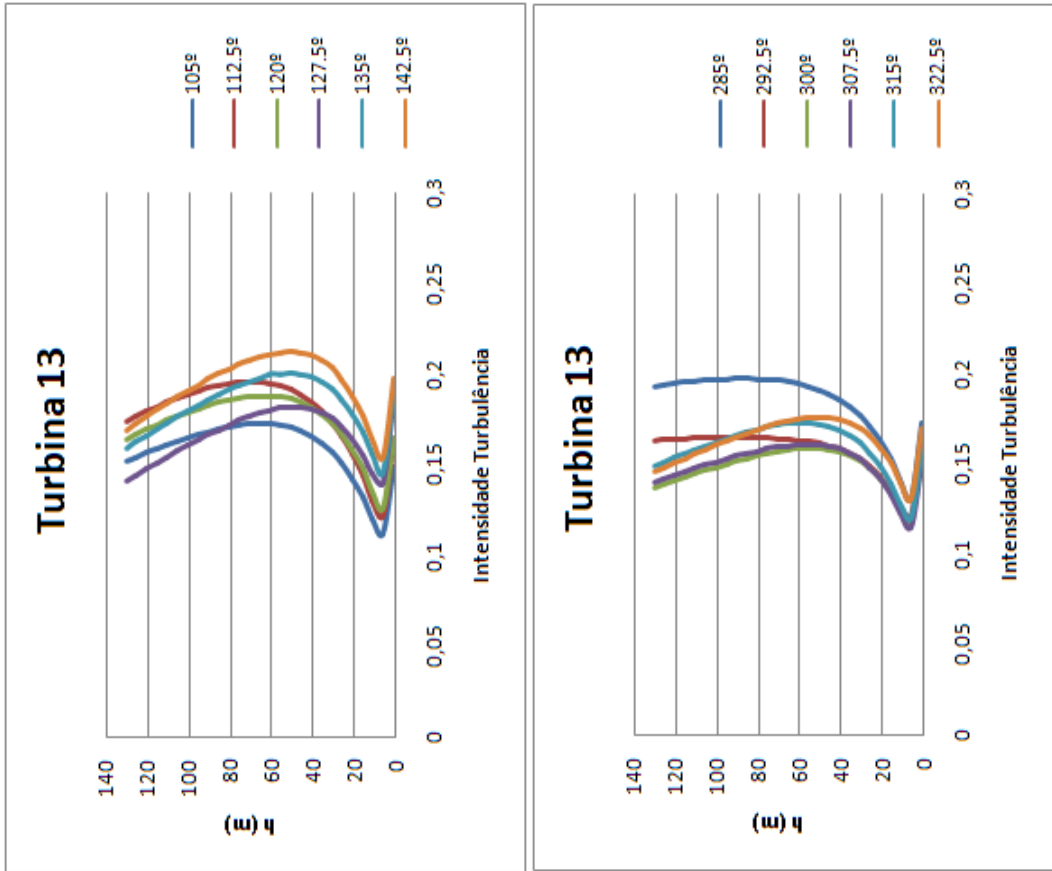


Figura B 21 – Perfis verticais de intensidade da turbulência para turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste

