

Caracterização do Vento Sobre a Cobertura de Edifícios

Amândio José da Silva Ferreira



Orientador:

Álvaro Rodrigues
Professor Auxiliar

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

Julho de 2009

Aos pais, família de sangue e de encosto

Resumo

A crescente procura de energia dos dias de hoje, aliada aos graves problemas ambientais advindos da sua produção tem estimulado a procura de formas alternativas de energia. De entre as diversas formas de energia, aquelas que se baseiam em fontes renováveis têm vindo a ganhar uma expressão particularmente significativa. Neste contexto, a energia eólica tem-se revelado uma aposta correcta, a nível económico, energético e ambiental. Por outro lado, a microprodução tem sido apontada como uma das soluções para os problemas supracitados. Assim, a combinação de ambas as áreas tem sido alvo de especial interesse, particularmente nos países do Norte da Europa.

Este trabalho visa caracterizar o vento em ambiente urbano, com particular interesse pela possibilidade de se proceder ao seu aproveitamento energético. Para isso, foram efectuadas medições no topo do edifício do DEMec, com recurso a equipamentos apropriados para o efeito. As características do vento foram medidas em diversos pontos da cobertura, utilizando anemometria ultra-sónica e convencional, com o intuito de se proceder à caracterização do campo de velocidades, turbulências e inclinação do escoamento. A localização dos anemómetros sónicos era alterada sempre que o número de ocorrências assim o permitisse. As séries de dados daí resultantes foram comparadas com outras de ambientes rurais, tanto para a anemometria de copos como para a ultra-sónica. O processamento dos dados é igual para ambos os locais de forma a possibilitar a sua comparação. Foi também efectuada uma simulação com recurso a cálculo computacional, com a finalidade de se compararem alguns resultados obtidos a partir dessa simulação.

Os resultados obtidos mostram essencialmente duas realidades, a primeira diz respeito à menor intensidade do recurso eólico e a segunda à sua particular complexidade. A comparação dos dados respeitantes à anemometria convencional veio revelar diferenças evidentes no que diz respeito à disponibilidade do vento nestes ambientes (urbanos). Por outro lado, a análise efectuada com recurso a anemómetros sónicos mostra claras diferenças nas questões mais ligadas à complexidade do vento. Verificou-se que em ambiente urbano a intensidade de turbulência é significativamente mais elevada do que em ambiente rural. As componentes não horizontais do escoamento relevaram uma elevada dependência da geometria do edifício. A breve comparação dos resultados obtidos pelo *software* de simulação mostra uma aproximação aceitável ao campo de velocidades. Já as intensidades de turbulência são sobrestimadas pelo *software*.

Conclui-se através dos resultados obtidos que o aproveitamento energético em ambiente urbano se prevê uma tarefa delicada, fruto da baixa intensidade e elevada complexidade do recurso.

Abstract

The growing demand for today's energy, combined with the serious environmental problems of its production, has stimulated the demand for alternative forms of energy. Among the various forms of energy, those that are based on renewable sources have been gaining a particularly significant. In this context, the wind energy has proved to be a reliable source, energetically, economically and environmentally speaking. Furthermore, the microproduction has been appointed as one of the solutions for the aforementioned problems. Thus, the combination of both these areas has particular interest, particularly in Northern Europe countries.

This work aims to characterize the wind in the urban environment, with particular interest for the possibility to carry out its energy. To do so, measurements were performed at the top of DEMec building, using appropriate equipment for this purpose. Wind characteristics were measured on several points of the coverage, using ultra-sonic and conventional anemometry, in order to establish the characterization the velocity field, turbulence and wind angle. The location of the sonic anemometer was changed every time that the number of occurrences allowed it. The resulting data series were compared with others obtained from measurements in rural environments, by means of cup and ultra-sonic anemometry. The data processing is equal for both sites in order to enable comparison. A simulation using computational calculation was assessed, in order to compare results obtained from this simulation.

The results obtained show essentially two realities, the first relates to the lower intensity of wind resource and the second due with its high complexity. Comparison conventional anemometry data set revealed evident differences regarding the availability of the wind in these environments (urban).Furthermore, the analysis using sonic anemometer shows clear differences in issues related to the complexity of the wind. It was noted that in the urban areas turbulence intensity is significantly higher than in the rural environment. The non-horizontal flow components showed a high dependence on geometry of the building. The brief comparison of results obtained by simulation software shows an acceptable approach to the wind velocity field. In terms of turbulence intensity, it's over estimated by software.

It is concluded, through the obtained results that the energy exploitation in urban environment tend to be complicated, due to the low intensity and high complexity of the resource.

Agradecimentos

Gostaria de deixar as primeiras palavras de agradecimento ao Professor Álvaro Rodrigues pelo constante acompanhamento e orientação ao longo destes últimos meses. Mesmo com a agenda complicada que possui nunca deixou de estar disponível. Tomo o seu rigor, exigência e dedicação como um exemplo a seguir na minha vida profissional pois acredito que só assim se pode aspirar a ter sucesso.

De uma maneira geral, o meu obrigado a todos os docentes da FEUP pelo afinho e trabalho dedicado que entregam à instituição e que se traduz numa mais-valia para todos os alunos que, como eu, passam por essa casa.

Uma nota especial a toda a Secção de Energia Eólica do INEGI que me recebeu com respeito, simpatia e boa disposição. Em particular, um agradecimento sincero à Equipa de Campo que se mostrou sempre disponível para me ajudar com as questões mais ligadas às medições experimentais no topo do DEMec, obrigado a todos, obrigado Luís Mendes.

Obrigado Engenheiro Carlos Rodrigues, sem a sua silenciosa mas preciosa ajuda nas rotinas *Python* e *MATLAB*® não teria conseguido resolver alguns dos problemas que foram surgindo.

Uma palavra também de agradecimento ao Engenheiro João Pedro Jacob pela disponibilidade e auxílio com todas as questões envolvidas na utilização do sistema de aquisição de dados dos anemómetros sónicos.

Como é óbvio não posso deixar de evidenciar o papel do meu tutor, Engenheiro Miguel Marques, ao longo do meu trabalho. A sua capacidade de trabalho e boa disposição mesmo nos momentos mais complicados ficarão para sempre na minha memória. Ao longo deste trabalho sempre me senti acompanhado e isso deve-se em muito a este Homem e à sua constante disponibilidade. Obrigado Miguel!

Por fim, gostaria de deixar uma palavra sincera aos meus pais, que por vezes se viram obrigados a fazer um esforço grande para que eu pudesse finalizar os meus estudos. Sem eles, sem a enorme capacidade de trabalho do meu pai e o olhar orgulhoso da minha mãe, teria sido muito difícil eu estar agora a acabar este ciclo da minha vida. Obrigado também à família mais chegada, sobretudo às irmãs, que de uma forma mais ou menos efectiva estiveram sempre presentes e prontas a ajudar.

Agradecer ainda à Teresa Abreu Lima pelo seu sorriso e apoio, essenciais nos momentos de maior desânimo, obrigado Teresa!

De uma maneira geral, o meu mais sincero obrigado a todos aqueles que tornaram possível este momento. Peço desculpa àqueles a quem possa ter desiludido por qualquer motivo e àqueles que aqui não mencionei e talvez o devesse ter feito.

Obrigado a todos!

Índice

Resumo	v
Abstract	vii
Agradecimentos	ix
Índice de Figuras	xv
Índice de Tabelas	xxiii
Nomenclatura	xxv
Lista de Acrónimos	xxvii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Organização	2
2. Fontes renováveis de energia	5
2.1 Energia eólica, caso de sucesso	5
2.2 Tecnologia madura e aposta sustentável	6
3. Tecnologia e conceitos	9
3.1 Potência contida no vento	9
3.2 Coeficiente de Betz	11
3.3 Curva de potência de um aerogerador	11
3.4 Tipos de aerogeradores	12
3.5 Mecanismos de controlo	14
3.6 Perdas por desalinhamento	14
4. Microprodução	17
4.1 Aposta no futuro	18
4.2 Tipos de utilização	19
4.3 Solar fotovoltaica	20
4.4 Eólica	21
4.4.1 Enquadramento	21
4.4.2 Desvantagens	22
4.4.3 Legislação	23
5. Caracterização do recurso	27
5.1 O vento em ambiente urbano	27

5.2	Intensidade do recurso	29
5.3	Aspectos qualitativos	29
6.	Campanha de medições.....	31
6.1	Descrição do local.....	31
6.2	Equipamentos.....	33
6.2.1	Anemómetro sónico	33
6.2.2	Anemómetro de copos e sensor de direcção	36
6.2.3	Sistema Autónomo de Anemometria Sónica	37
6.2.4	Data Logger	37
6.2.5	Programa de medições	38
6.2.6	Processamento da informação.....	39
7.	Análise e discussão de resultados	43
7.1	Anemometria convencional	43
7.2	Anemometria ultra-sónica.....	50
7.2.1	Geometria 1.....	50
7.2.2	Geometria 2.....	59
7.2.3	Geometria 3.....	76
7.3	Simulação com software comercial	88
8.	Conclusões	95
9.	Bibliografia	97
	Anexo A: Definição da geometria g1	101
	Anexo B: Definição da geometria g2.....	105
	Anexo C: Definição da geometria g3.....	109
	Anexo D: Dados a 9 metros para geometria g1	113
	Anexo E: Dados a 9 metros para a geometria g2Maio	117
	Anexo F: Dados a 9 metros para a geometria g2Junho	121
	Anexo G: Dados a 9 metros para a geometria g3	125
	Anexo H: Dados a 9 metros para a geometria g3SAAS02	129
	Anexo I: Dados complementares para a geometria g1	133
	Anexo J: Dados complementares para a geometria g2Maio.....	137
	Anexo L: Dados complementares para a geometria g2Junho.....	145
	Anexo M: Dados complementares para a geometria g3SAAS02	151
	Anexo N: Campos de velocidade e turbulência calculados pelo Fluent®	155

Anexo O: Procedimento de calibração	159
O.1 Verificar valores de velocidade	161
O.2 Iniciar calibração.....	161
O.3 Efectuar medições.....	161
O.4 Introduzir valores	161
O.5 Verificar valores.....	162
Anexo P: <i>Data logger</i> Ammonit.....	163
Anexo Q: Ficha técnica do sensor de direcção	167
Anexo R: Ficha técnica do anemómetro de copos.....	171
Anexo S: Vista a 360°	175

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Potência de origem eólica instalada em Portugal entre 1998 e final de 2008 (DGGE, 2008) (Rodrigues, Parques Eólicos em Portugal, Dezembro 2008).....	6
Figura 2.2 - Produção de energia eléctrica da grande hídrica e da eólica entre 1998 e 2008 (DGGE, 2008).....	7
Figura 3.1 - Variação da potência contida no vento em função da sua velocidade e diâmetro de rotor.....	10
Figura 3.2 - Curva de genérica do coeficiente de potência.....	10
Figura 3.3 - Curva de potência genérica para aerogerador com rotor de 3 metros de diâmetro	11
Figura 3.4 - Curva de potência Nheowind 3D 100 CP	12
Figura 3.5 - Turbina de eixo horizontal com anel exterior	12
Figura 3.6 - Turbina de eixo horizontal NHeolis.....	12
Figura 3.7 - Turbina de Savonius.....	13
Figura 3.8 -Turbina de Darrieus.....	13
Figura 3.9 - Turbina de parede Darrieus	14
Figura 3.10 - Ângulo do vento relativamente ao rotor.....	15
Figura 4.1 - Perdas de energia inerentes à produção com base em combustíveis fósseis..	17
Figura 4.2 - Dados da potência registados no SRM até 08-04-2009	18
Figura 4.3 - Esquema simplificado de ligação à rede	19
Figura 4.4 - Central fotovoltaica de Moura, Beja	20
Figura 4.5 - Turbina de eixo horizontal em zona residencial da Inglaterra	21
Figura 4.6 - WTC do Bahrein com turbinas integradas no edifício.....	21
Figura 4.7 - Evolução do preço de venda à rede expectável para primeiros registos no SRM.....	23
Figura 4.8 - Evolução da potência máxima de ligação à rede para sistemas de microprodução	24
Figura 5.1 - Padrão do regime de vento em torno de edifício com topo plano (Heath, Watson and Walshe, 2007)	27
Figura 5.2 - Bolha de separação (Mertens, 2003).....	28
Figura 6.1 - Vista aérea do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP	32
Figura 6.2 - Vista da cobertura do DEMec	32
Figura 6.3 - Anemómetro sónico METEK USA-1	33
Figura 6.4 - Características gerais do anemómetro sónico	33

Figura 6.5 - Esquema dos transdutores dos anemómetros sónicos.....	34
Figura 6.6 - Anemómetro de copos (à direita) e sensor de direcção (à esquerda).....	36
Figura 6.7 - Resumo das características do sensor de direcção	36
Figura 6.8 - Resumo das características do anemómetro de copos.....	37
Figura 6.9 - Vista de cima da orientação do DEMec relativamente aos pontos cardeais (exagerado)	39
Figura 6.10 - Vista de cima do DEMec relativamente ao referencial utilizado neste trabalho	39
Figura 6.11 - Aspecto da ferramenta de trabalho <i>MATLAB</i> ® quando executado em modo gráfico	40
Figura 7.1 - Rosa-dos-ventos para dados do DEMec - FEUP	43
Figura 7.2 - Rosa das velocidades para dados do DEMec - FEUP	44
Figura 7.3 - Rosa da energia para dados do DEMec - FEUP	44
Figura 7.4 - Intensidade de turbulência no DEMec - FEUP	45
Figura 7.5 - Factores de rajada máxima e mínima no DEMec - FEUP	45
Figura 7.6 - Padrão diário do vento no DEMec - FEUP	45
Figura 7.7 - Histograma de velocidades para dados do DEMec.....	46
Figura 7.8 - Rosa-dos-ventos para dados do Campo1	46
Figura 7.9 - Rosa de velocidades para dados do Campo1	47
Figura 7.10 - Rosa da energia para dados do Campo1	47
Figura 7.11 - Intensidade de turbulência para dados do Campo1.....	47
Figura 7.12 - Factores de rajada para dados do Campo1	48
Figura 7.13 - Padrão diário do vento para o Campo1	48
Figura 7.14 - Histograma de velocidades para dados do Campo1.....	49
Figura 7.15 - Rosa-dos-ventos do SAAS01 entre 14 e 20 de Maio	50
Figura 7.16 - Rosa das velocidades para SAAS01 para geometria g1.....	50
Figura 7.17 - Rosa da energia para SAAS01 geometria g1	51
Figura 7.18 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento no sector 15 para dados do SAAS01 na geometria g1.....	52
Figura 7.19 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS01 na geometria g1.....	53
Figura 7.20 - Dispersão dos valores da turbulência global para dados do SAAS01 na geometria g1.....	53
Figura 7.21 - Rosa-dos-ventos do SAAS02 entre 14 e 20 de Maio	54
Figura 7.22 - Rosa das velocidades para SAA02 na geometria g1	54

Figura 7.23 - Rosa da energia para SAAS02 na geometria g1	55
Figura 7.24 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 15 para os dados do SAAS02 na geometria g1	56
Figura 7.25 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS02 na geometria g1.....	57
Figura 7.26 - Dispersão dos valores de turbulência em função da velocidade do vento para SAAS02 geometria g1	57
Figura 7.27 - Rosa de intensidade de turbulência para velocidade horizontal superior a 3 m/s para SAAS01 e SAAS02 na geometria g1	58
Figura 7.28 - Inclinação média do escoamento nos diferentes sectores para SAAS01 e SAAS02 na geometria g1.....	58
Figura 7.29 - Rosa-dos-ventos do SAAS01 entre 22 e 30 de Maio	59
Figura 7.30 - Rosa das velocidades para SAAS01 na geometria g2-Maio.....	59
Figura 7.31 - Rosa da energia para SAAS01 na geometria g2-Maio.....	60
Figura 7.32 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 6 para os dados do SAAS01 na geometria g2-Maio	61
Figura 7.33 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS01 na geometria g2-Maio.....	62
Figura 7.34 - Intensidade de turbulência global para SAAS01 na geometria g2-Maio.....	62
Figura 7.35 - Rosa-dos-ventos para SAAS02 entre 22 e 30 de Maio	63
Figura 7.36 - Rosa das velocidades para SAAS02 na geometria g2-Maio.....	63
Figura 7.37 - Rosa da energia para SAAS02 na geometria g2-Maio.....	63
Figura 7.38 - Turbulência global do SAAS02 na geometria g2-Maio.....	64
Figura 7.39 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 6 para os dados do SAAS02 na geometria g2-Maio	65
Figura 7.40 - Componentes da turbulência para o SAAS02 na geometria g2-Maio	66
Figura 7.41 - Rosa de turbulências para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Maio.....	66
Figura 7.42 - Rosas de inclinação para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Maio	67
Figura 7.43 - Rosa-dos-ventos do SAAS01 entre 02 e 09 de Junho.....	67
Figura 7.44 - Rosa das velocidades para SAAS01 na geometria g2-Junho.....	68
Figura 7.45 - Rosa da energia para SAAS01 na geometria g2-Junho	68
Figura 7.46 - Turbulência global do SAAS01 na geometria g2-Junho.....	69
Figura 7.47 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 12 para os dados do SAAS01 na geometria g2-Junho	70
Figura 7.48 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS01 na geometria g2-Junho.....	71

Figura 7.49 - Rosa-dos-ventos do SAAS02 entre 02 e 09 de Junho.....	71
Figura 7.50 - Rosa das velocidades para SAAS02 na geometria g2-Junho.....	72
Figura 7.51 - Rosa da energia para a SAAS02 na geometria g2-Junho.....	72
Figura 7.52 - Turbulência global para SAAS02 na geometria g2-Junho.....	72
Figura 7.53 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 12 para os dados do SAAS02 na geometria g2-Junho	73
Figura 7.54 - Componentes da turbulência para SAAS02 para geometria g2-Junho	74
Figura 7.55 - Intensidade de turbulência para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Junho	75
Figura 7.56 - Inclinação do escoamento para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Junho	75
Figura 7.57 - Rosa-dos-ventos para SAAS01 entre 09 e 11 de Junho	76
Figura 7.58 - Rosa das velocidades para SAAS01 na geometria g3.....	76
Figura 7.59 - Roda da energia para SAAS01 na geometria g3	77
Figura 7.60 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do vento para o SAAS01 na geometria g3.....	78
Figura 7.61 - Turbulência global para SAAS01 na geometria g3.....	79
Figura 7.62 - Componentes da turbulência para SAAS01 na geometria g3	79
Figura 7.63 - Rosa-dos-ventos para SAAS02 entre 09 e 11 de Junho	80
Figura 7.64 - Rosa das velocidades para SAAS02 na geometria g3.....	80
Figura 7.65 - Rosa da energia para SAAS02 na geometria g3	80
Figura 7.66 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação para SAAS02 na geometria g3.....	81
Figura 7.67 - Turbulência para SAAS02 na geometria g3.....	82
Figura 7.68 - Componentes da turbulência para o SAAS02 na geometria g3	82
Figura 7.69 - Intensidade de turbulência para SAAS01 e SAAS02 para na geometria g3	83
Figura 7.70 - Inclinação do escoamento para SAAS01 e SAAS02 na geometria g3	83
Figura 7.71 - Rosa-dos-ventos para os dados do Campo2.....	84
Figura 7.72 - Rosa das velocidades para os dados do Campo2	84
Figura 7.73 - Rosa da energia para os dados do Campo2	84
Figura 7.74 - Componentes da turbulência para os dados do Campo2.....	85
Figura 7.75 - Turbulência global para os dados do Campo2	85
Figura 7.76 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação para o sector 2 do Campo2	86
Figura 7.77 - Malha do domínio em <i>Gambit</i> para sector NW	88

Figura 7.78 - Contorno das velocidades para sector NW	89
Figura 7.79 - Contorno das intensidades de turbulência para sector NW	89
Figura 7.80 - Malha para sector SSW em <i>Gambit</i>	91
Figura 7.81 - Contorno da velocidade para sector SSW	91
Figura 7.82 - Contornos da intensidade de turbulência para sector SSW	92
Figura 7.83 - Perfil de vento medido e calculado para sector NW (à esquerda) e SSW (à direita)	93
Figura 7.84 - Intensidades de turbulência medida e calculada para o sector NW	93
Figura 7.85 - Intensidade de turbulência medida e calculada para o sector SSW	93
Figura A.0.1 - Esboço da disposição dos anemómetros na geometria g1	103
Figura B.0.1 - Esboço da disposição dos anemómetros na geometria g2-Maio e g2-Junho	107
Figura C.0.1 - Esboço da disposição dos anemómetros na geometria g3 e g3-SAAS02	111
Figura D.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g1	115
Figura D.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g1	115
Figura D.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g1	115
Figura D.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g1	116
Figura D.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g1	116
Figura D.0.6 - Velocidade horizontal média para anemómetro de copos na geometria g1	116
Figura D.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g1	116
Figura E.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	119
Figura E.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	119
Figura E.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	119
Figura E.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	120
Figura E.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	120
Figura E.0.6 - Velocidade horizontal média para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	120
Figura E.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g2-Maio	120
Figura F.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g2-Junho	123
Figura F.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g2-Junho	123
Figura F.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g2-Junho	123
Figura F.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g2-Junho	124

Figura F.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g2-Junho	124
Figura F.0.6 - Velocidade média para anemómetro de copos na geometria g2-Junho	124
Figura F.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g2-Junho....	124
Figura G.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g3	127
Figura G.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g3	127
Figura G.0.3 -Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g3.....	127
Figura G.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g3	128
Figura G.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g3.	128
Figura G.0.6 - Velocidade média horizontal para anemómetro de copos na geometria g3	128
Figura G.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g3.....	128
Figura H.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02.	131
Figura H.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02	131
Figura H.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02..	131
Figura H.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02..	132
Figura H.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02	132
Figura H.0.6 - Velocidade média horizontal para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02	132
Figura H.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02	132
Figura J.0.1 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento NW para o SAAS01 na geometria g2-Maio	139
Figura J.0.2 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento NW para o SAAS02 na geometria g2-Maio	140
Figura J.0.3 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Este para o SAAS01 na geometria g2-Maio	141
Figura J.0.4 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Este para o SAAS02 na geometria g2-Maio	142
Figura L.0.1 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Oeste para o SAAS01 na geometria g2-Junho	147
Figura L.0.2 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Oeste para o SAAS02 na geometria g2-Junho	148
Figura M.0.1 - Rosa-dos-ventos para SAAS02 na geometria g3-SAAS02	153

Figura M.0.2 - Turbulência global para dados do SAAS02 na geometria g3-SAAS02 ..	153
Figura M.0.3 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para sector SSW para o SAAS02 na geometria g3-SAAS02	154
Figura N.0.1 - Perfil de velocidade para simulação do sector SSW	157
Figura N.0.2 - Perfil de turbulência para simulação do sector SSW	157
Figura N.0.3 - Perfil de velocidade para simulação do sector NW.....	158
Figura N.0.4 - Perfil de turbulência para simulação do sector NW	158
Figura O.0.1 - Anemómetro sónico coberto para simulação de velocidade nula.	161
Figura S.0.1 - Vista a 360° do topo do edifício do DEMec	175

Índice de Tabelas

Tabela 6.1 - Resumo do programa de medições	38
Tabela 7.1 - Resumo dos resultados para anemometria convencional	49
Tabela 7.2 - Resumo dos dados do SAAS01 para a geometria g1	51
Tabela 7.3 - Resumo dos dados do SAAS02 na geometria g1	55
Tabela 7.4 - Resumo dos resultados do SAAS01 na geometria g2-Maio.....	60
Tabela 7.5 - Estatísticas gerais para SAAS02 na geometria g2-Maio	64
Tabela 7.6 - Resumo dos dados do SAAS01 na geometria g2-Junho	69
Tabela 7.7 - Resumo dos resultados para o SAAS02 na geometria g2-Junho.....	74
Tabela 7.8 - Resumo dos resultados do SAAS01 na geometria g3	77
Tabela 7.9 - Resumo dos dados do Campo2.....	87
Tabela 7.10 - Valores de velocidade medidos e resultados da simulação NW.....	90
Tabela 7.11 - Valores de turbulência medidos e resultados da simulação NW	90
Tabela 7.12 - Valores de velocidade medidos e resultados da simulação SSW	92
Tabela 7.13 - Valores de turbulência medidos e resultados da simulação SSW	92
Tabela I.0.1 - Análise sectorial para SAAS01 na geometria g1	135
Tabela I.0.2 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g1	135
Tabela J.0.1 - Análise sectorial para SAAS01 na geometria g2-Maio	143
Tabela J.0.2 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g2-Maio	143
Tabela L.0.1 - Análise sectorial para SAAS01 na geometria g2-Junho	149
Tabela L.0.2 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g2-Junho	149
Tabela M.0.1 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g3-SAAS02.....	153

Nomenclatura

E_c - Energia cinética

m - Massa do corpo

v - Velocidade do corpo

$\dot{m}$ - Caudal mássico de fluido

ρ - Massa volúmica

A - Área de varrimento da turbina

P - Potência contida no vento

P_a - Potência de saída do aerogerador

T_1 - Tempo dispendido pelo pulso sonoro emitido pelo transdutor1 até atingir o transdutor2

T_2 - Tempo dispendido pelo pulso sonoro emitido pelo transduto2 até atingir o transdutor1

L - Distância entre sensores

c - Velocidade do som

V - Velocidade do vento

$(V_d)_m$ - Velocidade ao longo da direcção dos sensores

V_n - Componente normal da velocidade

γ - Ângulo entre a direcção dos transdutores e a direcção da propagação dos pulsos sonoros

IT_{10min} - Intensidade de turbulência para tempo de integração de 10 minutos

V_h - Velocidade horizontal

$\bar{U}$ - Velocidade média horizontal para tempo de integração de 10 minutos

G_{max} - Factor de rajada máxima

G_{min} - Factor de rajada mínima

w - Componente vertical da velocidade

θ_w - Inclinação do escoamento

IT_u - Intensidade de turbulência longitudinal para tempo de integração de 10 minutos

it_v - Índice de turbulência lateral para tempo de integração de 10 minutos

it_v - Índice de turbulência vertical para tempo de integração de 10 minutos

Lista de Acrónimos

DEMec - Departamento de Engenharia Mecânica

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

GEE - Gases de Efeito de Estufa

PNAC - Plano Nacional para as Alterações Climáticas

PNALE - Plano Nacional para Atribuição de Licenças de Emissão

DGGE - Direcção Geral de Energia e Geologia

SRM - Sistema de Registo de Microprodução

CFD - *Computacional Fluid Dynamics*

INEGI - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

IDMEC - Instituto de Engenharia Mecânica

SAAS - Sistema Autónomo de Anemometria Sónica

CEsA - Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos

1. Introdução

De entre as fontes renováveis de energia a eólica destaca-se pelo crescimento rápido, mas sustentado, que sofreu nas últimas décadas. Recentemente, com a divulgação das centrais de microprodução, a questão do aproveitamento da energia do vento em zonas urbanas tem vindo também a ganhar expressão. Contudo, o recurso eólico nesses ambientes é bem diferente daquele que se encontra em ambiente rural, tanto no que respeita à sua intensidade, como às características detalhadas do escoamento.

1.1 Enquadramento

O rápido aumento da necessidade de energia advindo da crescente exigência de conforto da população a nível internacional, aliado à instabilidade do preço dos combustíveis tradicionais, tem vindo a obrigar a sociedade a procurar fontes alternativas de energia. De entre elas destacam-se aquelas que permitem um desenvolvimento sustentado, tanto a nível económico, como ambiental. Assim, as fontes renováveis de energia têm uma palavra importante na actual conjuntura energética internacional.

Os graves problemas ambientais que atravessamos devem-se em muito às elevadas emissões de Gases de Efeito de Estufa que em grande parte advém das necessidades energéticas das populações. O tratado de Quioto veio restringir a emissão destes gases, o que se traduz também numa redução na dependência de combustíveis fósseis. As metas são ambiciosas, particularmente em Portugal, onde os 39% de energia eléctrica gerada através de fontes renováveis de energia subiram para 45% para o quadriénio 2008-2012 (revistos pelo Governo em 2007). A energia hídrica e eólica têm aqui uma grande responsabilidade, pois são aquelas que dominam a produção de energia limpa no nosso país. A utilização de energia solar para produção de energia eléctrica em instalações de grande escala tem vindo mostrar-se uma opção viável, embora não seja de esperar, sobretudo no curto ou médio prazo, que se aproxime das duas supramencionadas.

O grande crescimento da energia eólica de grande escala catapultou a questão da microgeração eólica. De todo modo, a complexidade do recurso leva a alguma apreensão, pelo que se torna particularmente importante a sua correcta caracterização.

1.2 Objectivos

Com este trabalho pretende-se contribuir para a caracterização do vento em ambiente urbano sendo que para isso se recorreu à utilização de técnicas de medição apropriadas, como é o caso da anemometria ultra-sónica. Foi também utilizado um anemómetro de copos e sensor de direcção para leitura das características médias do escoamento. Com vista a analisar certos fenómenos, os anemómetros sónicos foram colocados em diferentes locais ao longo da campanha de medições. Assim, pretendem-se relacionar as características observadas em determinados locais com a tipologia do edifício e sua cobertura. A leitura simultânea das características do vento a diferentes alturas permite obter-se uma noção dos campos de velocidade, turbulência e componentes não horizontais que o escoamento apresenta. Com a comparação dos dados recolhidos em ambiente rural e urbano pretende-se chegar a conclusões no que respeita às principais diferenças entre tais ambientes.

1.3 Organização

Inicialmente, no capítulo 2, é exposto o contexto no qual as fontes renováveis de energia se encontram actualmente. Particularmente no que diz respeito à energia eólica e hídrica pela grande importância que têm no panorama energético nacional.

Seguidamente, no terceiro capítulo, são introduzidos alguns conceitos gerais respeitantes à energia contida no vento e seu aproveitamento. Para além disso, são expostas algumas características ligadas à tecnologia existente.

O capítulo 4 aborda a microprodução de energia, referindo a sua importância na conjuntura energética actual. É feita uma distinção entre os diferentes tipos de utilização, por um lado numa perspectiva de produtor/consumidor, com possibilidade de venda à rede, por outro com a utilização de centrais de microprodução em locais isolados onde não existe rede eléctrica. A energia solar é brevemente referida pois é vista como referência no que diz respeito a programas de incentivo promovidos pelo governo Português. As questões de legislação são abordadas com alguma profundidade pois delas depende muitas vezes o retorno económico do investimento.

O quinto capítulo tem como objectivo fazer uma introdução sobre aquilo que são as características do vento em zonas de orografia complexa como é o caso do ambiente urbano. Referem-se as principais diferenças no que respeita à intensidade e ‘qualidade’ do vento.

O capítulo 6 introduz as medições experimentais levadas a cabo para a execução deste trabalho. Inicialmente procede-se à caracterização do local das medições e em seguida faz-se uma breve descrição geral de todos os equipamentos utilizados, bem como a definição de todas as grandezas medidas.

Os resultados e sua discussão estão apresentados no capítulo 7 e separados de acordo com o tipo de sensor utilizado. Inicialmente apresentam-se os resultados de anemômetros de copos com séries de dados recolhidas em ambiente rural e urbano. Seguidamente são apresentados os dados recolhidos pelos anemômetros sónicos em diferentes localizações no topo do DEMec (Departamento de Engenharia Mecânica). A essas localizações são designadas por geometrias por uma questão de simplificação. Os dados de duas das geometrias serão ainda comparados com os resultados de simulações em *Fluent®*.

No oitavo capítulo apresentam-se as conclusões do estudo efectuado de uma forma muito sintética e concisa. Por fim apresentam-se propostas para trabalhos futuros e possíveis melhorias a levar a cabo para a execução de trabalhos similares.

2. Fontes renováveis de energia

As metas estabelecidas no âmbito do protocolo de Quioto e os problemas energéticos e ambientais sentidos nas últimas décadas (como o aquecimento global, elevadas emissões de CO₂, gases com efeito estufa, picos no preço do petróleo e derivados e sua escassez, etc.) levaram a uma necessidade de mudança no mercado energético. Portugal é fortemente dependente de combustíveis importados. Em meados da corrente década, cerca de 85% da energia primária consumida no nosso país tinha origem externa. Uma grande percentagem dessa fatia, quase a sua totalidade, diz respeito a combustíveis fósseis. Nos últimos anos a factura energética nacional tem vindo a aumentar consideravelmente devido ao aumento do consumo de energia, aliado ao aumento do preço destes combustíveis. Em 1998 as importações de petróleo representavam 6% do total das importações nacionais; já, em 2004 esse valor tinha subido para os 11 pontos percentuais (Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005). Este crescimento leva necessariamente a um aumento na emissão de gases com efeito de estufa (GEE), o que leva a um esforço acrescido na redução da intensidade carbónica da economia Portuguesa. A criação do Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC) e o Plano Nacional para a Atribuição de Licenças de Emissão (PNALE) foram instrumentos importantes e marcos incontornáveis no mercado energético nacional.

Neste contexto, o aproveitamento das fontes renováveis de energia revela-se muito importante, pois leva a uma maior utilização dos recursos energéticos endógenos, reduzindo-se assim a forte dependência Portuguesa da importação de energia, conduz também a uma redução das emissões de GEE e estimula a economia nacional.

2.1 Energia eólica, caso de sucesso

A energia eólica é, sem dúvida, um caso de sucesso no meio energético nacional e internacional. A divulgação das tecnologias para o seu aproveitamento ao longo dos

últimos anos tem sido notável, o que se deve, em muito, ao facto de se tratar de uma fonte renovável de energia.

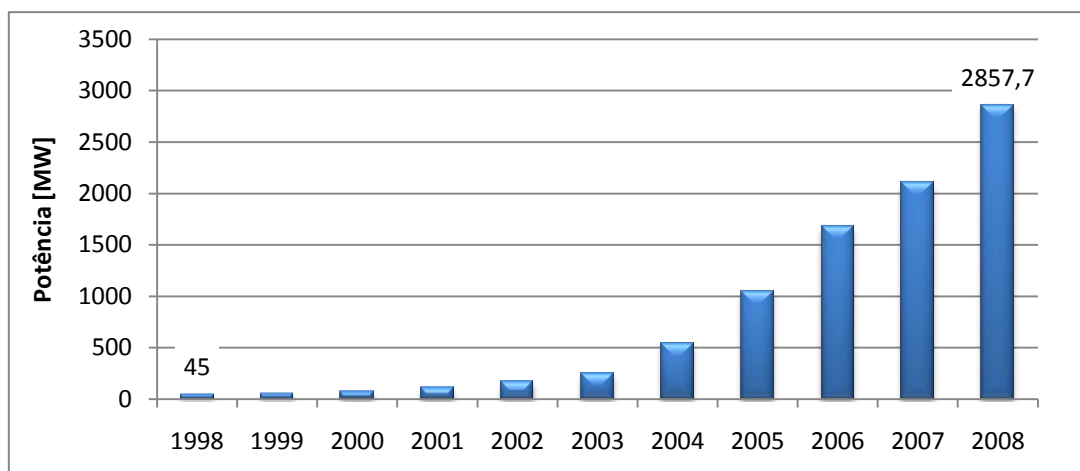


Figura 2.1 - Potência de origem eólica instalada em Portugal entre 1998 e final de 2008
(DGGE, 2008) (Rodrigues, Parques Eólicos em Portugal, Dezembro 2008)

Actualmente a energia eléctrica de origem eólica ocupa uma posição de destaque no nosso país e o seu crescimento nestes últimos 11 anos tem sido, de facto, bastante significativo. Como se pode ver na Figura 2.1, a capacidade instalada passou de cerca de 45 MW em 1998 (DGGE, 2008) para 2857,7 MW no final de 2008 (Rodrigues, Parques Eólicos em Portugal, Dezembro 2008), o que demonstra bem a evolução desta tecnologia em Portugal. No final de 2008, 38,3% da electricidade produzida a partir de fontes renováveis de energia era de origem eólica, valor esse que corresponde a cerca de 10,6% do total de electricidade consumida em Portugal continental. A taxa de crescimento médio anual é de aproximadamente 54% no que diz respeito à potência instalada. Contudo, esta tendência de crescimento pode alterar-se. Os parques eólicos são resultado de grandes investimentos de capital, obtido normalmente com recurso a financiamento bancário. A grave crise financeira despoletada no final de 2008 e o seu alastramento à economia ‘real’ veio dificultar a obtenção de financiamento, pelo que é possível que se verifique um abrandamento do investimento e, consequentemente, do crescimento da potência instalada. Em Portugal este abrandamento poderá ser particularmente suave pois a grande parte dos financiamentos já estava definida. Todavia, o clima de desconfiança e receio no mercado internacional influencia negativamente a concessão de empréstimos. Ainda assim, a energia eólica é um caso inegável de sucesso, baseada em conhecimentos válidos e consistentes.

2.2 Tecnologia madura e aposta sustentável

O aproveitamento da energia cinética do vento, tal como o conhecemos, data de meados dos anos 70 e deve-se em muito ao aumento do preço dos combustíveis fósseis, que até então representavam uma fonte de energia barata e versátil. Para além das questões económicas, também as crescentes preocupações com a emissão de gases com efeito de estufa e a poluição ambiental vieram incentivar ainda mais a aposta em fontes

renováveis de energia e, particularmente, na energia eólica. Nos dias que correm a sustentabilidade é um tema que preocupa não só os especialistas mas a população em geral. De uma forma muito genérica, considera-se um empreendimento sustentável quando este é ecologicamente correcto, economicamente viável, socialmente justo e culturalmente aceite, características que nem sempre estão patentes na utilização do vento como fonte de energia. A construção de parques eólicos em Portugal é, regra geral, uma prática aceite e consensual. Noutros países, como sendo França ou Inglaterra, o consenso é menor, o que dificulta a construção de tais empreendimentos.

A tecnologia é bastante anterior à década de setenta, embora antes dessa data fosse pouco utilizada. De todo o modo, o conhecimento e compreensão das questões envolvidas no aproveitamento energético do vento atingiu já uma maturidade tal que nos dias de hoje esta tecnologia é uma das que atrai maior investimento. Em Portugal, o forte crescimento desta tecnologia permitiu que em 2008 que a produção de energia eléctrica via eólica fosse muito idêntica à produção da grande hídrica, principal produtora de electricidade ‘limpa’ no nosso país. É verdade que o ano hídrico não foi dos melhores, de qualquer forma este é um bom indicador do crescimento da energia eólica e uma demonstração das vantagens de se diversificarem as fontes de energia. Mantendo-se a taxa de crescimento dos últimos anos, poderemos ter já em 2009 uma produção de electricidade com base eólica acima do valor médio da grande hídrica nos últimos 11 anos (DGGE, 2008).

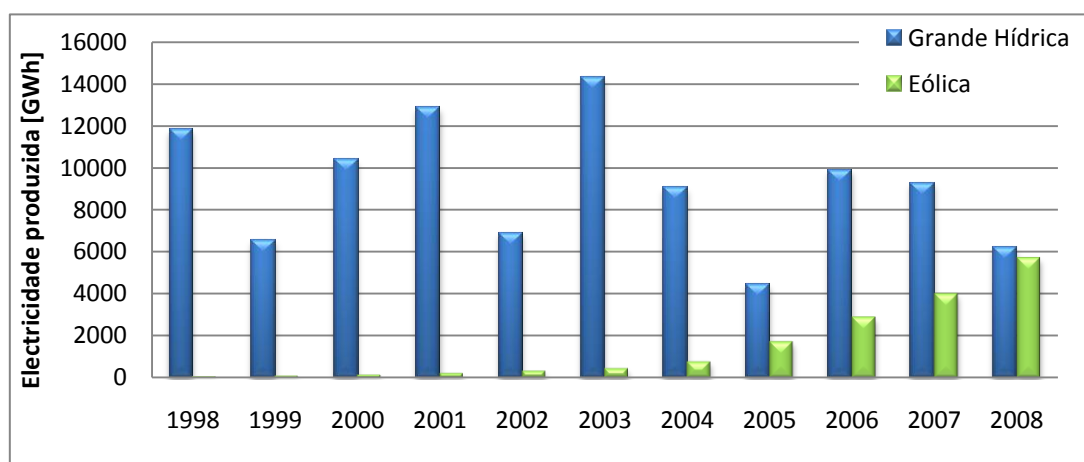


Figura 2.2 - Produção de energia eléctrica da grande hídrica e da eólica entre 1998 e 2008 (DGGE, 2008)

A menor variabilidade inter-anual do recurso eólico, comparativamente com o hídrico, é sem dúvida um aspecto positivo, pois torna possível uma previsão da produção anual normalmente bastante aceitável, ao contrário do que acontece com esta última (hídrica), onde anos muito húmidos e muito secos anulam qualquer previsão cuidada e prudente. Já a capacidade de armazenamento de algumas hídricas permite a optimização do aproveitamento do recurso, o que obviamente não acontece com a energia eólica. A complementaridade entre a hídrica e a eólica é também uma questão muito interessante, visto que nas centrais hidroeléctricas reversíveis é possível efectuar a bombagem da água durante a noite, onde a procura de energia é baixa. A bombagem da água para a albufeira permite às hidroeléctricas aproveitarem a energia provinda da eólica a um baixo custo

armazenando-se a água para futura utilização, o que se traduz num benefício económico e ambiental.

Um aspecto que atesta bem o elevado grau de maturidade desta tecnologia é o da crescente disponibilidade das instalações. Há cerca de duas décadas atrás, os aerogeradores eram olhados como dispositivos experimentais, com problemas de fiabilidade o que não permitia que fossem encarados como componentes ‘sérios’ do sistema eléctrico nacional. Actualmente, os contratos de fornecimento de parques eólicos incluem, em geral, garantias de disponibilidade muito elevadas, não raramente de 97%, e sempre acima dos 95%.

O facto da tecnologia e conhecimento estarem num estado de maturação elevado não implica que a energia eólica tenda a estagnar. Antes pelo contrário, novos desafios têm surgido como o da microprodução e a aplicação de turbinas *offshore*. A primeira questão será aqui abordada no capítulo 4, já o *offshore* está fora do âmbito deste trabalho. Só de referir que em *offshore* se encontram algumas vantagens interessantes como a elevada massa volúmica do ar, a baixa rugosidade da superfície marítima, recurso pouco perturbado, entre outras. Contudo, a necessidade de investimentos mais elevados leva a que se vá adiando esta questão, apostando-se por enquanto nos parques eólicos tradicionais.

A busca da situação ideal, produção de energia junto do local de consumo, tem vindo a alimentar investimento e desenvolvimentos interessante no que respeita à produção descentralizada de energia e à microprodução. A produção de energia nos locais de consumo começou por ser conseguida com a utilização de pequenas centrais de queima de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, mais tarde, com a crescente preocupação com as questões ambientais passou-se à utilização de fontes renováveis de energia, como a solar e hídrica em casos muito pontuais. Ultimamente, o sucesso da eólica de grande escala veio suscitar algum interesse na possibilidade utilização de aerogeradores mais pequenos junto dos locais de consumo. A utilização destes equipamentos em ambientes urbanos é ainda reduzida, contudo as expectativas são muitas. Para que se possam compreender as principais questões em torno da energia eólica é necessário o conhecimento de alguns conceitos inerentes à tecnologia e ao próprio recurso.

3. Tecnologia e conceitos

Na microprodução eólica os conceitos base são comuns aos da “grande eólica”, pois relacionam-se directamente com as questões energéticas intrínsecas ao vento. Já a tecnologia tem vindo a mostrar-se um pouco diferente da que os parques eólicos tradicionais utilizam, pois o recurso em ambiente urbano é bastante diferente, qualitativa e quantitativamente, daquele que se encontra em ambiente rural.

3.1 Potência contida no vento

É importante conhecerem-se as limitações da conversão em qualquer aproveitamento energético, especialmente no caso da microprodução eólica devido à pequena área de captação/varrimento dos aerogeradores, de forma a não se criarem expectativas de produção irrealistas. A energia cinética contida num determinado corpo em movimento é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Eq.1}$$

onde m é a massa do ar e v a sua velocidade absoluta.

Num escoamento, introduzindo o conceito de caudal mássico temos:

$$\dot{m} = \rho v A \quad \text{Eq.2}$$

onde ρ é a massa volúmica do fluido, v a sua velocidade e A a área correspondente ao varrimento da turbina. Da conjugação da equação Eq.1 com a Eq.2 obtemos a equação da potência:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A \quad \text{Eq.3}$$

A Figura 3.1 ilustra a potência contida no vento em função da velocidade para diferentes diâmetros do rotor.

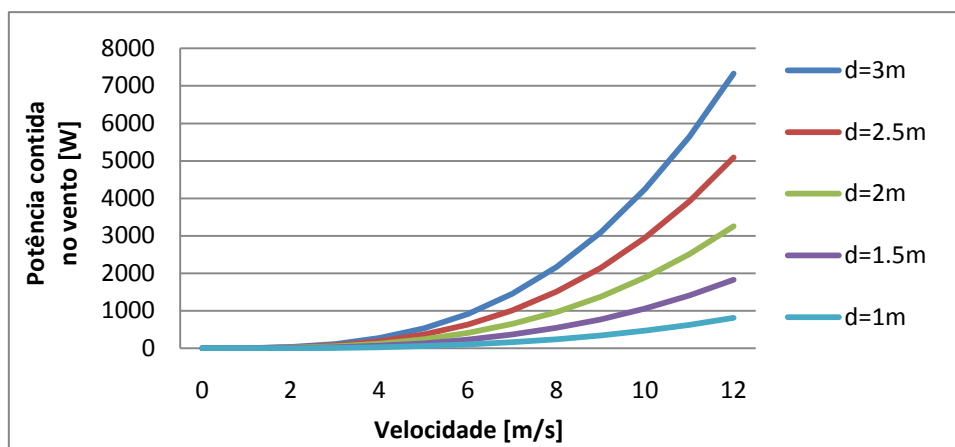


Figura 3.1 - Variação da potência contida no vento em função da sua velocidade e diâmetro de rotor

O gráfico da Figura 3.1 mostra-nos a potência que seria possível extrair do vento caso a eficiência na conversão fosse total. Contudo, existem limitações na conversão energética. O coeficiente de potência traduz essa mesma limitação e define-se como sendo o quociente entre a potência de saída do aerogerador, P_a , e a potência disponível P numa determinada condição de vento.

$$C_p = \frac{P_a}{P} = \frac{P_a}{\frac{1}{2}\rho v^3 A} \quad \text{Eq.4}$$

A curva típica de C_p pode ser vista na Figura 3.2. O valor máximo desta curva fixa-se no 0,593 pela aplicação da hipótese de Betz.