*Perfis verticais de inclinação
do escoamento*

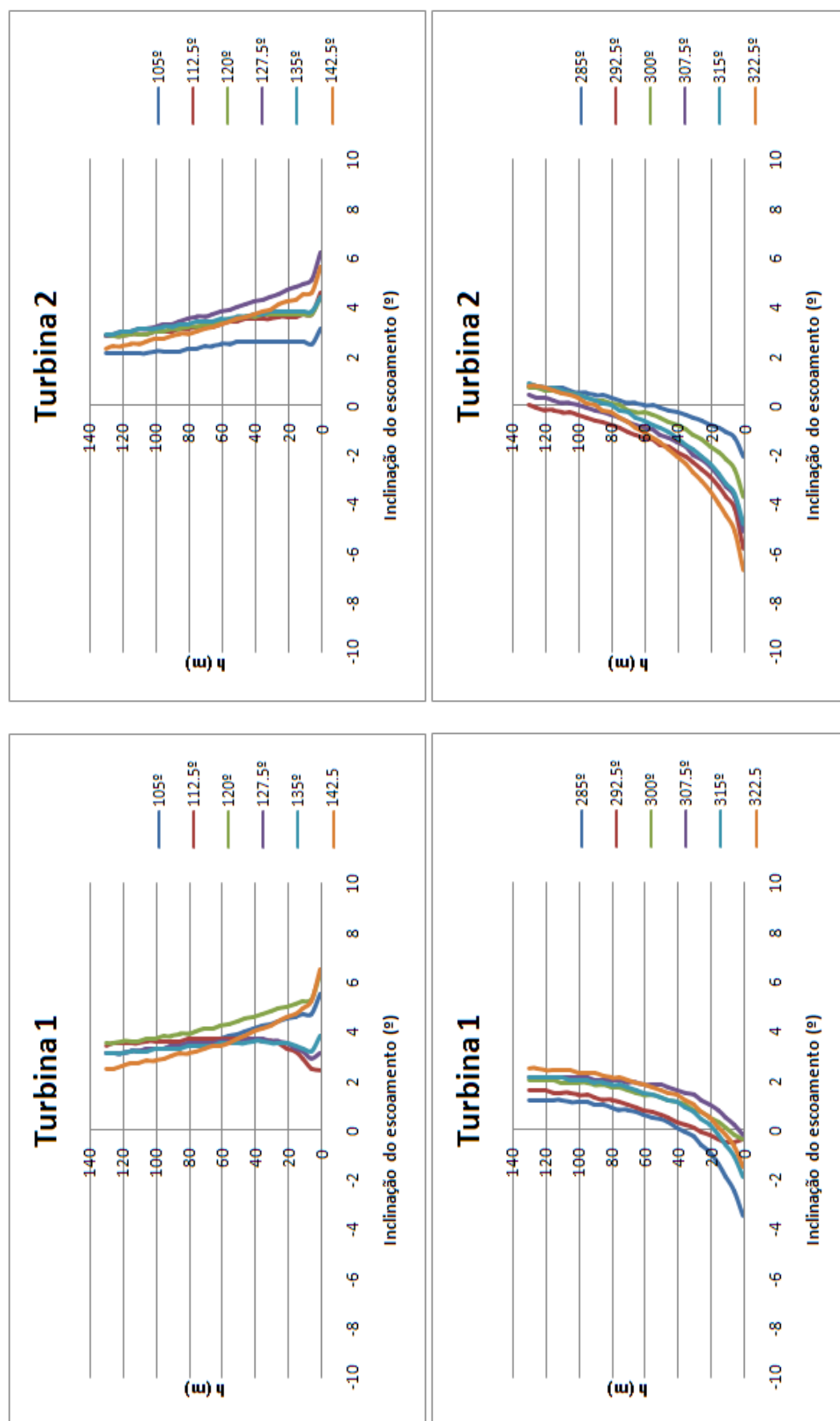


Figura B 22 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 1 e 2 Sectores de Sudeste e Noroeste

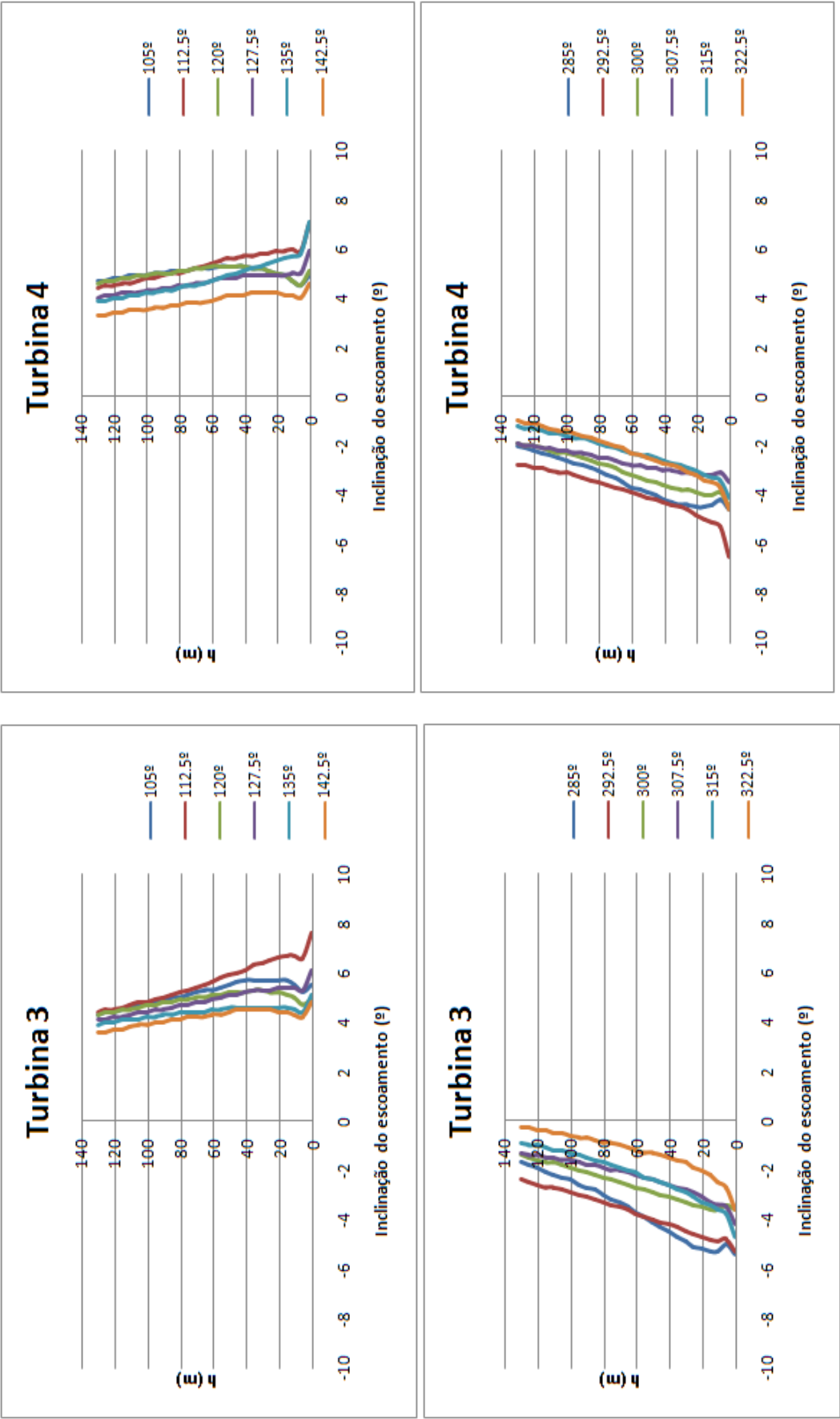


Figura B 23 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 3 e 4 Sectores de Sudeste e Noroeste