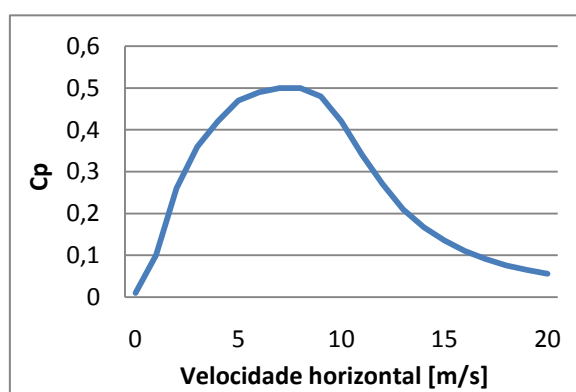


Figura 3.2 - Curva de genérica do coeficiente de potência

Esta hipótese resulta da simples aplicação da teoria do disco actuante ao rotor dos aerogeradores. Até aos dias de hoje nenhum dispositivo conseguiu ultrapassar o limite teórico imposto por esta aproximação, o que não invalida que tal venha a acontecer. (Tony Burton, 2001)

3.2 Coeficiente de Betz

Segundo o limite imposto pela hipótese de Betz, um aerogerador somente poderá converter 59,3% da energia total contida no vento em energia mecânica. Para que se atinja tal valor, a velocidade a jusante do rotor deve ser um terço da velocidade a montante do mesmo.

O cruzamento da informação do gráfico do coeficiente de potência (Figura 3.2) com a informação do potencial energético contido no vento (Figura 3.1) permite a obtenção da curva de potência de um aerogerador (Figura 3.3).

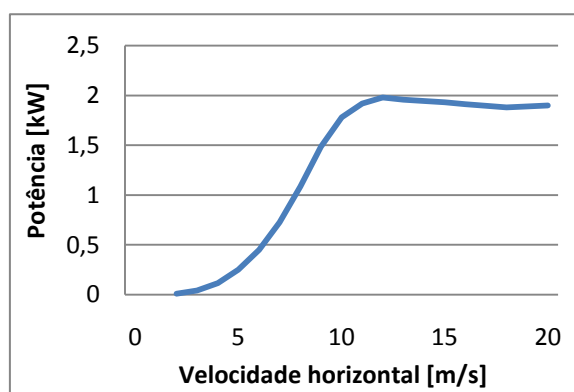


Figura 3.3 - Curva de potência genérica para aerogerador com rotor de 3 metros de diâmetro

No caso aqui apresentado foi obtida a curva de potência para um aerogerador com 3 metros de diâmetro. A potência nominal de um aerogerador com tais dimensões será de aproximadamente 2 kW. É de referir porém, que os valores aqui apresentados, embora sejam fruto de uma análise superficial às especificações técnicas de alguns aerogeradores, representam uma aproximação bastante aceitável àquilo que são as características das máquinas actuais. Este valores muito genéricos servem somente para se ter uma melhor noção do conceito apresentado neste capítulo.

3.3 Curva de potência de um aerogerador

O desempenho de uma turbina é determinado pelo regime de vento e pela sua curva de potência. Tipicamente, estas curvas apresentam a potência gerada em função da velocidade do vento e estão definidas entre a velocidade de entrada e de saída de serviço. A primeira é determinada, sobretudo, pelas perdas de transmissão, dizendo respeito à menor velocidade de vento com a qual o aerogerador consegue produzir energia. A segunda está definida de forma a proteger a máquina de cargas excessivas.

As curvas de potência devem ser encaradas com alguma reserva, devido à forma como são obtidas. No caso dos aerogeradores de grande porte as normas para as curvas de potência são utilizadas desde há muito tempo a esta parte. De qualquer modo, essas normas, embora permitam a comparação directa entre aerogeradores, não garantem que no local onde o aerogerador será colocado a sua produção seja igual àquela que está descrita na sua documentação.

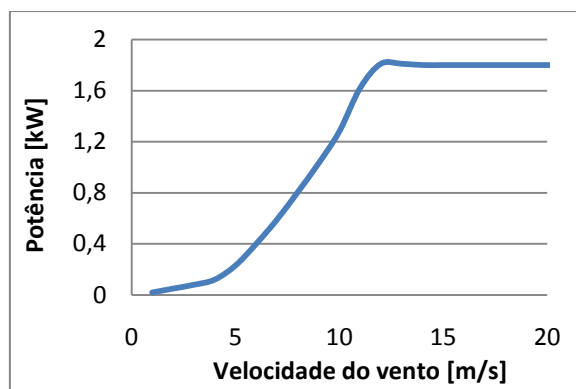


Figura 3.4 - Curva de potência Nheowind 3D 100 CP

Devemos ter em conta que as curvas de potência são, geralmente, obtidas em planícies a baixa altitude, com condições de vento dificilmente igualáveis em zonas de relevo mais pronunciado. Nos pequenos aerogeradores estas standardizações são relativamente recentes e muitas vezes concebidas por instituições nacionais, como acontece nos Estados Unidos, Inglaterra e Holanda, o que leva a que haja uma grande variedade de normalizações. Actualmente a tendência é a de criar uma norma internacional, à semelhança do que se passou com as turbinas de grande porte. Esta medida leva, sem dúvida, a um mercado mais aberto e competitivo, o que é positivo para os consumidores/investidores, para a economia e até para o ambiente. (Mertens, 2003)

3.4 Tipos de aerogeradores

Inicialmente a tecnologia dos pequenos aerogeradores foi fundamentalmente baseada no vasto conhecimento adquirido ao longo dos anos na produção de aerogeradores de grande porte. Para além do esquema típico de três pás e eixo horizontal, novas propostas e conceitos têm vindo a público, sendo ainda difícil dizer-se qual o tipo de turbina mais eficaz, pois surgem constantemente novas propostas.

As turbinas separam-se em dois grandes grupos, as de eixo horizontal e as de eixo vertical. As primeiras são as mais comuns, dominando largamente os parques eólicos comerciais. Normalmente usam três pás e seguem a direcção do vento de forma a optimizarem a captação da sua energia. Para isso é necessário um mecanismo que permita que tal aconteça. Nas turbinas de grande porte utilizam-se motores hidráulicos ou eléctricos para direccionar o rotor (alinhamento activo); já nas de pequeno porte é normalmente utilizado um leme (alinhamento passivo). Independentemente do tipo de mecanismo de orientação, a turbulência e a instabilidade do escoamento são factores que influenciam negativamente o desempenho de tais mecanismos.

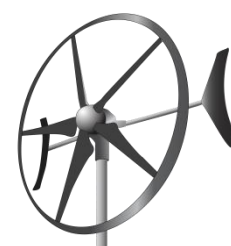


Figura 3.5 - Turbina de eixo horizontal com anel exterior



Figura 3.6 - Turbina de eixo horizontal NHeolis

As turbinas de eixo horizontal, quando não estão ligadas à rede, podem apresentar problemas de excesso de velocidade de rotação no caso não haver consumo da energia produzida. Esta situação pode levar à destruição da própria turbina. Para evitar que tal aconteça é aconselhável recorrer-se ao consumo da energia através de uma ‘load dump’. Esta carga consiste, usualmente, numa resistência eléctrica que deve estar dimensionada para a potência máxima do aerogerador e é activada sempre que não haja consumo da energia produzida.

Este tipo de turbinas (de eixo horizontal) apresenta também problemas de ruído que estão muito relacionados com o escoamento do ar em torno das pontas das pás. Este fenómeno está bastante estudado e alguns fabricantes têm já pequenos aerogeradores que contornam esta questão, com um anel exterior que une as pontas de todas as pás (ver Figura 3.5). Uma elevada razão entre a velocidade das pontas das pás e a velocidade do vento é normalmente motivo suficiente para que o ruído apareça. Apesar desta desvantagem, a turbina de eixo horizontal é a mais eficiente em condições de vento moderado. Nas Figuras 3.5 e 3.6 podem ver-se turbinas de eixo horizontal muito distintas daquelas que usualmente vemos nos parques eólicos convencionais. (Webb, 2007)

As turbinas de eixo vertical, por sua vez, podem ser de dois tipos, Darrieus e Savonius. As primeiras são baseadas no efeito de sustentação e a ligação entre as pás é feita pelos extremos das mesmas, excepto o caso particular das turbinas do tipo H-Darrieus onde essa ligação se faz pelo centro. As turbinas de Savonius são baseadas no arrasto, o seu rácio entre a velocidade das pontas das pás e a velocidade do ar nunca é maior que um. Assim, a baixa razão entre as velocidades leva a um funcionamento com baixo nível de ruído. Dentro das turbinas de eixo vertical a de Darrieus tem significativamente melhor eficiência do que as Savonius. Tanto uma como outra são normalmente utilizadas em instalações de baixa potência. Contudo, comparativamente com as turbinas de eixo horizontal, apresentam menor eficiência devido ao descolamento aerodinâmico que cada pá sofre em cada rotação. (Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings, 2002)

As turbinas de eixo vertical apresentam uma vantagem relativamente às de eixo horizontal, o menor ruído. Esta vantagem reveste-se de particular importância na utilização destes dispositivos em ambiente urbano e deve-se ao facto do rácio entre a velocidade da pá/vento ser menor do que aquele que as turbinas de eixo horizontal apresentam. Para além disso, são capazes de operar com vento de qualquer direcção sem que isso leve a perdas por desalinhamento. Também se tem verificado que, de uma maneira geral, as turbinas de eixo vertical são menos afectadas pela turbulência, sendo esta outra vantagem relevante. Tanto no caso das turbinas de Savonius como no caso das turbinas de Darrieus, a possibilidade de o gerador ficar na base do equipamento representa uma vantagem, pois facilita as operações de manutenção.



Figura 3.7 - Turbina de Savonius

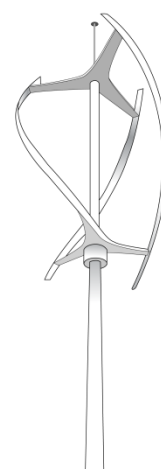


Figura 3.8 -Turbina de Darrieus

Como principais desvantagens destas turbinas, o facto de consumirem energia para arrancarem devido ao baixo binário de arranque que possuem, problema este que está a

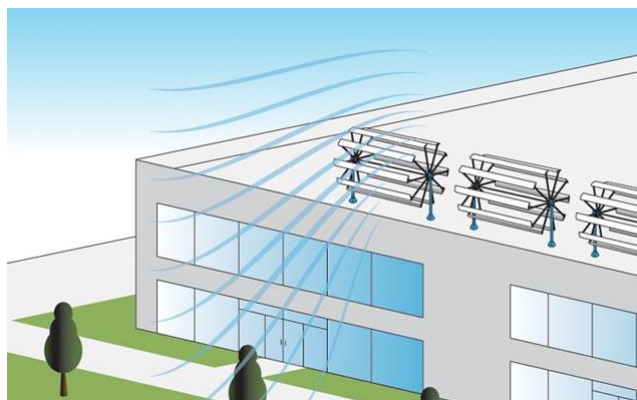


Figura 3.9 - Turbina de parede Darrieus

tentar ser ultrapassado com o desenvolvimento de novas pás. Por outro lado, quando a velocidade de rotação é baixa, é necessária uma elevada razão de multiplicação entre a velocidade do rotor e o gerador, o que leva a um aumento nas perdas e portanto a uma menor eficiência (Webb, 2007).

A utilização de turbinas ‘tipicamente’ de eixo vertical na horizontal, é defendida por alguns fabricantes como uma solução viável (ver Figura 3.9). Esta turbina

foi concebida de forma a aproveitar o fluxo de ar ascendente que incide numa determinada face do edifício. Assim, deve ser montada na aresta do topo do edifício. Tem como desvantagem, a baixa produção quando o vento não incide na direcção perpendicular à face onde a turbina está instalada, pelo que só deverá ser utilizada em regiões onde a direcção do vento seja aproximadamente constante durante grande parte do ano. (Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings, 2002)

3.5 Mecanismos de controlo

Os aerogeradores de grande porte utilizam maioritariamente mecanismos de controlo aerodinâmico como o *stall*, *pitch* e *active stall*. No primeiro as pás são desenhadas de maneira a entrarem em perda por descolamento aerodinâmico a uma determinada velocidade do vento. O *pitch* implica variação do passo, logo do ângulo de ataque das pás, de forma a otimizar a sua aerodinâmica. O controlo de potência é conseguido com a redução da sustentação como resultado de uma diminuição do ângulo de ataque. O último tipo de controlo, *active stall*, tem basicamente o mesmo princípio que é utilizado no *pitch*, embora aqui a regulação do ângulo de ataque implique um aumento do arrasto, ao contrário do que se passa na regulação por *pitch*. Os micro-aerogeradores não têm, regra geral, sistemas de controlo tão elaborados. É usual conseguir-se o controlo da potência por descolamento aerodinâmico das pás, devido à deformação das mesmas e consequente perda aerodinâmica ou com recurso a um sistema de travagem. Porém existem já propostas de sistemas de controlo mais sofisticados também para as pequenas unidades.

3.6 Perdas por desalinhamento

As turbinas de eixo horizontal têm também perdas significativas por desalinhamento com o escoamento. Este desalinhamento pode ser de dois tipos diferentes: desalinhamento no plano horizontal (azimute) e desalinhamento no plano vertical (ver Figura 3.10). O

primeiro é constantemente corrigido pela máquina, pelo que as perdas dependem da capacidade de resposta desta às mudanças de direcção do vento. De qualquer forma leva a pequenas quebras de produção energética, somente relevantes quando as características construtivas da máquina impedem uma boa *performance*.

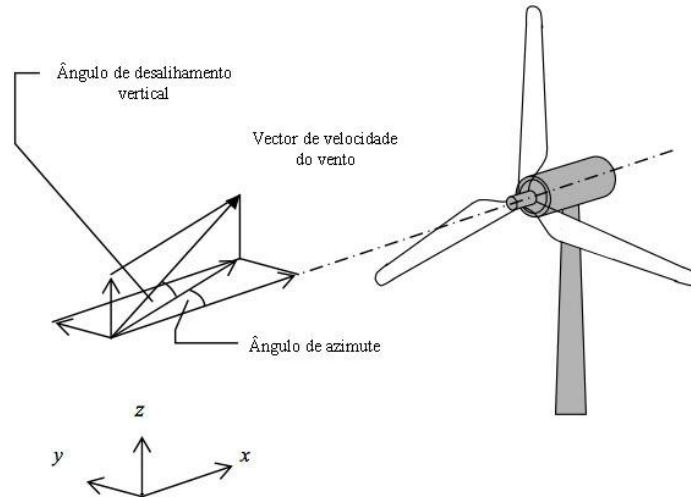


Figura 3.10 - Ângulo do vento relativamente ao rotor

Considerando que o rotor acompanha o azimute do vento de uma forma suficientemente rápida, só a componente vertical deste pode levar a perdas por desalinhamento. Usualmente utiliza-se o factor multiplicativo indicado na equação Eq.5 para a produção de um aerogerador em desalinhamento moderado. (Tony Burton, 2001)

$$\cos^3 \gamma \quad \text{Eq.5}$$

onde γ é o ângulo entre a direcção da velocidade do vento e o eixo do rotor. A condição de não-alinhamento, mesmo em vento moderado, leva a que o ângulo de ataque de cada pá esteja a variar continuamente à medida que o rotor gira. Este facto leva a que as cargas aplicadas ao rotor e pás sejam cíclicas, causando por vezes estragos/danos por fadiga.

No presente capítulo foram expostos tópicos visam dar uma noção generalista sobre aquilo que envolve o aproveitamento da energia do vento. Muitas das questões aqui abordadas são comuns à eólia de grande porte, embora algumas delas mereçam um cuidado especial quando estamos em presença de um aproveitamento em ambiente urbano pois a complexidade do recurso obriga a um rigor adicional. A produção descentralizada de energia eléctrica, com recurso a pequenas instalações de microprodução, tem um papel cada vez mais importante na conjuntura energética, papel que sai ainda mais reforçado quando tais instalações utilizam fontes renováveis de energia.

4. Microprodução

A microprodução consiste na obtenção de energia a partir de centrais de baixa potência independentemente da tecnologia utilizada. A opção de se gerar energia no local de consumo tem diversas vantagens. A primeira e mais evidente é, desde logo, a redução das perdas no transporte de energia, fenómeno este que ocorre na rede nacional e que leva ao desperdício de cerca de 6% da electricidade nela injectada. Nas centrais térmicas espalhadas por este país queimam-se combustíveis fósseis para a obtenção de electricidade, libertando-se CO₂ para a atmosfera. Estas centrais têm, normalmente, rendimentos entre os 35% e os 55% (no caso de centrais a ciclo combinado) ou seja, de toda a energia primária que entra na central, só cerca de metade a um terço é injectada na rede eléctrica. (Breeze, 2005)

Na Figura 4.1 podemos ter uma noção muito genérica da quantidade de energia que chega ao consumo relativamente à energia primária. A emissão de dióxido de carbono é, obviamente, referente à utilização de energia primária de origem fóssil. O recurso a fontes renováveis de energia e consequente redução das emissões de CO₂ torna-se uma vantagem muito significativa não só por questões ambientais, mas também por questões económicas, numa conjuntura em que cada vez mais se penaliza aqueles que poluem.

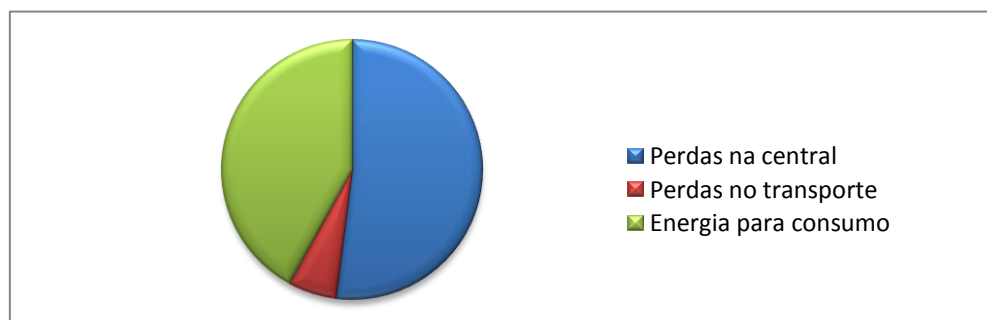


Figura 4.1 - Perdas de energia inerentes à produção com base em combustíveis fósseis

O compromisso assumido em Quioto é uma forte razão para que se façam todos os esforços no sentido de se reduzirem as emissões de dióxido de carbono, sob pena de fortes multas àqueles que não o façam. Outra vantagem respeitante à microprodução, é a possibilidade de venda de electricidade à rede, que muitas vezes se traduz numa forma eficaz de melhor se rentabilizar o investimento. O preço de venda é, normalmente, maior do que o preço de mercado, pelo que se consegue aí um proveito interessante. O melhor compromisso será vender o máximo possível à rede, máximo este que está estipulado, em termos de potência, em metade da potência contratada¹ ou em 4 MWh/ano² no que respeita à quantidade de energia vendida. Desta possibilidade de venda à rede advém outra vantagem que é a menor dependência do preço de mercado, visto que se compra uma menor quantidade de energia. Estas vantagens são de carácter diferente das supracitadas pois resultam de medidas de incentivo ao investimento na microprodução, já as outras são intrínsecas à utilização e implementação da tecnologia e portanto de índole mais absoluta se quisermos.

4.1 Aposta no futuro

O recurso à cogeração e à microprodução, aliado à utilização de fontes renováveis de energia, é apontado pela comunidade científica como uma contribuição importante para a solução dos problemas económicos ambientais e energéticos. Contudo, pela baixa potência disponibilizada pelas centrais de microprodução, só se conseguirão resultados significativos caso a sua utilização seja muito generalizada, motivo pelo qual é actualmente muito incentivada pela Comunidade Europeia e alguns governos em todo o mundo. No nosso país o crescimento destas tecnologias tem sido notável, sobretudo no que diz respeito à utilização de colectores solares fotovoltaicos. (www.ambienteonline.pt)

A utilização de sistemas de microprodução aliada a fontes renováveis de energia trará resultados sobretudo a médio e longo prazo, pelo que deve ser encarada como uma aposta para o futuro. Actualmente os regimes bonificados de venda de electricidade à rede garantem um proveito muito interessante e tornam o retorno do investimento mais célere.

Registos		Registos pagos		Reg. com pedido inspecção	
Quantidade	Potência [kW]	Quantidade	Potência [kW]	Potência [kW]	Potência [kW]
7338	25294	4205	14724	2132	7454

Figura 4.2 - Dados da potência registados no SRM até 08-04-2009

Como se pode deduzir da Figura 4.2 a potência média das instalações é de aproximadamente 3,5 kW. Do total de instalações registadas somente cerca de 29% chegaram à fase final de inspecção. Ainda assim, o programa de incentivo designado “renováveis na hora” tem vindo a revelar-se muito atractivo, já que nas primeiras cinco

1 Limite definido na legislação Portuguesa conforme descrito no ponto 3 do artigo 4º do Decreto-Lei 363/2007.

2 Limite para a energia eólica, hídrica, cogeração a biomassa, pilhas de combustível com base em hidrogénio proveniente de microprodução renovável. Para a energia eléctrica de origem solar este limite fixa-se nos 2,4MWh.

horas de registo de novas instalações se atingiu o limite previsto de 2 MW de potência (www.renovaveisnagora.pt). No capítulo referente à legislação serão abordadas de uma forma mais aprofundada as questões ligadas à regularização e remuneração das instalações de microprodução.

Este trabalho está especialmente vocacionado para a microprodução eólica, contudo será também brevemente abordada a solar fotovoltaica visto esta ser a referência na microprodução eléctrica com base em fontes renováveis de energia.

4.2 Tipos de utilização

A aplicação de instalações de microprodução assenta tipicamente em dois conceitos distintos. Por um lado, estas instalações podem ser utilizadas para consumo próprio, em locais isolados onde a rede eléctrica não chega; por outro, podem ser utilizadas em locais servidos pela rede, onde vigora o conceito de produtor/consumidor. No primeiro caso existe uma dependência da energia eléctrica gerada, pelo que é desejável proceder ao seu armazenamento de forma a tornar possível a sua utilização mesmo quando a fonte está indisponível. A complementaridade com outras tecnologias revela-se também uma opção acertada, levando a uma menor dependência entre as diversas tecnologias utilizadas. Já no segundo caso, a possibilidade de venda de energia à rede eléctrica veio estimular o investimento devido aos incentivos governamentais em vigor. Aqui estão a ser somente consideradas tecnologias que permitem a produção de energia eléctrica, motivo pelo qual não se faz referência à tão divulgada e utilizada solar térmica.

A viabilidade das instalações é, sem dúvida, muito diferente num caso e noutro. Nas aplicações em locais remotos a questão da viabilidade é pouco relevante ou até inexistente pois a necessidade de electricidade a isso conduz. Nestes casos a questão mais relevante do ponto de vista económico tem a ver com a relação entre quantidade de energia produzida versus investimento. Já no caso de utilização de instalações de microprodução ligadas à rede, a viabilidade está muito relacionada com o investimento inicial, seu tempo de retorno e com o preço de compra e venda do kWh à rede. Visto que o presente texto trata o vento em ambiente urbano, será abordada de uma forma mais efectiva a utilização de instalações acima referidas em zonas urbanas, ou seja, onde existe possibilidade de ligação à rede eléctrica.

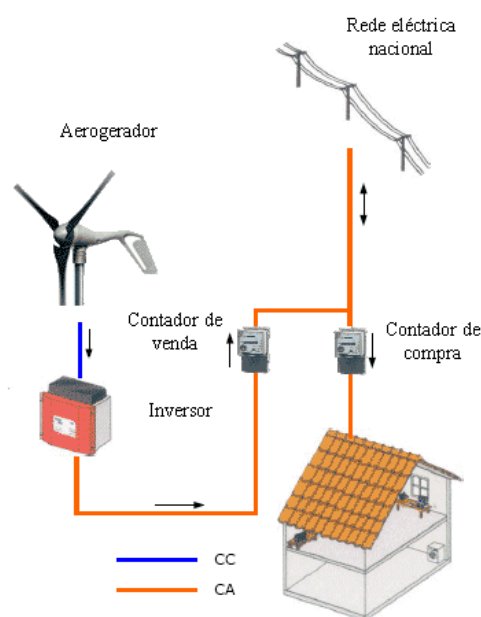


Figura 4.3 - Esquema simplificado de ligação à rede

4.3 Solar fotovoltaica

À semelhança de outras tecnologias baseadas nas fontes renováveis de energia a fotovoltaica é também um caso de sucesso, sendo o seu crescimento o mais notável no panorama energético nacional. A taxa de crescimento médio anual entre 2001 e o final de 2008 é de 71,4% e deve-se em muito à central fotovoltaica de Amareleja - Moura, distrito de Beja com uma capacidade instalada de 46 MW e à central de Serpa com 11 MW. Ainda assim, esta tecnologia representa somente 0,3% da energia produzida no nosso país a partir de fontes renováveis com um total de 58,5 MW instalados no final de 2008. Este valor quando comparado com os 4810 MW da hídrica e os 2860 MW da eólica à mesma data, demonstra bem o baixo peso que esta tecnologia tem na produção de energia eléctrica em Portugal.

A tecnologia das células fotovoltaicas atravessa uma fase de desenvolvimento e novos tipos de células têm sido divulgadas ao longo dos últimos anos. De todo o modo, cerca de 95% das células instaladas nos dias de hoje são de silício e têm uma eficiência, tipicamente, entre os 10 e os 15% o que se traduz num aproveitamento de 10 a 15% da energia incidente na superfície colectora. O elevado custo dos equipamentos e a sua baixa eficiência levam a que esta tecnologia só seja viável, grosso modo, quando utilizada em locais remotos onde a rede eléctrica é inexistente, ou em caso de venda à rede através de tarifas bonificadas.



Figura 4.4 - Central fotovoltaica de Moura, Beja

A ligação entre painéis pode ser feita em série ou paralelo. A primeira tem como resultado um aumento da tensão de saída do sistema; já a segunda leva a um aumento da intensidade de corrente. A conjugação de ambas as possibilidades de montagem permite uma adequação da saída do sistema àquilo que são as necessidades do consumo ou da rede.

No que diz respeito à microprodução com possibilidade de venda à rede, a solar fotovoltaica é sem dúvida uma das mais apelativas, visto ser considerada a referência de acordo com o Decreto-Lei n.º 363/2007. Outra vantagem será a baixa manutenção necessária durante o tempo de vida da instalação, tal como a simplicidade de montagem do circuito, fiabilidade, entre outras. Como principais desvantagens, de referir a baixa eficiência dos painéis e o seu elevado custo. As células de película fina representam aqui uma solução interessante, visto utilizarem uma menor quantidade de material e por isso permitem uma diminuição do custo dos painéis fotovoltaicos. Todavia, as técnicas utilizadas para a sua construção ainda são caras e só se tornam economicamente viáveis para produção de grandes séries. (Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias projecto e instalações, 2004)

4.4 Eólica

4.4.1 Enquadramento

Apesar das vantagens inegáveis da microprodução, a instalação de um micro aerogerador no topo de um edifício tem custos relativamente elevados, sendo portanto necessário ter em conta alguns aspectos relativos à viabilidade económica. Para os proprietários dos equipamentos, o factor mais importante é o tempo de retorno do investimento. Tendo isto em consideração, a correcta caracterização do recurso reveste-se de extrema importância, visto permitir uma estimativa da produção e, conseqüentemente, do tempo de amortização. Alguns estudos sobre as questões económicas em torno da microprodução eólica mostram que os factores mais importantes a ter em conta são, tipicamente, o próprio recurso e a possibilidade de venda à rede. De qualquer forma, a viabilidade destes investimentos raramente se verifica. Para que ela se torne mais provável é necessário garantir que o gerador trabalha em condições para as quais foi projectado, sendo por isso de evitar regimes de vento de elevada turbulência e outras características indesejáveis ao funcionamento das turbinas. Em países onde já está mais difundida a produção de energia com recurso a micro aerogeradores, verificou-se que a aplicação de taxas anuais e burocracias levam um significativo aumento do tempo de retorno. (Webb, 2007)



Figura 4.5 - Turbina de eixo horizontal em zona residencial da Inglaterra

Verificou-se também que, nem sempre se fizeram as melhores escolhas do ponto de vista da produção energética, pois a localização dos aerogeradores nem sempre foi a melhor. Um pouco à semelhança do que aconteceu com os painéis solares térmicos, a instalação dos aerogeradores foi feita, por vezes, de uma forma deficiente e pouco cuidada. Isto aconteceu pelos mais diversos motivos, desde problemas com a obtenção de licenças, urgência em mostrar e divulgar a tecnologia, falta de competência dos instaladores, etc.. O ruído durante o funcionamento dos equipamentos é também uma questão que leva a alguma apreensão, sobretudo nas máquinas de eixo horizontal onde o rácio entre a velocidade na ponta das pás e a velocidade do vento é normalmente elevado. Estes factos, aliados ao pouco tempo de ‘maturação’ dos aerogeradores, e ainda às previsões de produção completamente irrealistas de alguns fabricantes, levaram a que esta tecnologia ganhasse má reputação perante as populações. As novas propostas de aerogeradores que têm sido divulgadas e uma postura mais cuidadosa e rigorosa



Figura 4.6 - WTC do Bahrein com turbinas integradas no edifício

podem dar uma nova dinâmica a este mercado emergente e potencialmente muito vasto. Essas novas propostas dão como uma solução possível para o aumento de produção de electricidade através de turbinas, a sua integração nos próprios edifícios. Esta solução permite beneficiar do efeito de aceleração do vento em torno do edifício. Outras propostas dizem respeito a novos aerogeradores, por vezes muito conceptuais, que de uma maneira geral exploram novas formas e conceitos. A principal questão anda em torno da elevada turbulência que se verifica nas zonas urbanas, pelo que os pequenos aerogeradores que melhor consigam trabalhar nestas condições serão certamente os mais utilizados. (Vries, *Urban challenges: New research on integrating wind energy in buildings*, 2006)

4.4.2 Desvantagens

Como desvantagem mais evidente temos, desde logo, a menor disponibilidade de recurso eólico. Em ambiente urbano temos tipicamente menos vento do que em campo aberto, devido a perdas energéticas introduzidas pela elevada rugosidade do terreno, elevada turbulência do escoamento, distribuição não homogénea do campo de velocidades, subida da camada limite atmosférica, formação de zonas de esteira, entre outros fenómenos.

Uma questão que leva a alguma apreensão no que diz respeito à instalação de micro aero-geradores é a vibração que estes introduzem na estrutura dos edifícios. Alguns estudos têm revelado que as gamas de frequências próprias das estruturas estão fora das frequências a que os geradores trabalham (Vries, *New research on integrating wind energy in buildings*, 2006). Contudo, deve fazer-se um estudo caso a caso daquilo que são as condições de aplicabilidade dos equipamentos, de forma a não se correr o risco de provocar danos no edifício. Comparativamente com os painéis solares fotovoltaicos, as turbinas submetem cargas mais elevadas à estrutura. O seu peso é consideravelmente maior do que o dos painéis e aplicam momentos e vibrações, sendo por isso necessária uma cuidadosa aplicação. Também se deve ter alguma prudência quanto à construção ou reconstrução de edifícios nas imediações da turbina, pois isso leva a uma alteração das condições de vento. Muito dificilmente essa alteração será no sentido do melhoramento dessas condições, pelo que se deve ter algum cuidado com esta questão, embora seja de difícil controlo. Outra questão que se reveste de alguma importância, tem a ver com a segurança, ou falta dela, que a instalação de tais equipamentos acarreta. Supondo que, por qualquer motivo, se parte uma pá, a segurança de quem estiver por perto pode ser posta em causa. Se num parque eólico em ambiente rural esta questão não representa grande entrave, visto que o movimento de pessoas é praticamente nulo, em ambiente urbano representa um risco que não pode ser desprezado.

Tal como acontece nos parques eólicos, diversos estudos têm sido levados a cabo, de forma a verificar se existe influência negativa na avifauna local. Esta questão tem vindo a ser desmistificada mas não deve ser ignorada. Assim, as equipas de trabalho devem ser multi-disciplinares com o objectivo de se obter o melhor compromisso entre todas as áreas de conhecimento envolvidas em cada projecto.

4.4.3 Legislação

A microprodução de energia eléctrica é uma prática já com alguns anos no nosso país. No entanto, as novas directivas comunitárias e a possibilidade de venda à rede num contexto actual de descentralização da produção eléctrica vieram trazer-lhe um novo fulgor. O Decreto-Lei n.º 68/2002, de 25 de Março, veio regular a microprodução de energia eléctrica e a possibilidade de venda à rede, impondo como potência máxima para venda 150 kW. Por sua vez o Decreto-Lei n.º 312/2001, de 10 de Dezembro, estabeleceu ferramentas que permitem a entrega de electricidade à rede pública proveniente de novos centros electroprodutores, independentemente da sua potência nominal e localização geográfica, o que conduziu a uma centralização administrativa dos processos de licenciamento dos projectos de pequena dimensão. Assim, o Decreto-Lei n.º 363/2007, de 2 de Novembro, veio simplificar de forma significativa o regime de licenciamento existente. A criação do Sistema de Registo da Microprodução (SRM) possibilita que a antiga entrega e análise de projectos seja substituída pelo simples registo na base de dados do SRM evitando-se assim um processo de vários meses. Tanto aqueles que pretendam ser produtores como os instaladores de equipamentos devem estar registados no referido sistema estando, a partir desse momento, sujeitos a inspecção de conformidade técnica. Este último decreto-lei vem ainda complementar o Decreto-Lei n.º 80/2006, de 21 de Abril, que veio obrigar à instalação de painéis solares térmicos em todos os edifícios novos e vem ainda dar uma maior expressão à Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005, de 24 de Outubro, que aprova a Estratégia Nacional para a Energia no que diz respeito às políticas sobre renováveis e eficiência energética.

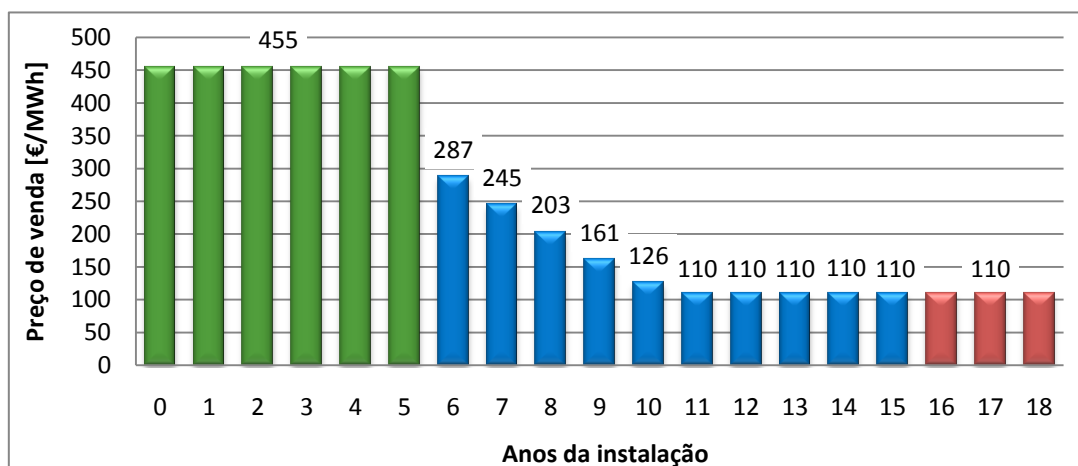


Figura 4.7 - Evolução do preço de venda à rede expectável para primeiros registos no SRM

Passando às questões mais técnicas, o Decreto-Lei 363/2007 criou dois tipos distintos de remuneração: o regime geral e o bonificado, sendo este último somente aplicável a fontes renováveis de energia e instalações de produção combinada de calor e electricidade, cujo local de consumo disponha ainda de painéis solares térmicos com uma área mínima de 2 m², já o primeiro é aplicável a todas as outras instalações. Define-se o universo de aplicabilidade deste decreto-lei como sendo “«Unidades do grupo I» instalação de produção de electricidade monofásica em baixa tensão com potência de ligação até 5,75 kW. O presente decreto-lei aplica -se às unidades de grupo I, quer

utilizem recursos renováveis como energia primária quer produzam, combinadamente, electricidade e calor.”. Define-se nesse documento que somente poderá ser produtor de energia aquele que tiver um contrato de compra de electricidade em baixa tensão e a unidade de microprodução integrada na instalação eléctrica da utilização/consumo, sendo que os produtores não podem injectar na rede pública mais do que 50% da potência contratada³. Deve ainda garantir-se que a electricidade entregue à rede está em conformidade com as normas técnicas, que não tem influência negativa no funcionamento desta e devem ainda suportar-se os custos de ligação à mesma. O acesso a regime bonificado implica maior restrição na potência de ligação, sendo esta de 3,64 kW para o caso da energia de origem eólica. A tarifa é calculada da seguinte forma: durante o ano de instalação e nos cinco anos subsequentes a tarifa de referência é de 455 €/MWh⁴ a partir daí e durante um período adicional de 10 anos aplica-se anualmente uma tarifa única e igual à que seja aplicável a instalações similares no dia 1 de Janeiro do ano em questão. Ao fim deste período adicional de 10 anos passa-se a regime geral, onde o preço de venda é igual ao preço de compra de energia eléctrica em vigor.

O regime bonificado foi limitado a 10 MW de potência ligada à rede para o ano de entrada em vigor do Decreto-Lei 363/2007, sendo esta aumentada em 20% todos os anos (ver Figura 4.8). Todos aqueles que fizerem o registo no SRM depois de estar esgotada a potência de ligação ficam sujeitos a uma tarifa equivalente a 95% da tarifa de referência do ano em questão.

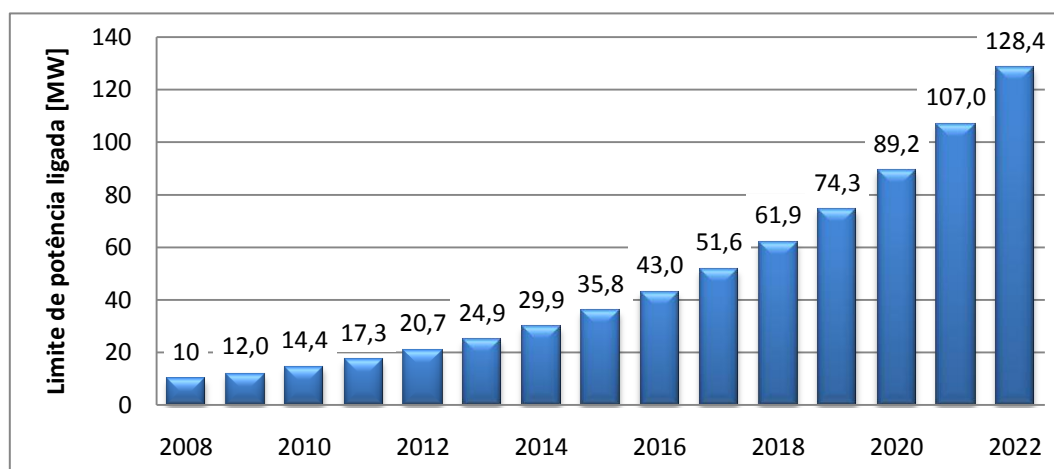


Figura 4.8 - Evolução da potência máxima de ligação à rede para sistemas de microprodução

Para além da limitação em termos de potência ligada há ainda limite na quantidade de energia vendida, sendo este limite para o caso da energia eólica de 4 MWh/ano por cada quilowatt de potência instalada. Os ensaios devem verificar conformidade com a norma prEN50438, caso a inspecção não resulte num parecer positivo, será necessário um pagamento adicional de 153.80€ para nova inspecção, para além dos 256.30€⁵ de abertura

3 Este limite de 50% não é válido para instalações de condomínios.

4 Tarifa de referência é de 650 €/MWh para a solar fotovoltaica no ano de entrada em vigor do Decreto-Lei 363-2007. Na microprodução eólica o valor da tarifa é de 70% da tarifa de referência, ou seja, de $650 * 0,7 = 455$ €/MWh de electricidade.

5 Valores referentes ao ano de 2009

do processo acrescidos da taxa de IVA de 12% no continente e 8% na Região Autónoma da Madeira.

Está previsto atingirem-se os 165 MW de potência instalada em centrais de microprodução até 2015 sendo que desses aproximadamente um quinto deverá estar ligado à rede.

5. Caracterização do recurso

A caracterização do vento em ambiente urbano é uma tarefa que exige rigor e prudência. Não é aconselhável recorrer a dados de outros locais e extrapolar as condições de vento para o local onde se pretenda caracterizar o escoamento, pois a complexa geometria associada a estes locais é responsável por grandes alterações das condições de vento.

5.1 O vento em ambiente urbano

O perfil do vento numa camada limite urbana pode ser aproximadamente descrito como seguindo uma curva logarítmica quando acima da altura média dos edifícios. Quando abaixo dessa altura o perfil de velocidades segue aproximadamente uma curva exponencial.

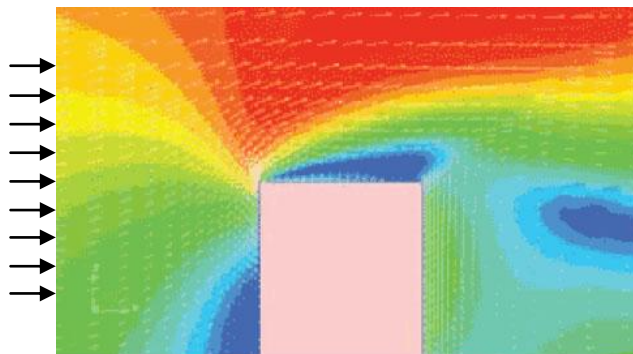


Figura 5.1 - Padrão do regime de vento em torno de edifício⁶ com topo plano (Heath, Watson and Walshe, 2007)

⁶ As cores quentes referem-se a elevadas velocidades do vento e as frias a velocidades baixas.

Tipicamente, no escoamento em terreno urbano ou complexo verifica-se uma desaceleração a montante do obstáculo, o aumento da velocidade em determinadas zonas, o aparecimento de uma bolha de separação, a subida da camada limite e a criação da região de esteira a jusante do obstáculo. A bolha de separação consiste numa região onde se verifica uma queda acentuada da velocidade do vento, bem como uma elevada turbulência, e deve-se ao facto do escoamento não conseguir ‘acompanhar’ perfeitamente o formato do edifício. Na Figura 5.1 a bolha de separação pode ver-se a azul logo acima do edifício. Acima desta região o vento sofre uma aceleração. (Vries, Urban challenges: New research on integrating wind energy in buildings, 2006)

Na aplicação de aerogeradores deve garantir-se que estes não têm contacto com a zona mais turbulenta do escoamento, sob pena de daí resultarem piores desempenhos e até danos no equipamento. Para além da turbulência também a componente vertical do vento tem uma palavra decisiva, tanto na questão do aproveitamento energético como no bom funcionamento dos aerogeradores.

A completa caracterização do vento em ambiente urbano e orografia muito complexa é praticamente impossível. Não foi conseguida, até aos dias de hoje, uma formulação matemática que traduza fielmente as características do vento, recorrendo a uma padronização da geometria complexa. Cada local tem características próprias e de difícil adaptação a formulações matemáticas, sendo por isso necessário um estudo caso a caso. A análise dos resultados de tais formulações revelou que o escoamento em torno destas geometrias depende fortemente da sua forma, tamanho e rugosidade (Mertens, 2003).

O *software* CFD (*Computational Fluid Dynamics*) permite a visualização do padrão de escoamento em torno do edifício (Figura 5.1 e 5.2). Recorrer à utilização deste *software* para se fazer a caracterização do recurso eólico num determinado local é, muitas vezes, uma solução muito atraente, pois nem sempre é possível a instalação de anemómetros e outros sensores para leitura das características do vento. Todavia o CFD não caracteriza perfeitamente o escoamento em torno de um qualquer objecto. Existem desvios relativamente àquilo que de facto ocorre, pelo que, muitas vezes, se torna interessante comparar os resultados do *software* com os resultados de testes em túneis de vento ou de campanhas de medições.

A execução deste trabalho permitiu recolha de dados que foram utilizados como *input* em simulações de CFD-*Fluent*®. Pretende-se assim perceber se a utilização deste *software* é uma boa opção quando se pretende caracterizar o vento em ambiente urbano.