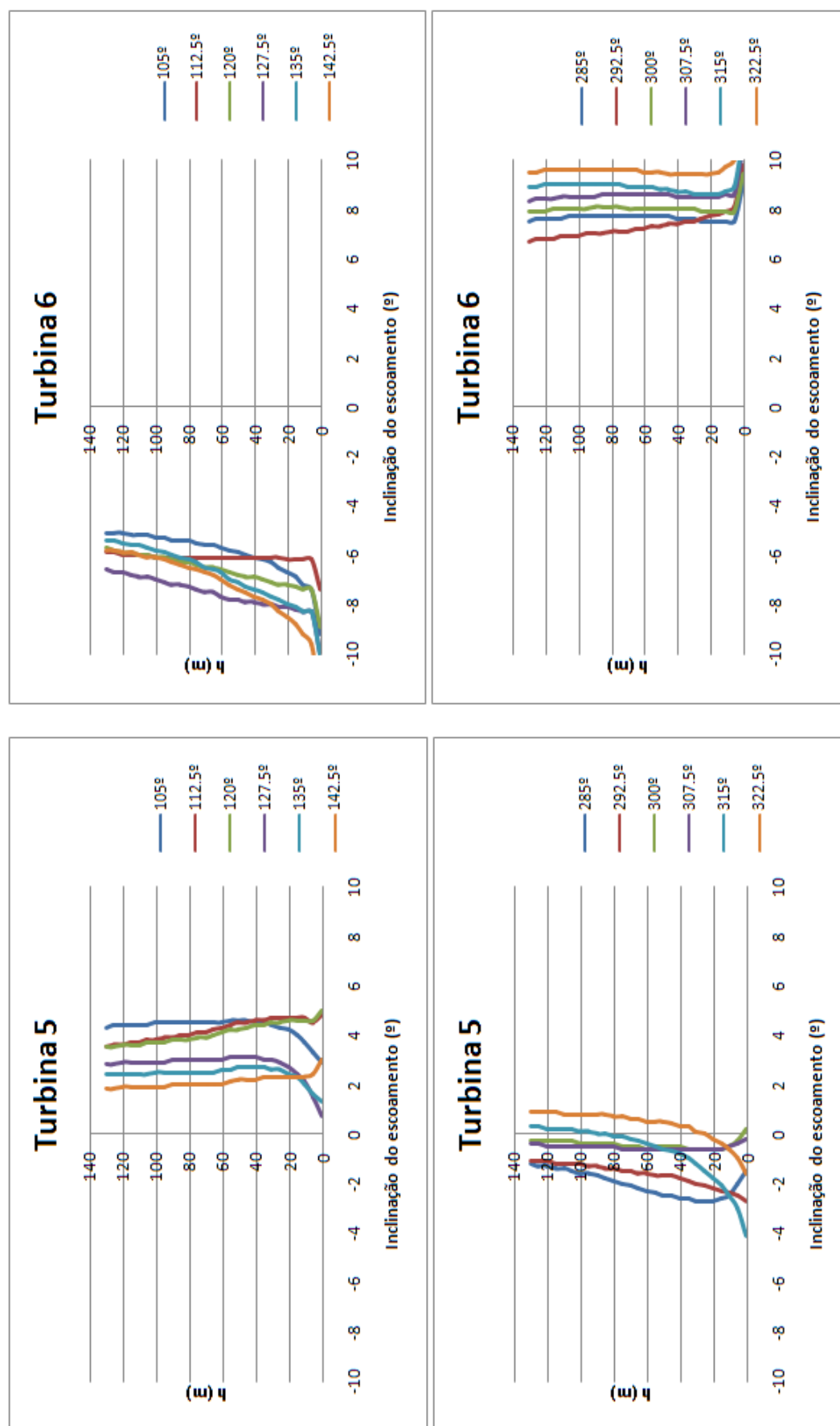


Figura B 24 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 5 e 6 Sectores de Sudeste e Noroeste