Figura 5.2 - Bolha de separação (Mertens, 2003)

5.2 Intensidade do recurso

A intensidade do vento depende do tipo de geometria com a qual interage. Se por um lado, em colinas com inclinações suaves se pode esperar um aumento da intensidade do vento, resultante de efeitos aceleradores e concentradores, por outro, no caso de escoamento em ambientes muito complexos como é o caso dos ambientes urbanos, é de esperar que a elevada rugosidade conduza a perdas energéticas que inevitavelmente se traduzem numa redução da intensidade do vento. Esta menor intensidade do recurso suscita algumas questões quanto à viabilidade desta tecnologia. A questão da microprodução eólica não deve ser encarada de uma maneira simplista. A elevada complexidade do escoamento atmosférico em ambiente urbano exige uma postura séria e rigorosa no que diz respeito à sua caracterização. Ao contrário do que acontece em campo aberto (ambiente rural), onde por vezes é possível o recurso a atlas do vento para se ter uma aproximação às condições de vento, em ambiente urbano tal não é aconselhável. Só no caso de não haver qualquer informação válida sobre o regime de ventos num determinado local é que se deve recorrer a atlas. É de referir que, nesse caso, os valores de velocidade do vento serão sobrestimados, visto que os atlas disponibilizam somente uma estimativa da velocidade média, sem considerar as características intrínsecas a cada local, como sendo a rugosidade, construções, etc..

5.3 Aspectos qualitativos

Para além da intensidade do vento que se faz sentir em ambiente urbano é necessário também conhecer-se a qualidade deste. O facto da velocidade média num dado local ser, por exemplo, 8 m/s, não é razão suficiente para que o aproveitamento energético seja viável. Num caso extremo, se essa média for, por exemplo, conseguida maioritariamente por velocidades inferiores a 4 m/s e velocidades ocasionais de 30 m/s, será de prever que o aproveitamento energético é inviável pois as velocidades estão fora da gama de funcionamento dos aerogeradores. Podemos até ter um local onde, de facto, ao longo do ano a velocidade ronda os 8 m/s constantemente, mas se as componentes verticais do vento forem muito acentuadas e a turbulência muito elevada, o aproveitamento torna-se também inadequado. Muitos outros cenários podem ser colocados de forma a demonstrar que, intensidade não é por si só sinónimo de potencial para exploração. A conjugação da intensidade com a qualidade é essencial para que se possa proceder à instalação de um aerogerador.

A qualidade do vento está, de facto, muito associada à intensidade de turbulência, à componente vertical da velocidade e ao factor de rajada. No decorrer da análise dos dados recolhidos será efectuado o seu tratamento de forma a perceber-se se em ambiente urbano estes parâmetros são muito diferentes daqueles que se verificam nos tradicionais parques eólicos em zonas rurais. Através da parceria entre a FEUP e o INEGI foi possível a montagem de uma torre de medição de forma a permitir a obtenção de dados em ambiente urbano. Serão por isso utilizados dados de velocidade e direcção do vento medidos na cobertura do edifício DEMec – FEUP e apresentados os resultados e sua análise em capítulo posterior.

6. Campanha de medições

As medições levadas a cabo para a execução deste trabalho envolveram a montagem e instrumentação de uma torre de medição com 12 metros de altura, no topo do edifício do DEMec (Departamento de Engenharia Mecânica). A torre está instrumentada com um anemómetro de copos e sensor de direcção no topo, que servem como referência para a leitura das velocidades e direcções do vento. Abaixo desses equipamentos estão instalados dois anemómetros sónicos em funcionamento simultâneo, que registam a velocidade do vento em três componentes ortogonais entre si, colocados em diferentes locais do edifício. A mudança de local dos anemómetros sónicos é efectuada sempre que já existe um número relevante de ocorrências. Os dados recolhidos foram guardados num *data logger* no caso do anemómetro de copos e sensor de direcção; já os dados dos anemómetros sónicos foram gravados em discos amovíveis, graças a um novo sistema em desenvolvimento no INEGI. Foram também instaladas sondas de temperatura, humidade e pressão com ligação ao *data logger*. As medições começaram a 09 de Abril de 2009 e foram dadas como concluídas em 10 de Julho de 2009. Em anexo pode ser encontrada informação mais pormenorizada da disposição e montagem de todos os dispositivos.

6.1 Descrição do local

A torre de medição está situada no topo do edifício do DEMec – FEUP, localidade de Paranhos, Porto. Este edifício está orientado com um desvio de 5° relativamente ao norte, a uma altitude de cerca de 125 metros relativamente ao nível médio das águas do mar. Está a cerca de 4,5 km a norte do Douro e a aproximadamente 8,5 km da costa. A Este do edifício passa a auto-estrada A3, com orientação aproximadamente Norte-Sul (#2), ladeada por zonas de relevo pouco pronunciado e uma mata de eucaliptos altos (#1).



Figura 6.1 - Vista aérea do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP

Os edifícios em torno do DEMec têm, geralmente, uma altura igual à deste, respeitante a 3 ou 4 pisos, excepto o INEGI/IDMEC, a Norte, com 8 pisos, e a biblioteca da FEUP (#3), a Sul, com 7. A Figura 6.1 permite a visualização aérea do terreno na zona envolvente do DEMec.



Figura 6.2 - Vista da cobertura do DEMec

Na Figura 6.2 pode ver-se a configuração do topo do edifício do DEMec-FEUP, composta por um terraço com 6,8 metros de largura a todo o comprimento do edifício e um murete com cerca de 85 cm de altura. A torre está colocada junto ao extremo Norte do edifício, a cerca de 3 metros do topo Norte e encostada a uma caixa de escadas com 3 metros de altura. A torre tem 12 metros de altura dos quais 9 m estão acima do topo da caixa de escadas.

6.2 Equipamentos

Para a execução deste trabalho foram utilizados dois tipos de anemómetros: os sónicos e os de copos. Estes últimos, de grande utilidade na grande maioria das aplicações, pelas suas características, sobretudo inércia e constante de distância, não se adequam a regimes de vento reinantes em ambiente urbano. A constante de distância define-se como sendo: a distância percorrida pelo vento que implique uma variação de $1 - e^{-1} = 0,634$ da variação total sofrida pelo anemómetro, quando aplicada uma solicitação em degrau (1ª ordem). Esta característica, pode ser tomada como a constante de tempo de um anemómetro apresentada sob a forma de uma distância. Quanto menor for a constante de um anemómetro de copos, melhor será a sua *performance*. Tipicamente, os anemómetros actuais apresentam constantes de distância que rondam os 2 metros, ou seja, turbilhões com dimensão menor do que 2 metros são avaliados de uma forma deficiente pelo dispositivo. Por outro lado, os anemómetros de copos não conseguem separar as diferentes componentes da velocidade como acontece com os dispositivos sónicos. Estas limitações levaram a que se tenha optado pela anemometria ultra-sónica para a caracterização do vento na cobertura do DEMec.

6.2.1 Anemómetro sónico

O aparecimento e divulgação de novos tipos de anemómetros, como é o caso dos sónicos, deve-se mais ao facto de permitirem uma medição mais correcta de escoamentos turbulentos, do que pela possibilidade de leitura da componente vertical da velocidade. Como principal vantagem do anemómetro sónico, será de referir a sua rápida resposta dinâmica, a elevada resolução, precisão e o facto de medirem velocidade e direcção (embora esta última indirectamente) num só dispositivo, todavia a sensibilidade à precipitação leva a uma falta de exactidão em períodos chuvosos. Estes aparelhos têm vindo a ser muito utilizados de há quinze anos a esta parte para o estudo de regimes de vento com turbulências elevadas, sobretudo graças à sua elevada resolução. (Ribeiro, 2005)

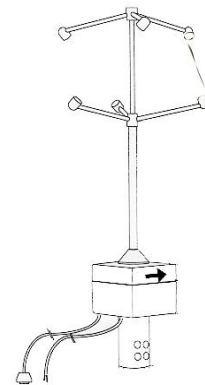


Figura 6.3 - Anemómetro sónico METEK USA-1

Marca	Metek
Modelo	USA-1
Gama de direcções	0 – 360°
Gama de velocidades	0-60 m/s
Gama de temperaturas	-40 até 60° C
Resolução	1 cm/s
Saída (Velocidade em x, y, z e temperatura t)	x , y, z, t
Frequência máxima de amostragem	50 Hz
Transferência de dados (default)	RS 232
Potência consumida um funcionamento	2,5 W

Figura 6.4 - Características gerais do anemómetro sónico

6.2.1.1 Princípio de funcionamento

A medição da velocidade do vento é conseguida recorrendo impulsos sonoros, os quais percorrem uma distância conhecida num determinado intervalo de tempo. Caso haja uma componente do vento na direcção do pulso sonoro, o intervalo de tempo será maior ou menor dependendo do sentido do vento. As transmissões e recepções de sinais sonoros são conseguidas através de transdutores piezométricos localizados nos braços do anemómetro.

Considere-se um par de sensores que comunique através de ultra-sons entre si. Um dos sensores é considerado o transdutor1 e o outro transdutor2. O primeiro emite um sinal sonoro que demora um intervalo $T1$ até atingir o segundo, transdutor2 (Figura 6.4).

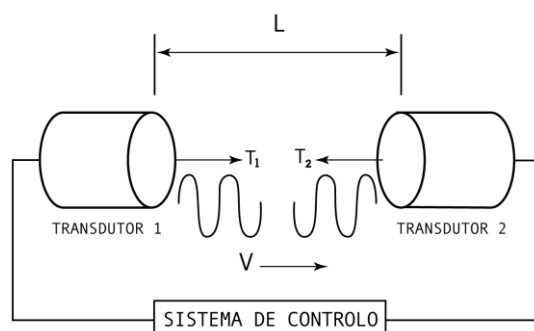


Figura 6.5 - Esquema dos transdutores dos anemómetros sónicos

O inverso também acontece, ou seja, o transdutor2 emite um sinal em direcção ao transdutor1, sendo o tempo gasto para percorrer o caminho igual e $T2$. Assumindo a velocidade do vento na direcção ilustrada na Figura 6.4, definem-se os intervalos de tempo $T1$ e $T2$ como:

$$T1 = \frac{L}{c+V} \quad \text{Eq.6}$$

$$T2 = \frac{L}{c-V} \quad \text{Eq.7}$$

A velocidade do vento, V , e do som, c , definidas de acordo com o comprimento L e o intervalo de tempo $T1$ e $T2$ vêm:

$$V = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T1} - \frac{1}{T2} \right) \quad \text{Eq.8}$$

$$c = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T1} + \frac{1}{T2} \right) \quad \text{Eq.9}$$

Assim, só é necessário proceder-se à definição da distância entre sensores, L , de forma a se conseguir a leitura dos valores da velocidade.

6.2.1.2 Geometria

A distância entre os sensores limita o tamanho do vórtice possível de se medir com um anemómetro sónico. Na sua geometria há algumas relações que devem ser respeitadas

de forma a garantir um conveniente funcionamento destes aparelhos. É usual utilizar-se uma razão de 20:1 entre a distância entre sensores e o diâmetro dos mesmos. Essa razão é ainda utilizada entre a altura das medições e a distância entre os sensores. Assim sendo, um anemómetro com distância entre sensores de 20 cm, deve ser colocado, no mínimo, a uma altura do solo de pelo menos 4 metros e os seus sensores não deverão ter um diâmetro superior que 1 centímetro. De todo o modo, o facto de termos a estrutura do anemómetro muito próxima do local onde é efectuada a medição, leva a uma interferência com a mensurada, o que é indesejável. Essa interferência pode ser de dois tipos distintos; são eles o ensombramento do transdutor e a distorção introduzida pelos braços.

Para o ensombramento do transdutor temos a seguinte relação definida por Wyngaard e Zhang:

$$\frac{(Vd)_m}{Vd} = \begin{cases} c + (1 - c)\sin\theta & \text{se } 0 < \theta \leq \theta_d \\ 1 & \text{se } \theta_d < \theta \leq 90 \end{cases} \quad \text{Eq.10}$$

onde $(Vd)_m$ é a velocidade ao longo da direcção entre sensores (Kaimal 1978); o ângulo θ define-se como:

$$\theta = \arctg\left(\frac{V_n}{Vd}\right) = 90 - \gamma. \quad \text{Eq.11}$$

em que γ é o ângulo entre a direcção dos transdutores e a direcção de propagação dos sinais sonoros afectados pela componente normal da velocidade.

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{V_n}{c}\right) \quad \text{Eq.12}$$

6.2.1.3 Calibração

Para se evitar que as medições se façam acompanhar de erros sistemáticos, deve fazer-se uma calibração em túnel de vento, ou até mesmo no campo. Para a calibração em túnel de vento para anemómetros sónicos, é usual efectuarem-se as medições em sequências automatizadas. Assim, conseguem-se séries de dados com informação diversificada para diferentes ângulos de incidência do vento, o que permite, por exemplo, perceber-se como varia a distorção do escoamento em função destes ângulos (P. Busche, 2005). A calibração no campo é realizada porque, por vezes, a turbulência em túnel de vento é consideravelmente menor do que aquela que se desenvolve em camada limite no escoamento atmosférico. Assim sendo, a separação do escoamento em torno do transdutor pode ser diferente do que seria de esperar, o que levaria a uma compensação excessiva para o efeito de sombreamento calculado a partir dos valores obtidos em túnel de vento (Ribeiro, 2005).

Para o presente caso de estudo foi efectuada a calibração descrita no manual dos equipamentos e esta pode ser consultada em anexo.

6.2.2 Anemómetro de copos e sensor de direcção

6.2.2.1 Descrição

Os anemómetros de copos são utilizados na grande maioria das campanhas de medição do vento a nível global. Isto deve-se sobretudo à sua robustez, elevada fiabilidade e baixo preço comparativamente com sensores de outros tipos. Contudo, existem algumas desvantagens na utilização destes equipamentos, sobretudo em regimes de vento de elevada turbulência. Nestes equipamentos ocorre o fenómeno conhecido por “*overspeeding*” quando sujeitos a regimes de vento com elevada instabilidade porque, devido à sua forma, a resposta do rotor é mais rápida para acelerações (aumento da velocidade do vento) do que para desacelerações, o que se traduz numa sobrestimativa da mensurada. Por outro, os efeitos da inércia de rotação a elevadas velocidades também marcam negativamente a *performance* destes aparelhos.



Figura 6.6 - Anemómetro de copos (à direita) e sensor de direcção (à esquerda)

Os sensores de direcção, muito resumidamente, são um transdutor potenciométrico com saída em tensão. No caso do anemómetro, só se consegue uma leitura da velocidade para valores acima de 0,3 m/s, pois abaixo desse valor a velocidade do rotor não apresenta uma relação aceitável com a velocidade do vento. Já no caso do sensor de direcção, só se conseguem leituras de direcção fidedignas para valores de velocidade acima de 0,5 m/s; este valor denomina-se usualmente por “*Threshold*”.

6.2.2.2 Características

Marca	Thies
Precisão	$\pm 2^\circ$
Resolução	1°
Coef. Amortecimento	> 0.25
Velocidade máxima de funcionamento	85 m/s
Gama de temperatura de funcionamento	-50 °C até 80 °C
Sinal de saída	Ptenciometro 10 k

Figura 6.7 - Resumo das características do sensor de direcção

Marca	Thies
Modelo	First class
Gama de medição	0,3 até 75 m/s
Resolução	0,05 m/s
Velocidade máxima de funcionamento	85 m/s
Gama de temperatura de funcionamento	-50 °C até 80 °C

Figura 6.8 - Resumo das características do anemómetro de copos

6.2.3 Sistema Autónomo de Anemometria Sónica

6.2.3.1 Descrição

O SAAS foi desenvolvido numa parceria entre o INEGI e a OSTIUM – Soluções de Engenharia, Lda., devido à necessidade de se criar um equipamento capaz de lidar com a elevada quantidade de informação disponibilizada pelos anemómetros sónicos de uma forma simples e eficaz. Ideia inicial do Eng.º Miguel Marques, o SAAS é uma solução apresentada pelo INEGI que vem cobrir uma lacuna existente no mercado muito específico da anemometria sónica. As características principais deste sistema são a boa capacidade para armazenamento, o baixo consumo de energia e a possibilidade de ser ligado a um *modem/logger*, de forma a tornar possível a leitura remota dos dados.

O SAAS, tem como componentes principais um miniPC de baixo consumo com o sistema operativo Linux e um sistema que utiliza um micro controlador PIC de elevada capacidade, que lê os dados do sónico e os converte em sinais de frequência e tensão. O primeiro indica que indica a velocidade do vento e o segundo a direcção. Estes últimos sinais em frequência e tensão, são ligados a um *modem/logger*, de forma a tornar possível uma monitorização remota do estado do sistema e dos valores da velocidade e direcção do vento. O SAAS disponibiliza dados novos dados ao *modem/logger* a cada segundo.

O sistema de armazenamento de dados utilizado é do tipo 'PEN USB'. A escolha deste tipo de dispositivo, teve em consideração a óptima relação capacidade/preço. Neste trabalho foram utilizados dispositivos de armazenamento com 8Gb que permitem uma autonomia de cerca de 80 dias à frequência de amostragem utilizada (20Hz).

6.2.4 Data Logger

6.2.4.1 Características

Os *data loggers*, da marca Ammonit, são equipamentos muito fiáveis que permitem guardar os dados dos diferentes sensores da torre de medição. O aparelho utilizado permite a ligação de 3 anemómetros, dois sensores de direcção, um pluviómetro, um termómetro, um barómetro, um higrómetro e ainda um piranómetro. É alimentado com recurso a uma fonte de corrente contínua e possui memória suficiente para se gravarem 500000 registos.

6.2.4.2 Comunicação

A comunicação do *data logger* com um PC é feita através de porta SERIE via protocolo RS232. Os ficheiros têm formato de texto o que significa que a informação pode ser facilmente modificados e tratados com recurso a *software standard*.

6.2.5 Programa de medições

O programa de medições é composto pela soma de diversos períodos. Estes períodos de medição correspondem a curtos intervalos temporais, onde foram adquiridos dados do vento em diferentes pontos da cobertura do edifício.

Na Tabela 6.1 pode ver-se um mapa do programa de medições, com datas de início, fim e geometrias correspondentes. Estas geometrias não são mais do que a configuração espacial dos instrumentos de medição, e definem por si só a localização dos sónicos. A primeira geometria (Geometria1) ambos os sónicos estão alinhados com a face norte do edifício, a uma distância de 3 e 6 metros da cobertura. Na segunda (Geometria2), são os dois ‘puxados’ 1,5 metros para dentro do edifício mantendo-se a distancia ao topo. Por fim, na terceira geometria (Geometria3) estes são colocados novamente no alinhamento da face norte, desta vez a 1 e 6 metros de altura. Estas geometrias estão convenientemente definidas em anexo, com recurso a figuras e breve texto descritivo.

Tabela 6.1 - Resumo do programa de medições

Data de início	Data de fim	Duração	Geometria	Sigla	Nota
14 de Maio 00h00m	20 de Maio 23h59m	7 dias	Geometria1	g1	-
22 de Maio 18h20m	30 de Maio 05h25m	5 dias, 11 horas e 45 minutos	Geometria2	g2-Maio	Excepto dia 23 e 24 de Maio
03 de Junho 11h00m	09 de Junho 10h20m	5 dias, 23 horas e 20 minutos	Geometria2	g2-Junho	-
09 de Junho 11h20m	11 de Junho 05h20m	1 dia e 18 horas	Geometria3	g3	-
23 de Junho 16h20m	29 de Junho 23h59m	5 dias, 7 horas e 40 minutos	Geometria3	g3-SAAS02	Excepto dia 25 (SAAS01 inactivo)

De referir que para a geometria g3-SAAS02, só se dispõe de dados relativos ao anemómetro sónico 2 (muitas vezes designados como dados do SAAS02). Em todos os outros períodos de medição os dados analisados foram obtidos em simultâneo pelo SAAS01 e SAAS02.

Quanto às frequências de amostragem, o *data logger* faz a leitura dos valores de velocidade do anemómetro de copos a cada 2 segundos, ou seja, a frequência de amostragem para o anemómetro de copos é de 0,5 Hz. Por sua vez, os dados do sensor de direcção são registados todos os segundos, sendo, portanto, a sua frequência de amostragem de 1 Hz. No que respeita aos anemómetros sónicos, os valores de frequência são de 20 Hz, ou seja, a cada segundo que passa, fazem-se 20 leituras da velocidade do vento. O tempo de integração utilizado é de 10 minutos para os dois tipos de anemómetros de forma a se conseguir um paralelismo entre os resultados.

Durante todo o período de medições foi considerada uma ‘rotação’ ao edifício para que as suas faces ficassem perpendiculares às direcções dos principais pontos cardeais. Assim, todos os resultados apresentados em secção posterior são afectados por tal rotação. O valor da rotação é de 5° no sentido anti-horário, ou seja, todos os resultados aqui apresentados têm como referência um ponto cardinal desviado 5° do Norte geográfico. As Figuras 6.9 e 6.10 complementam aquilo que aqui se explicou.

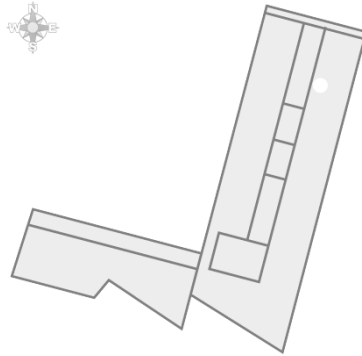


Figura 6.9 - Vista de cima da orientação do DEMec relativamente aos pontos cardeais (exagerado)

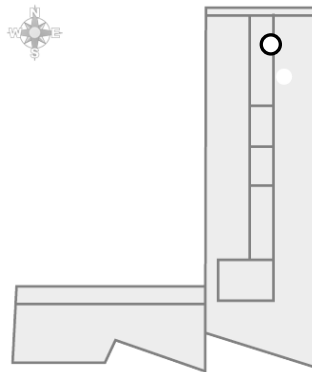


Figura 6.10 - Vista de cima do DEMec relativamente ao referencial utilizado neste trabalho

A utilização deste referencial local tem como objectivo facilitar a caracterização de vento em torno do edifício, permitindo uma analogia directa entre as direcções do vento incidente no edifício e suas características. O ponto preto colocado na Figura 6.10 diz respeito, aproximadamente, ao local onde está colocada a torre de medição.

6.2.6 Processamento da informação

O tratamento dos dados recolhidos foi feito com recurso a rotinas *Python* e *Scripts* e *functions MATLAB®*. O recurso a *Python* deve-se ao facto de os ficheiros de saída dos dois sónicos serem diferentes, o que implicaria a utilização de rotinas *MATLAB®* distintas para os dados do sónico 1 e do sónico 2. A diferença no formato de saída dos sónicos deve-se ao facto destes possuírem diferentes versões de *firmware*, embora sejam da mesma marca e modelo. Cada um dos ficheiros tem inicialmente a data e a hora, depois os caracteres identificativos dos parâmetros lidos pelos sónicos embora com ligeiras diferenças. Devido a estas, foi necessário criar uma rotina em *Python* para cada

série de dados de forma a formatar e simplificar a informação contida nos ficheiros. Com este pré-tratamento os ficheiros ficam mais ‘leves’ para serem processados em *MATLAB*®, pois elimina-se toda a informação não relevante.

No que diz respeito à utilização de *MATLAB*® foram utilizados *scripts* e *functions* para o processamento da informação. Tipicamente foram utilizados *scripts* para se fazer a leitura dos ficheiros e correrem as *functions* que por sua vez faziam o processamento dos dados propriamente dito.