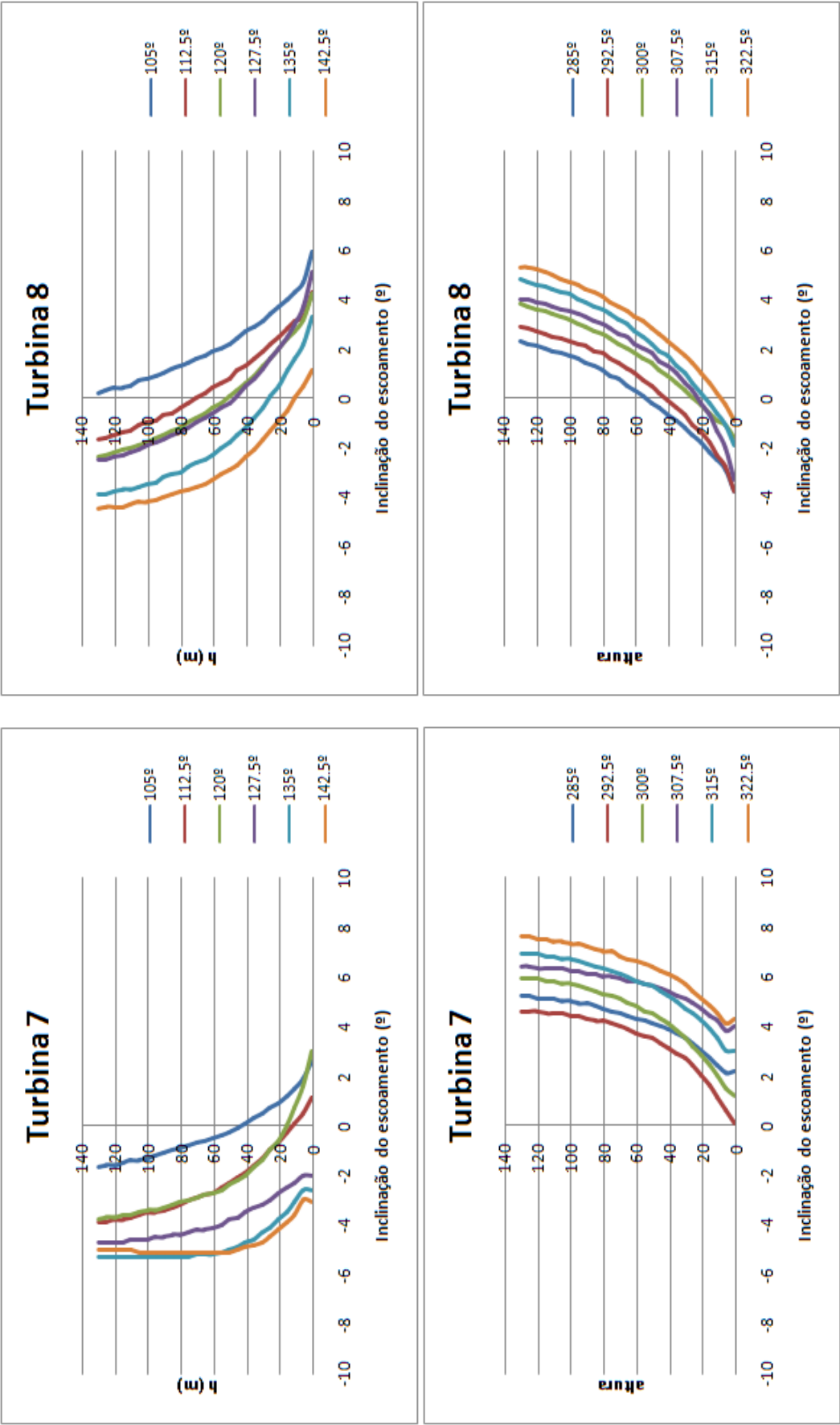


Figura B 25 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 7 e 8 Sectores de Sudeste e Noroeste