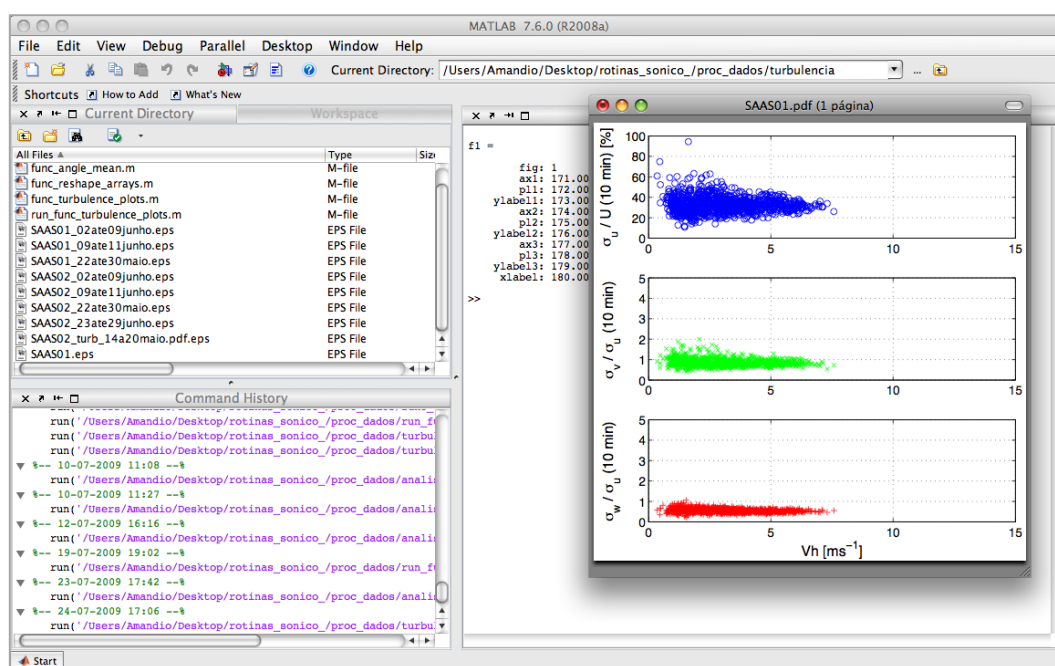


Figura 6.11 - Aspecto da ferramenta de trabalho *MATLAB*® quando executado em modo gráfico

Em determinadas situações, devido à dimensão das séries de dados, a execução dos *scripts* em *MATLAB*® procedeu-se em linha de comandos de forma minimizar a utilização de memória RAM (*Random Access Memory*). O *output* das *functions* é, maioritariamente, sob a forma gráfica e também em ficheiros de texto com um resumo da informação processada.

O cálculo dos resultados para intensidade de turbulência, inclinação do escoamento, etc. foi efectuado de acordo com as práticas do INEGI/CEsA. Assim sendo, define-se intensidade de turbulência para um tempo de integração de 10 minutos como:

$$IT_{10min} = \frac{\sigma(V_h)}{\bar{U}} \quad \text{Eq.13}$$

Onde $\sigma(V_h)$ é o desvio padrão da velocidade horizontal instantânea e $\bar{U}$ a velocidade média para o intervalo considerado. No caso dos anemómetros de copos, os valores instantâneos de velocidade horizontal são obtidos de 2 em 2 segundos; já no caso dos sónicos, o desvio padrão é calculado com base nos registos obtidos a 20 Hz, aproveitando-se assim as potencialidades destes aparelhos. O factor de rajada máxima e mínima também são calculados com a mesma base temporal. Define-se então o factor de

rajada máxima como sendo a razão entre a velocidade horizontal mais elevada registada em 10 minutos sobre a velocidade média horizontal desse intervalo.

$$G_{max} = \frac{Max(V_h)}{\bar{U}} \quad \text{Eq.14}$$

De igual modo, define-se o factor de rajada mínima como sendo o a razão entre a velocidade horizontal mínima e a média registadas num intervalo de 10 minutos.

$$G_{min} = \frac{Min(V_h)}{\bar{U}} \quad \text{Eq.15}$$

No caso dos anemómetros sónicos, que permitem a separação das componentes da velocidade, define-se inclinação do escoamento como:

$$\theta_w = \frac{w}{V_h} \quad \text{Eq.16}$$

onde w representa a componente vertical da velocidade e V_h a velocidade horizontal para cada instante. O resultado, θ_w , vem expresso em percentagem.

As diferentes componentes da intensidade de turbulência são calculadas com base no desvio padrão de cada componente da velocidade. Assim, define-se a intensidade de turbulência longitudinal como sendo:

$$IT_u = \frac{\sigma_u}{\bar{U}} \quad \text{Eq.17}$$

onde σ_u representa o desvio padrão da velocidade ao longo da direcção preferencial do vento no intervalo de integração. A componente lateral, é calculada da seguinte forma:

$$it_v = \frac{\sigma_v}{\sigma_u} \quad \text{Eq.18}$$

Onde σ_v , corresponde ao desvio padrão da velocidade na direcção ortogonal à direcção preferencial do vento. O denominador está definido na equação Eq.17. De forma semelhante, define-se o índice de turbulência vertical como a razão entre o desvio padrão da componente vertical do vento sobre o desvio padrão da componente longitudinal.

$$it_w = \frac{\sigma_w}{\sigma_u} \quad \text{Eq.19}$$

Tanto no caso da equação Eq.18 como no caso da Eq.19, os índices de turbulência it_v e it_w estão directamente relacionados com a velocidade média horizontal. Vejamos por exemplo para o primeiro caso:

$$it_v = \frac{\sigma_v}{\sigma_u} \quad \text{Eq.20}$$

onde se substitui σ_u por:

$$\bar{U} * IT_u = \sigma_u \quad \text{Eq.21}$$

de onde vem a seguinte relação:

$$IT_u * it_v = \frac{\sigma_v}{\bar{U}} \quad \text{Eq.22}$$

Considerando-se a intensidade de turbulência lateral $IT_v = \frac{\sigma_v}{\bar{U}}$, vem:

$$IT_u * it_v = IT_v \quad \text{Eq.23}$$

o que significa que os índices de turbulência it_v e it_w conduzem à intensidade de turbulência IT_v e IT_w , e podem ser vistos como uma fracção da intensidade de turbulência longitudinal relativamente à lateral e vertical, respectivamente.

7. Análise e discussão de resultados

Numa primeira instância, serão apresentados os resultados dos dados recolhidos com recurso a anemometria convencional e depois aqueles que foram recolhidos com recurso a anemometria ultra-sónica. Em qualquer um dos casos, os resultados de ambiente urbano são apresentados primeiro. As conclusões retiradas da análise dos resultados obtidos não devem ser encaradas como absolutas pois as medições pecam por defeito no que diz respeito ao período de tempo considerado.

7.1 Anemometria convencional

O anemómetro de copos e sensor de direcção estão a uma altura de 30 metros, a nove metros da cobertura do edifício do DEMec. Durante o período de medições, a direcção preferencial do vento foi NW, com cerca de 15% do total de ocorrências. O sector WNW, por sua vez, fica-se pelos 11,8%.

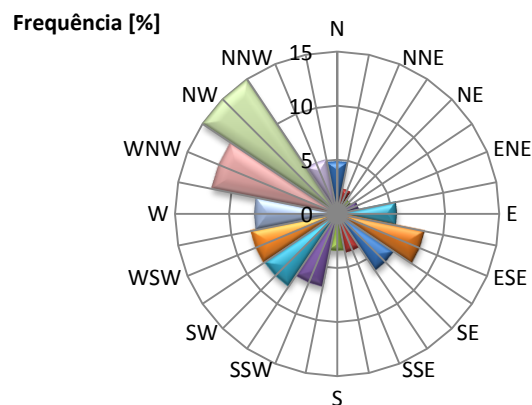


Figura 7.1 - Rosa-dos-ventos para dados do DEMec - FEUP

No que diz respeito à velocidade média por sector, as maiores velocidades ocorrem nos sectores com influência de Oeste.

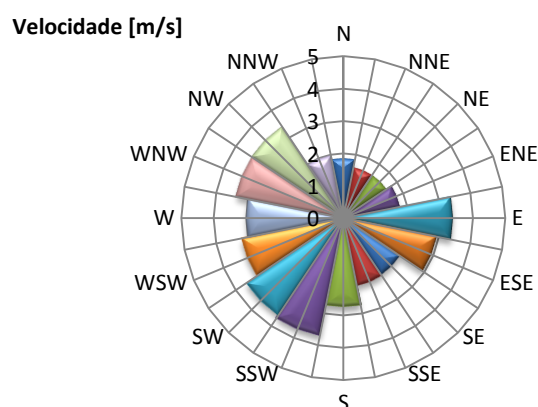


Figura 7.2 - Rosa das velocidades para dados do DEMec - FEUP

O sector com maior velocidade média é o 10° (SSW) com um valor de 3,7 m/s. A velocidade média do sector NW ronda os 3,4 m/s.

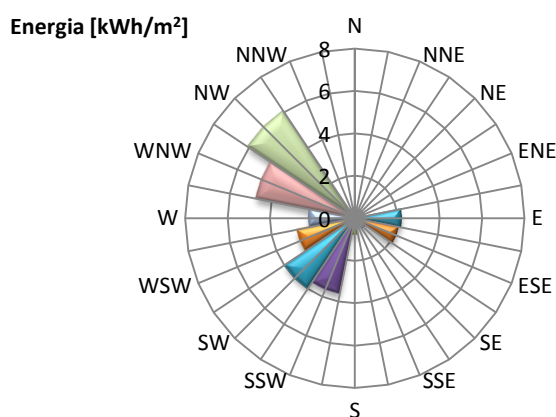


Figura 7.3 - Rosa da energia para dados do DEMec - FEUP

A velocidade média elevada, conjugada com o maior número de ocorrências, leva o sector NW a ser aquele que tem maior contribuição energética.

A intensidade de turbulência é apresentada na Figura 7.4. Visto que os anemómetros de copos não são capazes de separar as diferentes componentes do vento, a intensidade de turbulência calculada a partir das suas medições é uma combinação da turbulência longitudinal e da lateral. A análise da intensidade de turbulência acima dos 3 m/s revela que esta tem um valor médio de 27%. Considera-se este valor (3 m/s) pois ele corresponde, aproximadamente, à velocidade de entrada dos aerogeradores.

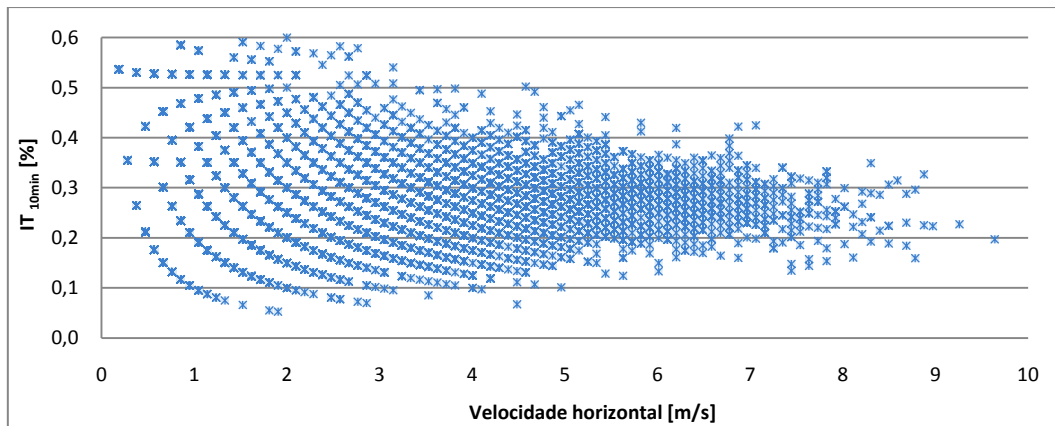


Figura 7.4 - Intensidade de turbulência no DEMec - FEUP

A rajada máxima situa-se, geralmente, entre os 1,5 e 2,5. No caso da mínima os valores tendem a ser menores do que 0,5 à medida que a velocidade aumenta.

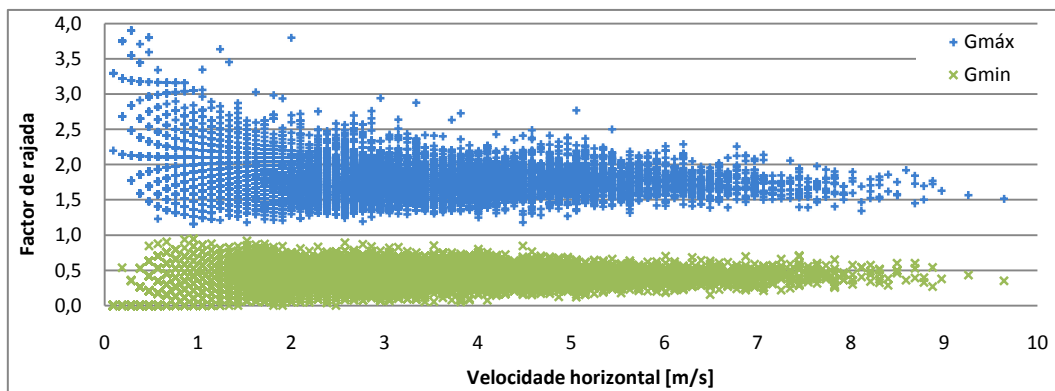


Figura 7.5 - Factores de rajada máxima e mínima no DEMec - FEUP

O padrão diário verificado ao longo da campanha está ilustrado na Figura 7.6. As velocidades de vento mais elevadas ocorrem tipicamente durante a tarde.

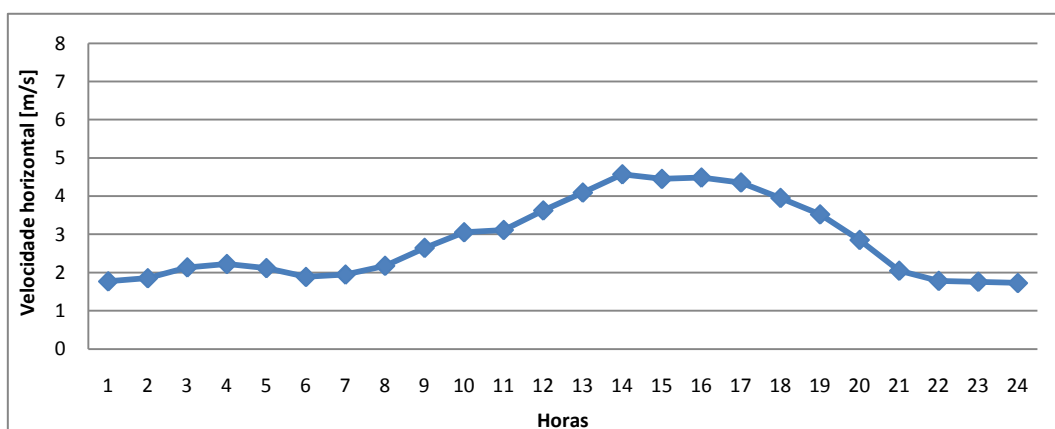


Figura 7.6 - Padrão diário do vento no DEMec - FEUP

De uma maneira geral, as horas mais propícias a possível aproveitamento energético vão desde as 11h até às 19h aproximadamente. Durante a noite verifica-se uma acalmia das condições de vento.

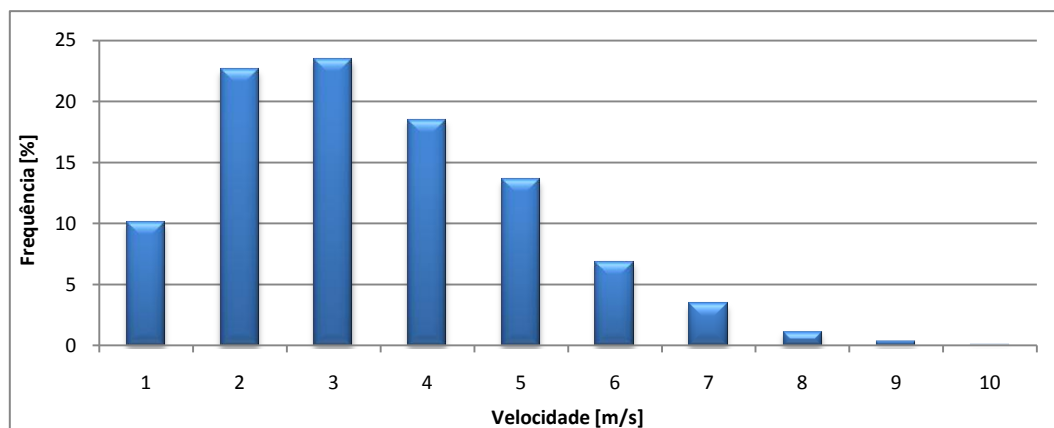


Figura 7.7 - Histograma de velocidades para dados do DEMec

A melhor aproximação à distribuição de Weibull é conseguida para valores de $k=1,93$ e $A=3,4$ m/s. Como se constata a partir da Figura 7.7, a velocidades entre 1 e 2 e ainda entre 2 e 3 m/s são aquela que ocorrem maior número de vezes.

Em ficheiro anexo encontra-se informação complementar sobre os dados recolhidos com recurso a anemometria convencional na cobertura do edifício do DEMec.

Sem pretensões a caracterizar o vento, mas apenas com o intuito de se formar uma ideia da valia relativa do local onde se efectuaram estas medições, procurou-se uma série de dados concorrente, recolhida em ambiente rural. O local designado Campo1 situa-se numa zona montanhosa de orografia pouco complexa, a uma altitude de 500 metros e a 30 km (aproximadamente) da costa Oeste do Norte de Portugal. A distância entre este local de medições e o edifício do DEMec ronda os 25 km em linha recta.

Neste trabalho foram utilizados dados recolhidos a uma altura de 64 metros. O período de medições considerado corresponde ao período total de medições no DEMec – FEUP. Ou seja, com início às 12h20m de dia 22 de Abril de 2009 e fim às 10h40m de dia 20 de Junho.

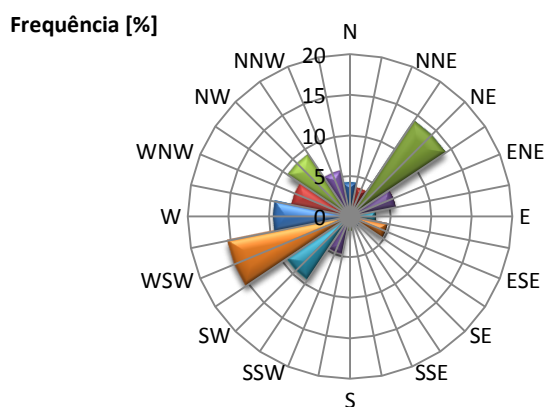


Figura 7.8 - Rosa-dos-ventos para dados do Campo1

Os sectores 13 (WSW) e 3 (NE) são aqueles que apresentam maior número de ocorrências para o período estudado. Estas ocorrências, em conjunto, representam 29,5% do total. Em termos de velocidade média, o sector 3 destaca-se com um valor de 7,3 m/s.

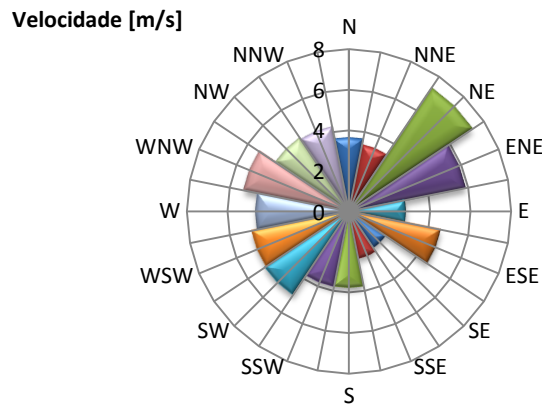


Figura 7.9 - Rosa de velocidades para dados do Campo1

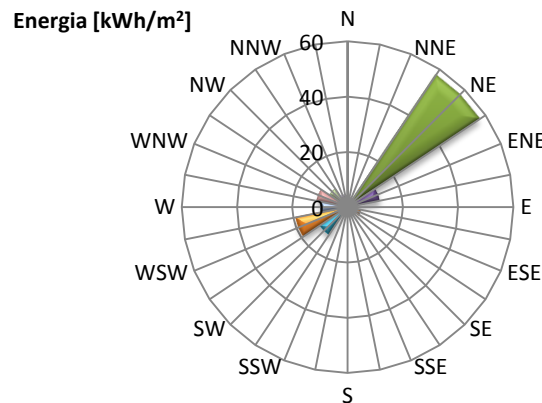


Figura 7.10 - Rosa da energia para dados do Campo1

A Figura 7.10 mostra total de energia disponível em cada sector a longo do período de medições. O 3º sector apresenta valores bem acima dos restantes, com 57,4 kWh/m², correspondentes mais de 39% do total da energia disponível neste local ao longo de toda a campanha.

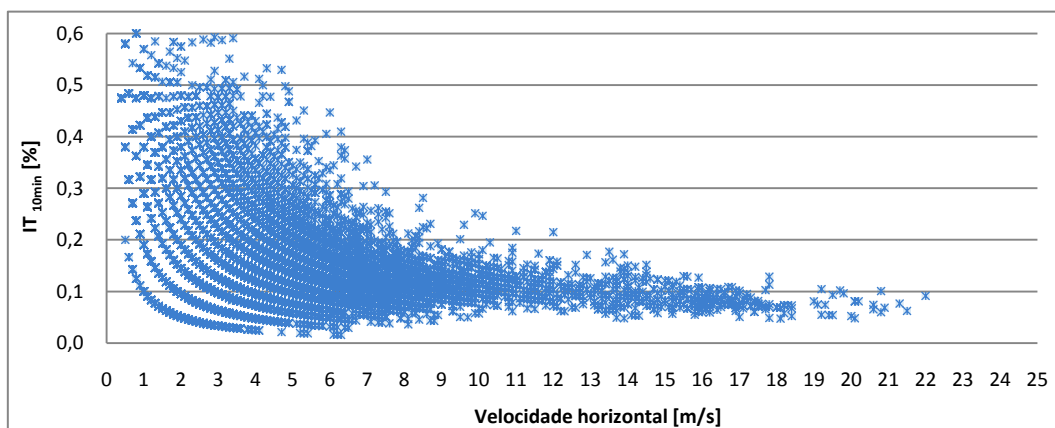


Figura 7.11 - Intensidade de turbulência para dados do Campo1

A intensidade de turbulência global pode ser vista na Figura 7.11. Para valores acima dos 3 m/s, o valor médio de turbulência fixa-se nos 15 pontos percentuais e tende a descer dos 10% para os valores de velocidade mais elevados. De referir que as escala de velocidades utilizada nos gráficos dos dados de ambiente rural é diferente daquela que se utilizou nos dados recolhidos no DEMec. Neste último, as velocidades médias nunca ultrapassaram os 10 m/s, pelo que não se justificava uma escala acima desse valor.