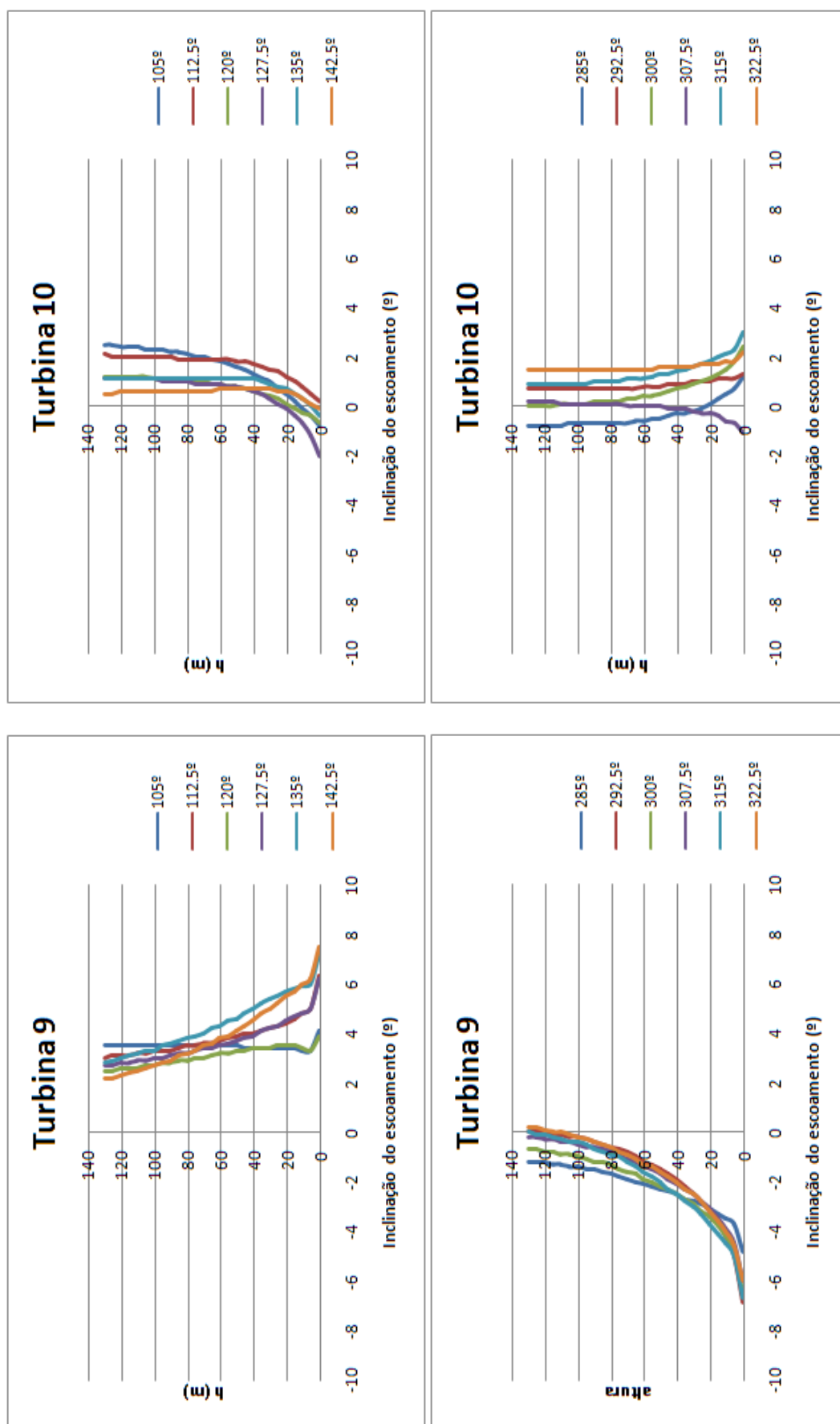


Figura B 26 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 9 e 10 Sectores de Sudeste e Noroeste

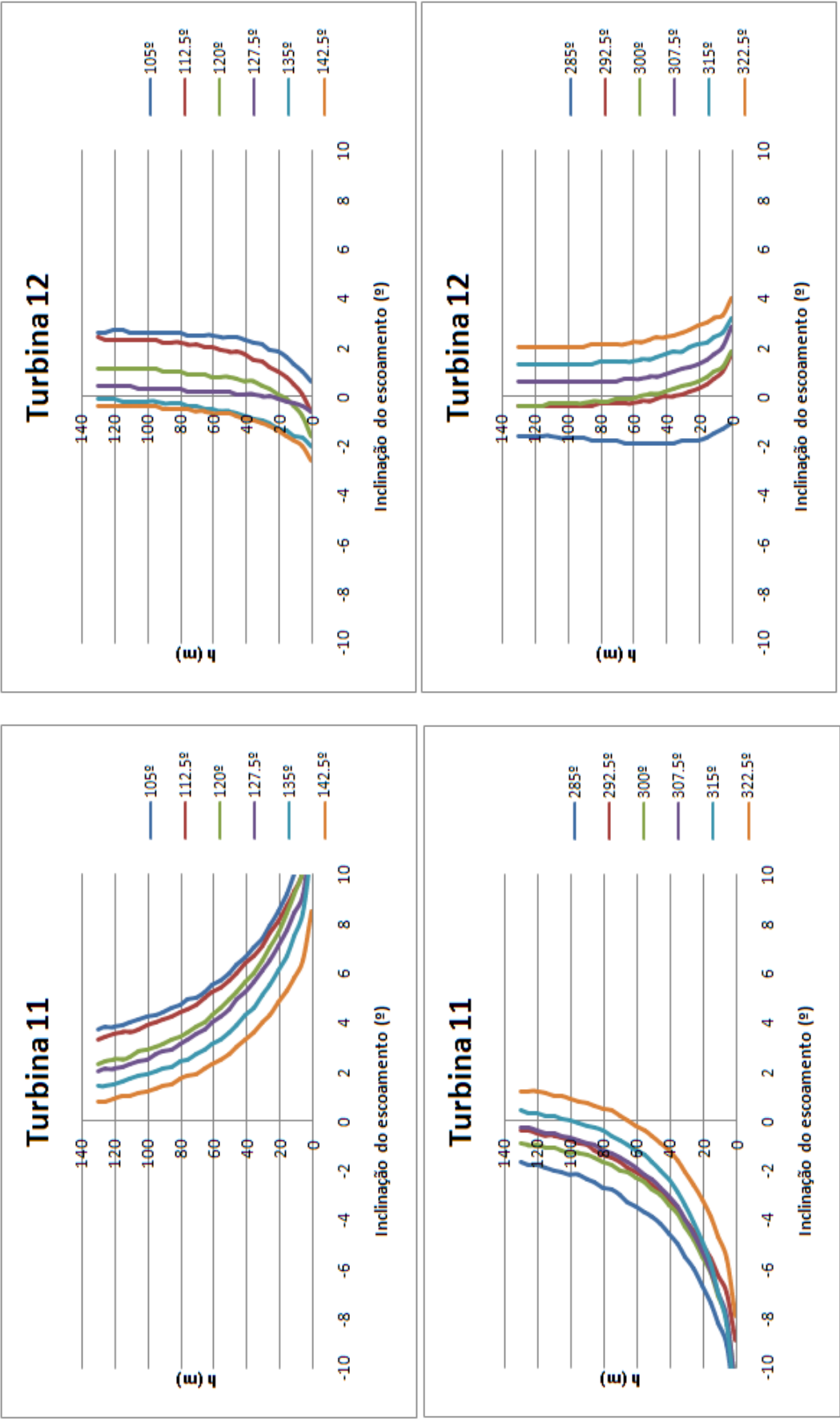


Figura B 27 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbinas 11 e 12 Sectores de Sudeste e Noroeste

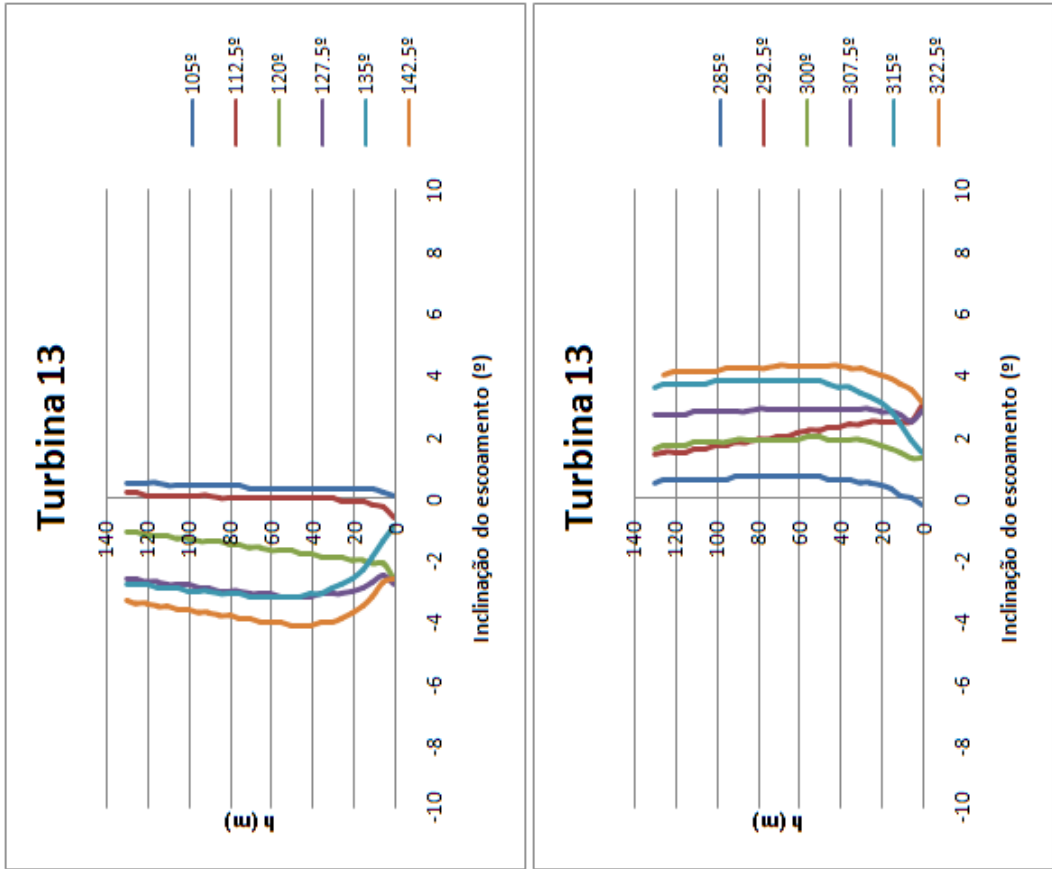


Figura B 28 – Perfis verticais de inclinação do escoamento para Turbina 13 Sectores de Sudeste e Noroeste

ANEXO C: Tabelas

Tabela C 1 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_042 a 30 m

	Estação de Referência P042_30 Sectores de Sudeste																	
	105º			112,5º			120º			127,5º			135º			142,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	-0.35	-	6.67	-0.01	-	9.25	0.37	-	6.65	0.50	-	5.15	-0.14	-	-3.10	0.67	-	0.54
P384_30	-16.94	34.96	34.17	-6.26	60.25	25.09	1.07	65.31	31.76	2.51	89.96	46.94	-3.23	96.97	38.73	1.08	80.64	15.46
P384_60	-17.04	35.31	17.38	-8.78	60.04	41.73	-2.87	65.31	43.68	0.57	89.14	60.82	-2.64	93.44	50.74	1.99	78.63	23.17
P385_30	-23.13	12.20	30.04	-15.20	19.23	40.34	-11.95	14.32	33.06	-10.96	25.68	43.40	-11.45	33.06	44.13	-10.28	35.50	41.85
P385_60	-25.28	15.58	33.60	-18.34	22.90	48.61	-14.38	19.18	32.41	-11.82	28.43	44.43	-11.32	34.27	43.48	-8.94	34.69	39.07
	Estação de Referência P042_30 Sectores de Noroeste																	
	285º			292,5º			300º			307,5º			315º			322,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	0.53	-	97.55	0.10	-	99.95	-0.03	-	67.55	0.83	-	43.71	0.89	-	27.82	0.57	-	17.44
P384_30	-9.26	-25.53	-2.90	4.24	-36.51	-13.16	6.94	-33.79	-21.93	11.88	-25.45	-21.31	20.18	-15.86	-20.83	31.09	-20.62	-24.85
P384_60	-13.07	-20.07	20.81	-2.87	-31.85	4.35	1.12	-30.18	-14.89	6.27	-22.68	-14.74	14.00	-13.37	-16.03	23.23	-17.93	-23.41
P385_30	-6.99	18.89	96.91	-0.85	4.53	66.79	-0.25	-5.76	33.86	1.27	-2.36	28.46	4.25	5.41	26.95	9.20	0.68	25.34
P385_60	-10.71	18.99	111.03	-4.76	6.62	90.73	-2.53	-4.80	37.63	-0.22	-1.87	32.36	3.47	5.80	28.30	8.28	0.87	27.87