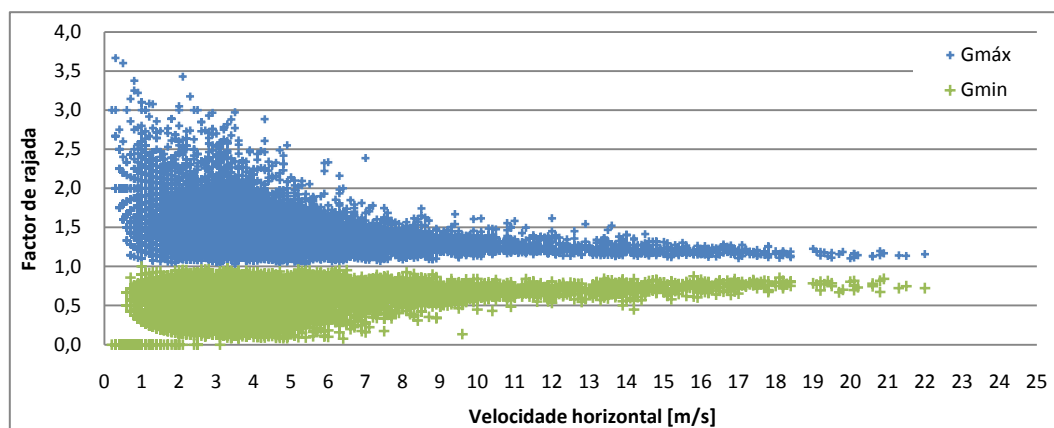


Figura 7.12 - Factores de rajada para dados do Campo1

Os factores de rajada máxima e mínima apresentam valores elevados para as velocidades mais baixas. A máxima tende a situar-se abaixo dos 1,5 para velocidade elevadas; já a mínima tende a estabilizar acima dos 0,5.

O padrão de velocidade ao longo das 24h do dia revela-se pouco acentuado, com a amplitude entre a velocidade máxima e mínima de aproximadamente 3 m/s como se pode ver na Figura 7.13.

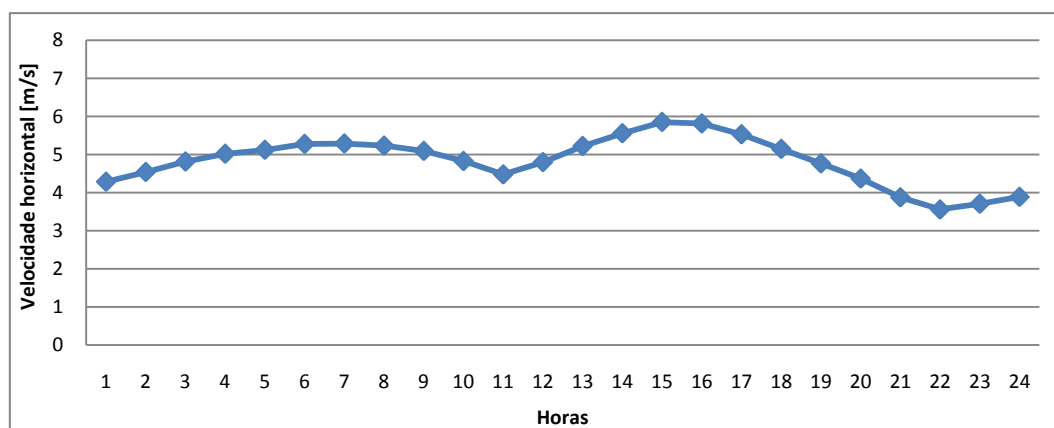


Figura 7.13 - Padrão diário do vento para o Campo1

O histograma de velocidades (Figura 7.14) é consideravelmente diferente daquele que foi apresentado para os dados de ambiente urbano. Desta feita, a aproximação à distribuição de Weibull mais representativa das ocorrências, tem como valores do factor

de escala e do factor de forma, 5,2 m/s e 1,44, respectivamente. Intervalos com valores de velocidade média entre os 3 e 4 m/s são os mais frequentes.

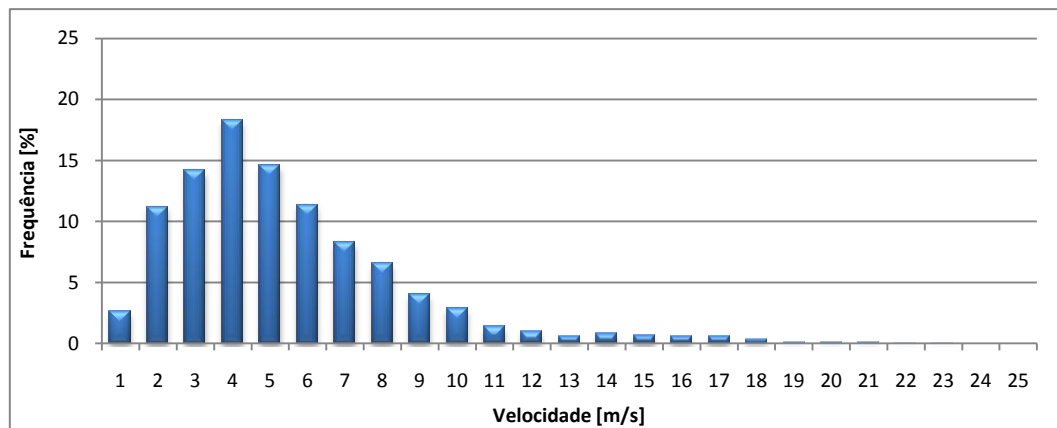


Figura 7.14 - Histograma de velocidades para dados do Campo1

Os resultados aprestados até agora revelam algumas diferenças interessantes entre os dois locais. Na tabela 7.1 faz-se um resumo das diferenças mais relevantes, que dizem respeito, sobretudo, à intensidade do recurso e da turbulência.

Tabela 7.1 - Resumo dos resultados para anemometria convencional

Resultados	DEMec	Campo1
V_{med} [m/s]	2,9	4,9
IT_{10min} [%]	29,4	18,1
$IT_{(v > 3 \text{ m/s})}$ [%]	27,4	15,4
G_{max}	1,8	1,46
G_{min}	0,41	0,58

Os valores apresentados na Tabela 7.1 mostram claramente que a intensidade de vento em ambiente urbano é consideravelmente menor do que aquela que se encontra em ambiente rural, com os valores médios da velocidade a evidenciar claramente isso mesmo. Por sua vez, as intensidades de turbulência, tanto a global, como a respeitante a velocidade maiores do que 3 m/s, apresentam valores significativamente maiores para o ambiente urbano. O limite teórico de turbulência para instalação de aerogeradores, de acordo com as normas actuais, é de 18%, valor este que é largamente ultrapassado quando se trata de dados de ambiente urbano. Os factores de rajada, por sua vez, vêm confirmar a menor estacionariedade do vento na cobertura do DEMec.

7.2 Anemometria ultra-sónica

Procurou-se, com o recurso à anemometria ultra-sónica, contribuir para a caracterização do vento na cobertura de edifícios. Para isso, estes dispositivos foram colocados em diferentes locais da cobertura do edifício do DEMec, por forma a se conseguirem leituras das características do vento em diversos pontos. Os locais correspondentes a cada localização dos sónicos são chamados de geometrias e estão convenientemente definidos em anexo.

7.2.1 Geometria 1

SAAS01 g1

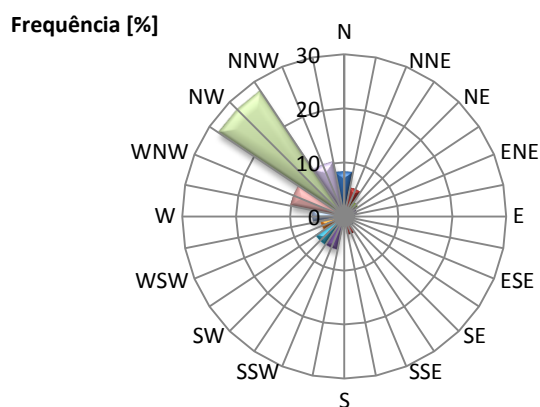


Figura 7.15 - Rosa-dos-ventos do SAAS01 entre 14 e 20 de Maio

Durante o período correspondente a esta geometria, a direcção preferencial do vento foi Noroeste com uma frequência de 27,8%. Os sectores 14 e 16 apresentam uma frequência de 9,9 e 10,2% respectivamente perfazendo-se nestes três sectores 47,9% do total de ocorrências no referido período de tempo.

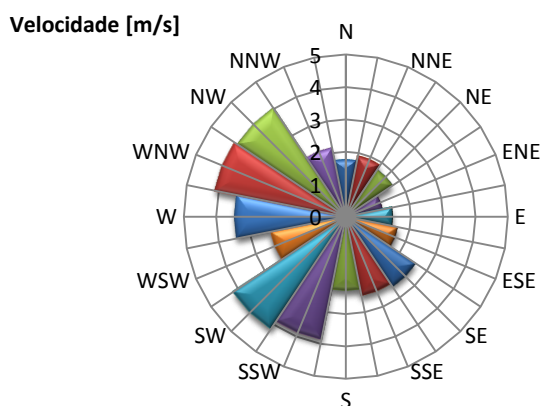


Figura 7.16 - Rosa das velocidades para SAAS01 para geometria g1

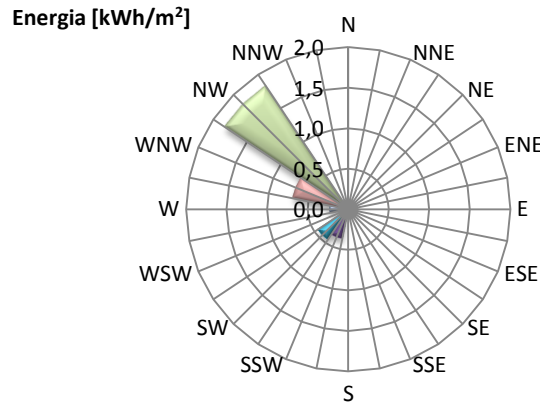


Figura 7.17 - Rosa da energia para SAAS01 geometria g1

Ao intervalo analisado correspondem 1007 ocorrências sendo a velocidade média horizontal de 3,09 m/s. A intensidade de turbulência média ronda os 31,7%; para velocidades acima dos 3 m/s desce ligeiramente para os 31,3% como se pode ver na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Resumo dos dados do SAAS01 para a geometria g1

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	1007	
Disponibilidade		100.00	[%]
V_{total}		3.15	[m/s]
$V_{horizontal}$		3.09	[m/s]
Direcção preferencial		309.4	[°]
TI		31.72	[%]
Gmax		2.06	
Gmin		0.12	
Inclinação		7.31	[%]
N.Ocorrências	$V_h > 3 \text{ m/s}$	48.16	[%]
TI	$(V > 3 \text{ m/s})$	31.33	[%]
TIu	$(V > 3 \text{ m/s})$	32.23	[%]
sv/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.84	[%]
sw/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.53	[%]
Gmax	$(V > 3 \text{ m/s})$	2.04	
Gmin	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.11	
Inclinação	$(V > 3 \text{ m/s})$	2.91	[%]
Disponibilidade	$10 \leq V_h < 25 \text{ m/s}$	0.00	[%]
TI	$(10 \leq V < 25 \text{ m/s})$	-	[%]

Os factores de rajada máxima (G_{max}) e mínima (G_{min}), o primeiro entre 2,5 e 1,5 e o segundo entre 0 e 0,5 vêm evidenciar a elevada variabilidade do escoamento atmosférico em ambiente urbano. Grosso modo, para cada intervalo de 10 minutos ocorre uma rajada com uma velocidade igual ao dobro da velocidade média desse mesmo intervalo, e uma rajada mínima com uma velocidade dez vezes mais baixa que a média. Na Figura 7.18 podem ver-se os gráficos da intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento.

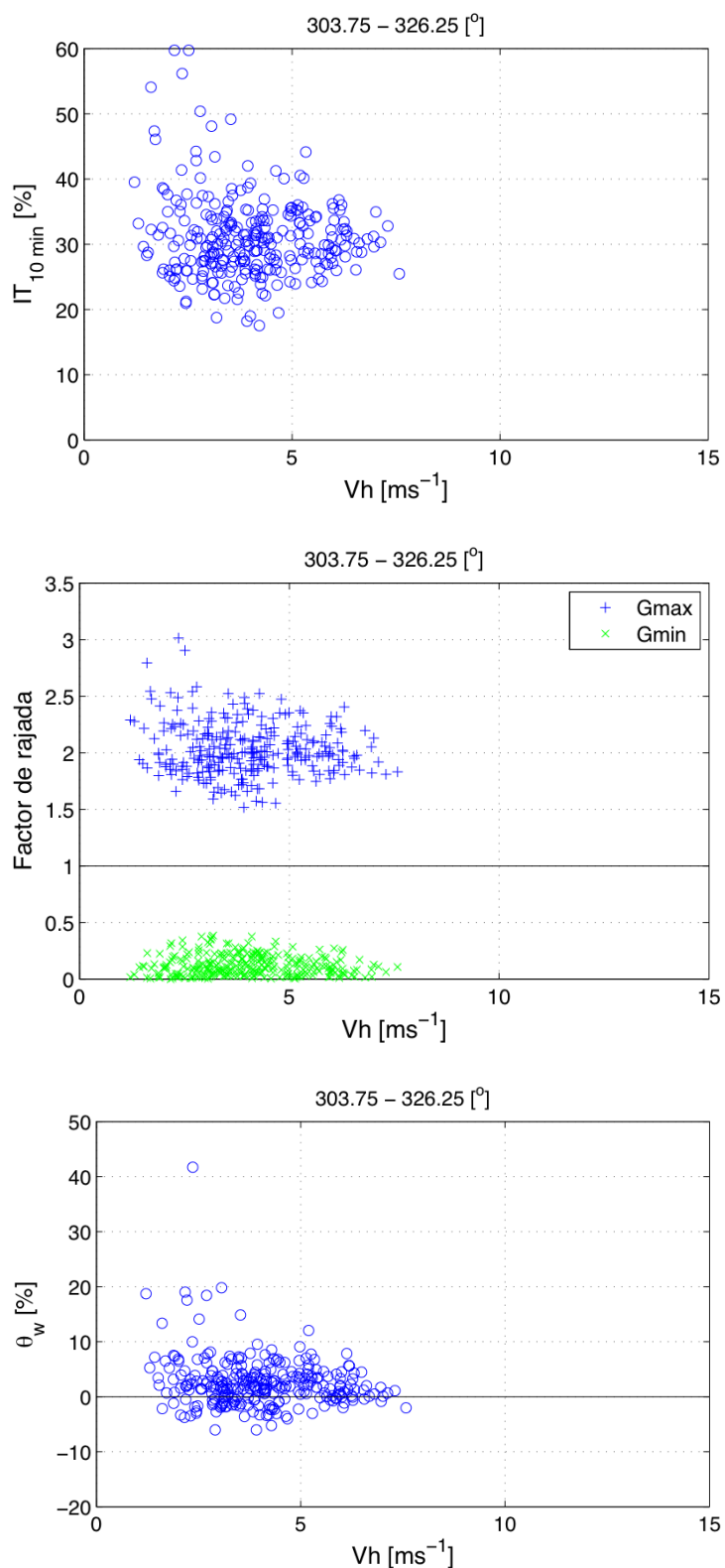


Figura 7.18 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento no sector 15 para dados do SAAS01 na geometria g1

A inclinação do escoamento situa-se entre os 10 e -5% e para velocidades horizontais acima dos 3 m/s apresenta um valor médio de 2,91%, o qual é bastante aceitável para a utilização de aerogeradores.

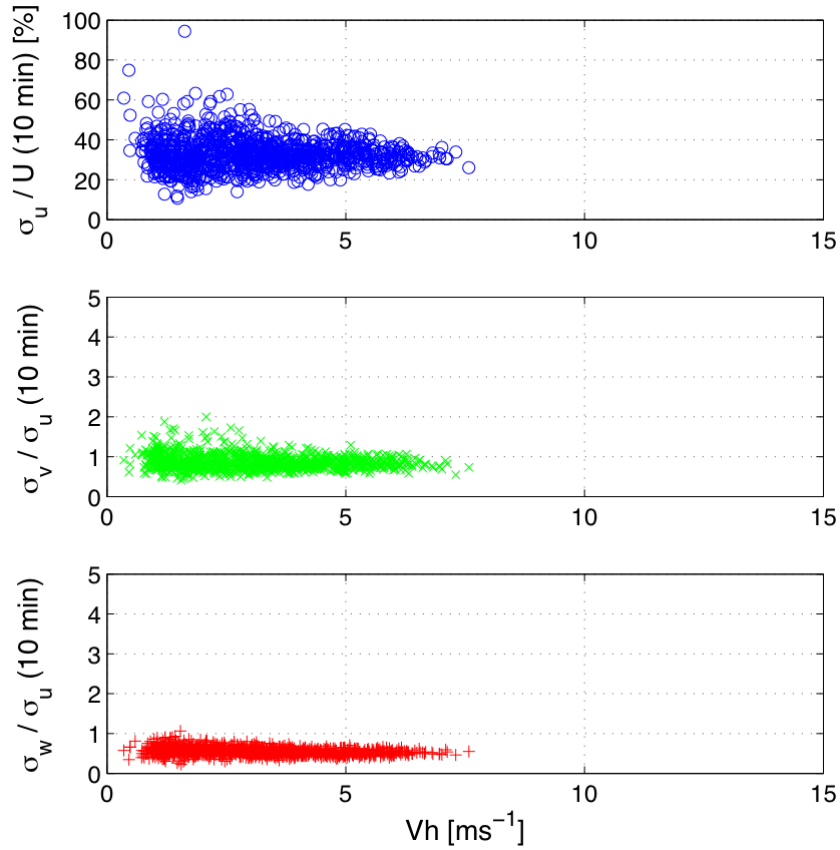


Figura 7.19 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS01 na geometria g1

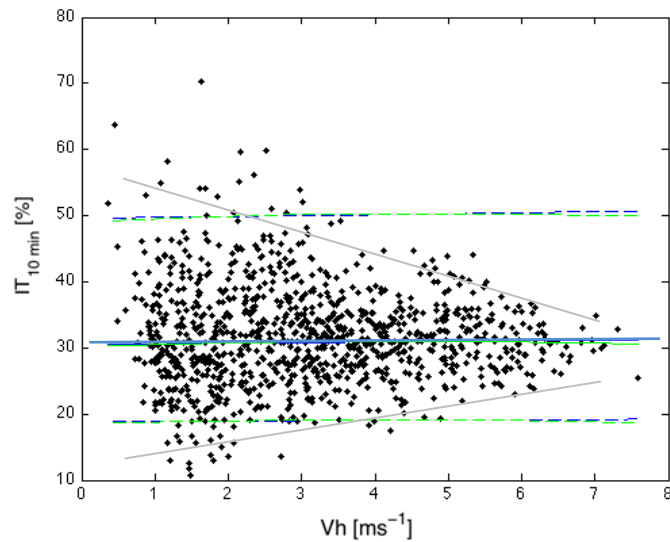


Figura 7.20 - Dispersão dos valores da turbulência global para dados do SAAS01 na geometria g1

A Figura 7.19 ilustra a componente longitudinal, lateral e vertical da turbulência. A primeira apresenta valores elevados, com uma densidade de valores muito elevada entre os 20 e 40%. A componente lateral, $\frac{\sigma_v}{\sigma_u}$, tem uma grandeza equivalente à longitudinal, que tende a diminuir com o aumento da velocidade. A terceira componente ronda os 50% quando comparada com a primeira. A turbulência global compreende-se em valores entre

20 e 50%, valores muito elevados para instalação de aerogeradores. As linhas cinzentas têm como objectivo reforçar a tendência da diminuição da turbulência à medida que a velocidade aumenta. Esta tendência da diminuição da turbulência está inerente ao modelo utilizado. Para uma determinada flutuação dos valores da velocidade, $\sigma(V_h)$, a diminuição da velocidade média para o intervalo, $\bar{U}$, leva a um aumento da intensidade de turbulência, IT_{10min} (ver equação Eq.13). Resultados sectoriais sobre este anemómetro nesta geometria podem ser encontrados em anexo.

SAAS02 g1

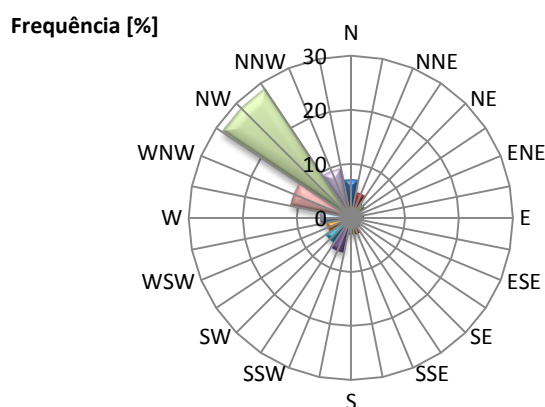


Figura 7.21 - Rosa-dos-ventos do SAAS02 entre 14 e 20 de Maio

No anemómetro sónico 2, o sector com mais ocorrências é também o 15° (NW). Por comparação directa com a Figura 7.15 e com a análise dos dados do anemómetro de copos e sensor de direcção em período simultâneo verificou-se uma proximidade muito grande entre as direcções das ocorrências nos três aparelhos.

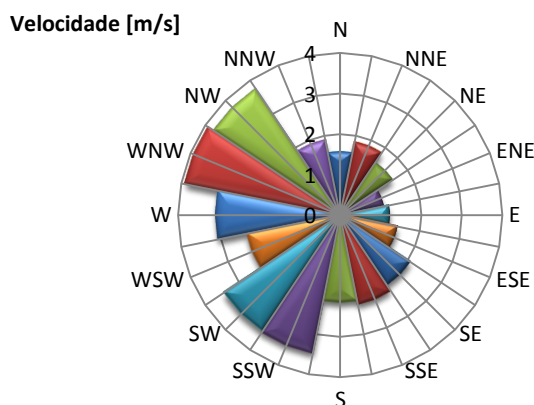


Figura 7.22 - Rosa das velocidades para SAA02 na geometria g1

Os sectores NW e WNW são aqueles que apresentam a velocidade média mais elevada como se pode constatar na Figura 7.22. O facto de serem também os sectores com maior número de ocorrências leva-os a perfazer 70% do total de energia disponível durante o período de medições (Figura 7.23).

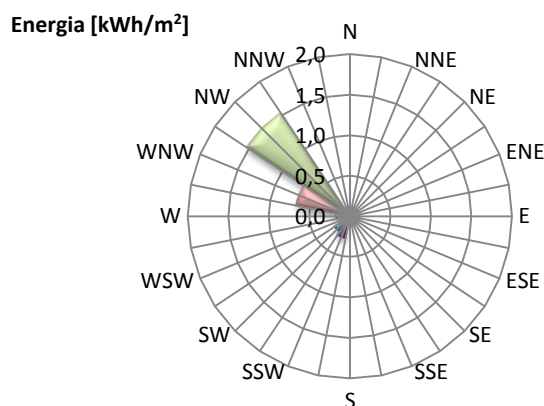


Figura 7.23 - Rosa da energia para SAAS02 na geometria g1

Para valores de velocidade maiores que 3 m/s a turbulência é de 34%, 2,27% mais elevado do que no SAAS01. Em qualquer um dos dispositivos não é registada qualquer ocorrência de velocidade do vento acima dos 10 m/s.