Tabela C 2 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_384 a 30 m

	Estação de Referência P384_30 Sectores de Sudeste																	
	105º			112,5º			120º			127,5º			135º			142,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	-3.02	-26.11	23.20	0.03	-35.55	11.51	1.93	-36.11	-6.72	3.17	-46.73	-4.02	3.68	-49.10	-4.66	3.02	-47.02	0.51
P384_30	0.30	-	6.30	0.55	-	22.66	-0.31	-	29.04	0.11	-	58.69	0.13	-	65.89	0.34	-	35.23
P384_60	-2.34	-0.31	15.45	1.43	0.20	35.91	4.64	1.39	42.26	6.58	0.49	76.41	7.07	-0.58	88.65	6.93	-2.78	40.45
P385_30	-13.77	-17.70	32.21	-9.59	-24.56	37.80	-11.74	-28.72	30.49	-10.35	-33.35	48.33	-9.74	-34.30	54.49	-11.22	-25.53	58.53
P385_60	-17.33	-13.89	42.52	-12.12	-21.66	48.62	-11.84	-25.39	28.60	-9.09	-31.76	46.95	-8.38	-33.80	53.35	-9.02	-27.24	51.00
	Estação de Referência P384_30 Sectores de Noroeste																	
	285º			292,5º			300º			307,5º			315º			322,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	17.63	14.07	45.64	12.67	28.21	67.50	16.49	31.23	50.80	21.82	30.31	38.05	21.66	18.53	27.81	30.97	20.23	7.87
P384_30	0.16	-	-11.16	0.22	-	-3.59	0.30	-	-9.74	0.01	-	-8.13	0.13	-	-8.14	0.06	-	-18.40
P384_60	-3.28	4.45	9.96	-3.05	3.76	17.78	-1.15	2.67	-0.13	-0.55	2.92	2.21	-0.36	3.43	0.49	-0.09	4.26	-15.06
P385_30	2.24	27.00	56.03	2.99	32.82	55.94	3.72	23.14	33.72	5.14	25.47	34.16	5.48	26.10	35.79	12.03	27.06	19.72
P385_60	-0.64	29.61	65.29	0.02	37.58	77.83	2.37	26.61	37.91	4.99	27.95	39.67	6.08	27.14	39.58	13.03	26.95	24.48

Tabela C 3 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_385 a 30 m

	Estação de Referência P385_30 Sectores de Sudeste																	
	105º			112,5º			120º			127,5º			135º			142,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	0.22	-13.04	-4.71	0.26	-18.18	7.41	2.03	-11.06	1.87	3.76	-17.08	-0.01	5.83	-18.71	-1.64	7.04	-19.31	3.78
P384_30	-6.67	13.82	-5.74	5.56	30.03	13.22	9.66	39.87	19.48	13.24	48.58	35.36	17.92	57.71	51.57	21.41	48.32	42.50
P384_60	-8.16	13.85	3.81	-0.76	29.38	28.10	3.81	39.86	30.08	8.64	48.42	50.48	13.53	56.20	69.28	18.25	48.38	57.03
P385_30	-0.23	-	11.54	0.28	-	37.50	-0.04	-	25.06	0.17	-	34.16	0.54	-	42.09	-0.23	-	45.24
P385_60	-4.75	4.39	20.26	-5.52	4.78	54.67	-4.04	6.10	30.90	-1.81	4.39	40.34	-0.34	3.55	45.87	0.68	1.60	46.42
	Estação de Referência P385_30 Sectores de Noroeste																	
	285º			292,º			300º			307,5º			315º			322,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	10.26	-10.71	70.46	7.03	-0.15	99.17	10.64	11.13	83.22	15.33	7.94	63.03	16.97	-2.71	37.47	19.90	-5.38	11.81
P384_30	6.23	-24.75	0.85	9.54	-37.72	-13.22	11.02	-30.93	-17.06	11.97	-29.79	-16.80	13.11	-26.53	-18.06	14.83	-21.78	-20.75
P384_60	3.46	-22.14	19.07	1.73	-33.55	2.43	5.04	-27.15	-9.67	6.32	-25.75	-6.75	7.97	-22.59	-9.30	11.43	-20.06	-18.71
P385_30	-0.31	-	74.83	-0.11	-	72.94	0.53	-	50.26	0.14	-	48.51	0.20	-	44.81	0.07	-	36.29
P385_60	-3.38	1.72	84.75	-3.57	2.97	95.59	-1.18	2.33	53.95	-0.40	1.64	54.21	0.30	0.98	47.18	0.75	-0.48	40.36

Tabela C 4 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_384 a 60 m

	Estação de Referência P384_60 Sectores de Sudeste																	
	105º			112,5º			120º			127,5º			135º			142,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	-1.84	-25.23	25.14	-0.52	-35.11	9.75	-0.11	-41.80	9.71	0.54	-48.85	8.83	1.56	-48.86	-2.47	0.06	-43.11	-1.41
P384_30	5.24	1.00	8.95	1.79	-0.50	28.51	2.72	-0.73	51.89	-0.82	-0.21	64.14	-3.65	0.40	50.71	-3.98	3.46	9.20
P384_60	-0.18	-	19.49	0.13	-	44.29	0.21	-	68.48	0.31	-	87.93	0.70	-	72.27	0.06	-	12.45
P385_30	-13.72	-17.19	33.90	-12.99	-26.02	42.32	-11.57	-33.28	41.34	-12.98	-34.79	56.12	-12.80	-31.14	51.96	-12.86	-16.85	56.93
P385_60	-17.55	-13.78	41.05	-15.56	-23.16	52.27	-13.43	-30.18	41.43	-12.72	-33.90	55.16	-11.75	-31.37	49.99	-10.83	-18.96	51.75
	Estação de Referência P384_60 Sectores de Noroeste																	
	285º			292,5º			300º			307,5º			315º			322,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	17.87	10.88	45.29	14.05	22.53	62.97	16.33	32.88	55.00	19.04	30.09	45.47	21.97	16.17	30.46	25.21	23.38	16.15
P384_30	4.37	-2.60	-12.05	5.18	-2.75	-5.94	3.51	-2.81	-10.91	3.77	-3.81	-9.78	5.31	-4.06	-10.87	6.44	-5.36	-19.82
P384_60	0.24	-	4.73	0.24	-	11.72	0.40	-	-2.80	-0.34	-	3.21	0.62	-	0.75	0.44	-	-13.26
P385_30	3.72	23.69	56.14	4.40	25.82	50.22	3.91	22.40	34.53	3.72	24.76	39.20	5.94	23.08	35.81	9.32	28.43	33.23
P385_60	0.79	26.01	64.63	1.38	30.41	70.47	2.71	26.06	39.27	3.49	27.08	46.09	6.41	24.10	38.66	9.82	28.49	40.86

Tabela C 5 – Diferenças entre resultados medidos e calculados para estação de referência P_385 a 60 m

	Estação de Referência P385_60 Sectores de Sudeste																	
	105º			112,5º			120º			127,5º			135º			142,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	3.40	-11.39	-12.65	2.92	-20.01	-15.38	3.73	-18.61	-12.30	4.23	-23.33	-0.17	6.21	-22.85	4.73	6.90	-21.18	10.50
P384_30	-15.22	3.59	-13.11	-9.76	12.91	-1.18	4.73	24.13	11.90	15.45	41.22	37.27	22.76	53.27	57.12	25.74	45.61	42.68
P384_60	-9.10	4.99	-4.61	-4.19	14.58	12.37	3.74	25.30	23.45	9.70	40.51	52.39	15.76	50.80	74.17	20.37	44.65	57.41
P385_30	-0.01	-4.42	2.83	1.70	-4.37	17.28	1.66	-5.61	18.60	1.62	-4.23	38.46	1.69	-3.57	50.86	-0.15	-1.39	53.00
P385_60	-1.01	-	10.98	0.17	-	30.58	-0.30	-	22.85	-0.71	-	44.22	0.10	-	55.34	0.55	-	54.18
	Estação de Referência P385_60 Sectores de Noroeste																	
	285º			292,º			300º			307,5º			315º			322,5º		
Estação	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]	Dir [º]	RV [%]	IT [%]
P042_30	14.06	-11.87	55.24	9.30	-4.10	91.53	11.39	7.40	81.88	15.40	5.49	65.90	16.88	-3.29	38.18	19.48	-1.17	26.71
P384_30	9.07	-19.44	1.98	14.13	-34.90	-5.03	12.94	-29.70	-10.65	13.66	-29.83	-13.79	15.40	-27.93	-18.57	21.55	-27.57	-18.92
P384_60	7.72	-17.44	19.16	8.72	-32.21	9.11	8.37	-27.04	-4.89	8.66	-26.69	-4.83	9.94	-24.26	-10.84	16.15	-24.47	-15.59
P385_30	2.67	-2.32	62.88	3.41	-3.14	68.82	2.43	-2.29	51.44	1.40	-1.29	52.30	0.99	-0.57	44.25	3.87	0.08	46.49
P385_60	0.33	-	72.40	0.28	-	89.57	0.85	-	54.60	0.66	-	56.69	0.50	-	45.79	3.58	-	50.35

Tabela C 6 – *Shear factor* médio para as estações e turbinas

	Shear Factor adimensional											
	105º	113º	120º	127,5º	135º	142,5º	285º	292,5º	300º	307,5º	315º	322,5º
P385	0.01	0.01	-0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	-0.01	-0.04	-0.02	-0.02	-0.01
P384	0.08	0.09	0.09	0.10	0.13	0.11	0.07	0.05	0.08	0.11	0.11	0.11
P042	-0.03	-0.05	-0.05	-0.06	-0.06	-0.05	0.01	0.01	-0.02	-0.03	-0.04	-0.03
T1	-0.03	-0.04	-0.05	-0.04	-0.04	-0.04	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.03	-0.04
T2	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01	-0.02	0.01	-0.02	-0.01	-0.05	-0.03	-0.04
T3	0.02	0.02	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.06	0.02	0.01	-0.02	0.00	-0.02
T4	0.03	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.09	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00
T5	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.07	0.04	0.01	0.00	0.00	-0.01
T6	0.06	0.07	0.10	0.12	0.19	0.23	0.05	0.05	0.05	0.04	0.07	0.08
T7	0.02	0.01	0.04	0.06	0.07	0.12	-0.02	-0.01	-0.03	-0.01	0.00	0.01
T8	0.06	0.06	0.08	0.14	0.15	0.18	0.04	0.05	0.02	0.04	0.05	0.07
T9	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	-0.03	-0.01	-0.01	-0.01
T10	0.01	0.00	-0.01	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	-0.03	-0.01	-0.02	-0.01
T11	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.03	0.01	-0.02	0.00	0.00	0.01
T12	0.02	0.03	0.01	0.02	0.03	0.05	0.03	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.01
T13	0.05	0.07	0.06	0.07	0.09	0.10	0.04	0.01	0.03	0.03	0.05	0.06