Tabela 7.3 - Resumo dos dados do SAAS02 na geometria g1

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	1006	
Disponibilidade		100.00	[%]
V_{total}		2.92	[m/s]
$V_{horizontal}$		2.87	[m/s]
Direcção preferencial		305.9	[°]
TI		35.01	[%]
Gmax		2.21	
Gmin		0.07	
Inclinação		6.98	[%]
N.Ocorrências	$V_h > 3\text{m/s}$	42.74	[%]
TI	$(V > 3\text{m/s})$	34.01	[%]
Tlu	$(V > 3\text{m/s})$	35.03	[%]
sv/su	$(V > 3\text{m/s})$	0.83	[%]
sw/su	$(V > 3\text{m/s})$	0.48	[%]
Gmax	$(V > 3\text{m/s})$	2.17	
Gmin	$(V > 3\text{m/s})$	0.08	
Inclinação	$(V > 3\text{m/s})$	3.73	[%]
Disponibilidade	$10 \leq V_h < 25\text{ m/s}$	0.00	[%]
TI	$(10 \leq V < 25\text{ m/s})$	-	[%]

Na Figura 7.24 mostram-se os gráficos de intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector com maior número de ocorrências. Os valores de turbulência estão constantemente acima dos 20 pontos percentuais. Os factores de rajada apresentam valores elevados em ambos os casos. Por sua vez, a inclinação do escoamento mostra, tipicamente, valores positivos. Para velocidades do vento que possibilitam aproveitamento energético, o seu valor médio ronda os 3,7%. Na Figura 7.24 pode ver-se a dispersão dos valores médios para intervalos de 10 minutos.

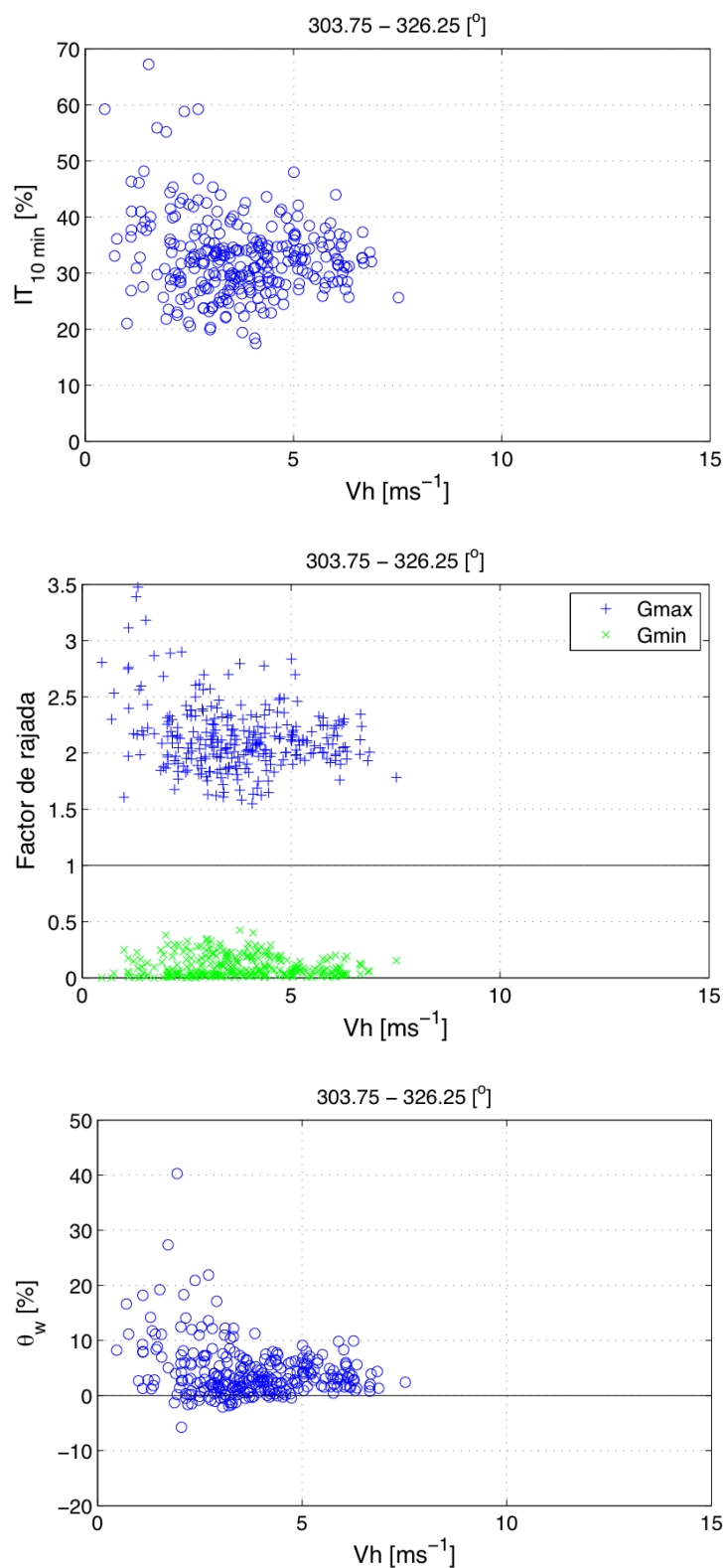


Figura 7.24 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 15 para os dados do SAAS02 na geometria g1

Nas Figuras 7.25 e 7.26 é bem perceptível a gama de velocidades coberta durante as medições nesta geometria, sendo que a maioria dos registos se encontra entre 1 e 6 m/s.

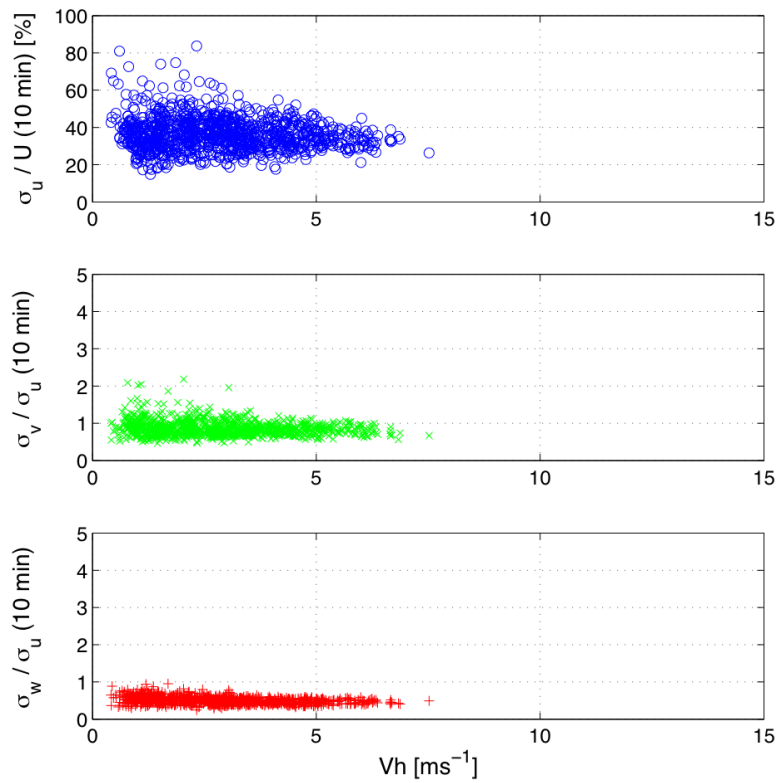


Figura 7.25 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS02 na geometria g1

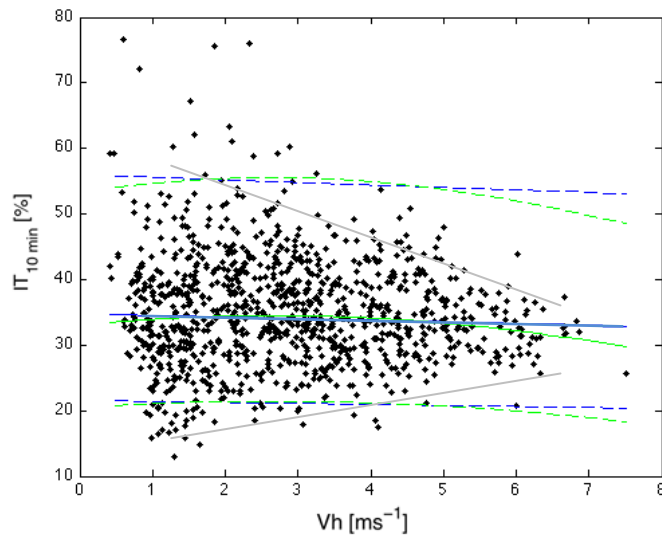


Figura 7.26 - Dispersão dos valores de turbulência em função da velocidade do vento para SAAS02 geometria g1

A intensidade de turbulência longitudinal (Figura 7.25) apresenta valores elevados, quase sempre acima de 20% e em casos extremos acima dos 60% (embora a baixas velocidades). A turbulência lateral está aproximadamente na ordem de grandeza da longitudinal; já a vertical apresenta novamente valores na ordem dos 50% relativamente à primeira.

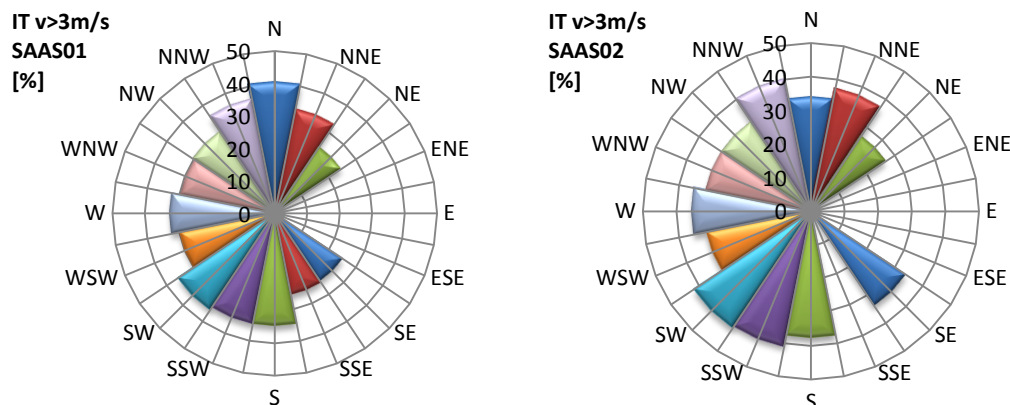


Figura 7.27 - Rosa de intensidade de turbulência para velocidade horizontal superior a 3 m/s para SAAS01 e SAAS02 na geometria g1

A Figura 7.27 permite constatar que o anemómetro mais afastado do topo de edifício, SAAS01, apresenta valores de turbulência mais baixos do que o anemómetro mais próximo da cobertura. As perturbações introduzidas ao escoamento pelos diversos pormenores do edifício levam ao desenvolvimento de camada limite com elevados índices de turbulência.

Curiosamente, ambos os aparelhos registam inclinações acentuadas do escoamento entre sectores Norte (1) e Sul (9), excluindo o sector Este (5) (Figura 7.28). Entre os sectores 9 e 16 as inclinações são bastante mais baixas do que nos referidos anteriormente. Para aos aerogeradores tradicionais utiliza-se como valor limite de inclinação os 8 graus. Admite-se porém, que os pequenos aerogeradores para utilização em ambiente urbano consigam superar melhor elevadas inclinações, particularmente os de eixo vertical.

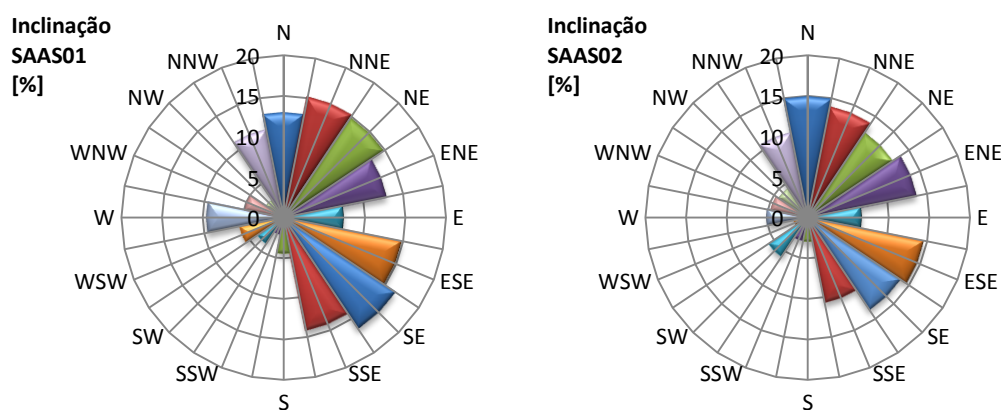


Figura 7.28 - Inclinação média do escoamento nos diferentes sectores para SAAS01 e SAAS02 na geometria g1

A inclinação do escoamento, na Figura 7.28, está apresentada em percentagem. O sector com o valor mais elevado é SE do SAAS01 com $9,3^\circ$ de inclinação correspondentes aos 16,4%. Para o sector Este os valores de inclinação rondam os 4° para ambos os anemómetros.

A baixa inclinação que o escoamento apresentada no sector Este (5) deve-se, provavelmente, ao facto do vento estar perfeitamente alinhado com o edifício, o que leva a que haja uma tendência do vento se escoar paralelamente à face Norte do mesmo.

7.2.2 Geometria 2

A geometria 2 diz respeito à segunda configuração dos anemómetros sónicos. A separação em duas séries deve-se a alguns problemas inesperados com o sistema de aquisição e também à impossibilidade de se processar de uma só vez a informação correspondente ao período entre 22 de Maio e 09 de Junho. Visto que as ocorrências em ambos os períodos são díspares em termos das direcções de vento, vai proceder-se à análise ambas as séries de dados; são elas: g2-Maio e g2-Junho.

SAAS01 g2-Maio

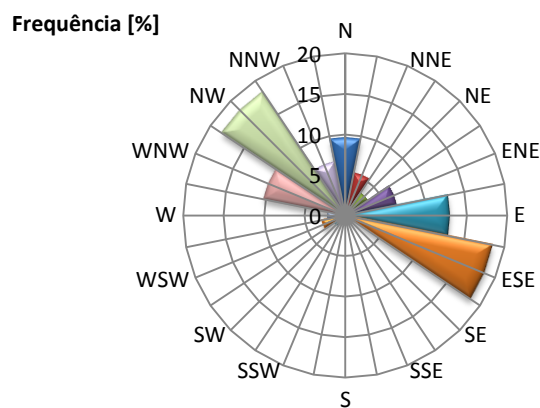


Figura 7.29 - Rosa-dos-ventos do SAAS01 entre 22 e 30 de Maio

Entre 22 e 30 de Maio o SAAS01 registou o maior número de ocorrências nos sectores 6 e 15 com 18,45 e 18,32% respectivamente, perfazendo a sua soma 36,77% do total das ocorrências. As velocidades médias nesses sectores são de 3,84 m/s no 15°, e de 4,52 m/s no 6°.

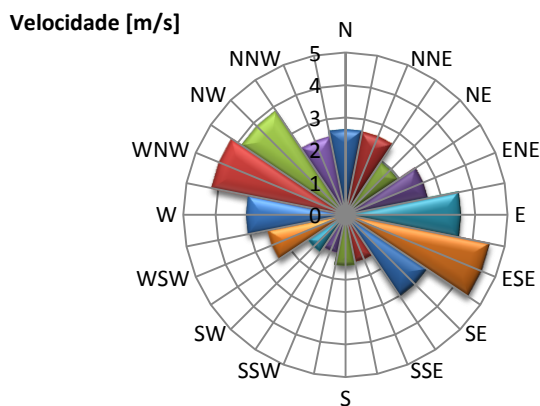


Figura 7.30 - Rosa das velocidades para SAAS01 na geometria g2-Maio

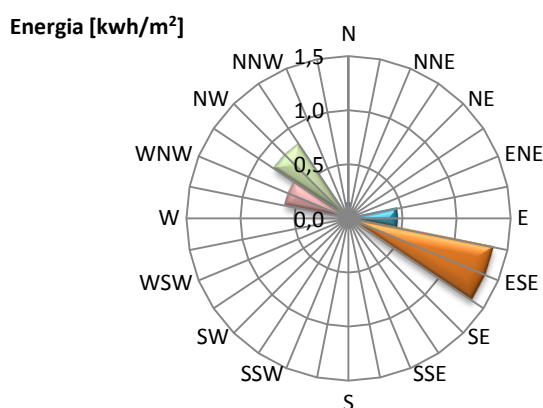


Figura 7.31 - Rosa da energia para SAAS01 na geometria g2-Maio

O sector com maior contribuição energética é o ESE com cerca de 36% do total da energia disponível. Por sua vez, na Tabela 7.4 pode constatar-se que a velocidade horizontal global é de 3,47 m/s e a inclinação média do escoamento de 8 %. A intensidade de turbulência é de 31% e para velocidades acima dos 3 m/s esse valor cai para os 30,4 pontos percentuais. Para velocidades superiores a 10 m/s não existe qualquer ocorrência. Este valor de velocidade foi escolhido pois representa, aproximadamente o valor a partir do qual as turbinas estão a trabalhar próximas da potência nominal. A baixa intensidade do recurso verificada ao longo do período de medições leva a crer que ocorrências com valores de velocidade dessa gama são extremamente raras em ambiente urbano.

Tabela 7.4 - Resumo dos resultados do SAAS01 na geometria g2-Maio

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	786	
Disponibilidade		100.00	[%]
V_{total}		3.47	[m/s]
$V_{horizontal}$		3.40	[m/s]
Direcção preferencial		17.8	[°]
TI		30.98	[%]
Gmax		2.03	
Gmin		0.12	
Inclinação		8.00	[%]
N.Ocorrências	$V_h > 3 \text{ m/s}$	55.09	[%]
TI	$(V > 3 \text{ m/s})$	30.41	[%]
Tlu	$(V > 3 \text{ m/s})$	31.60	[%]
sv/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.87	[%]
sw/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.54	[%]
Gmax	$(V > 3 \text{ m/s})$	2.01	
Gmin	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.10	
Inclinação	$(V > 3 \text{ m/s})$	7.66	[%]
Disponibilidade	$10 \leq V_h < 25 \text{ m/s}$	0.00	[%]
TI	$(10 \leq V < 25 \text{ m/s})$	-	[%]

Durante este período, 55% das ocorrências apresentam valores de velocidade acima dos 3m/s. Para o sector com maior contribuição energética a intensidade de turbulência ronda os 30% para as velocidades mais elevadas. A inclinação, por sua vez, ronda os 10% entre os 5 e 10 m/s.

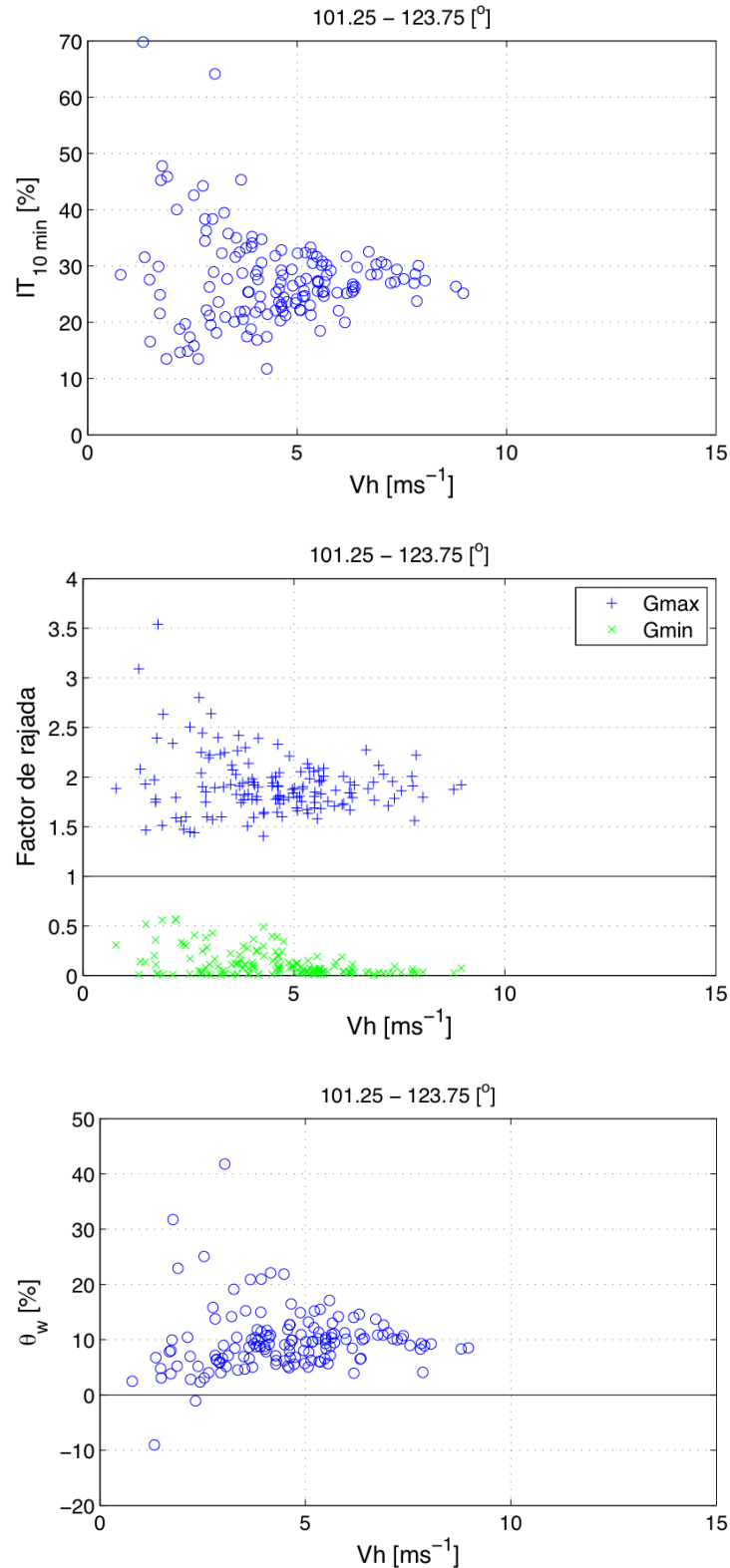


Figura 7.32 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 6 para os dados do SAAS01 na geometria g2-Maio

Os gráficos da Figura 7.33 mostram uma similaridade evidente com os mesmos gráficos para este anemómetro na geometria g1. De referir que ambos os anemómetros somente foram ‘puxados’ 1,5 metros para a zona interior do edifício. Anteriormente estavam à face da parede Norte do mesmo.

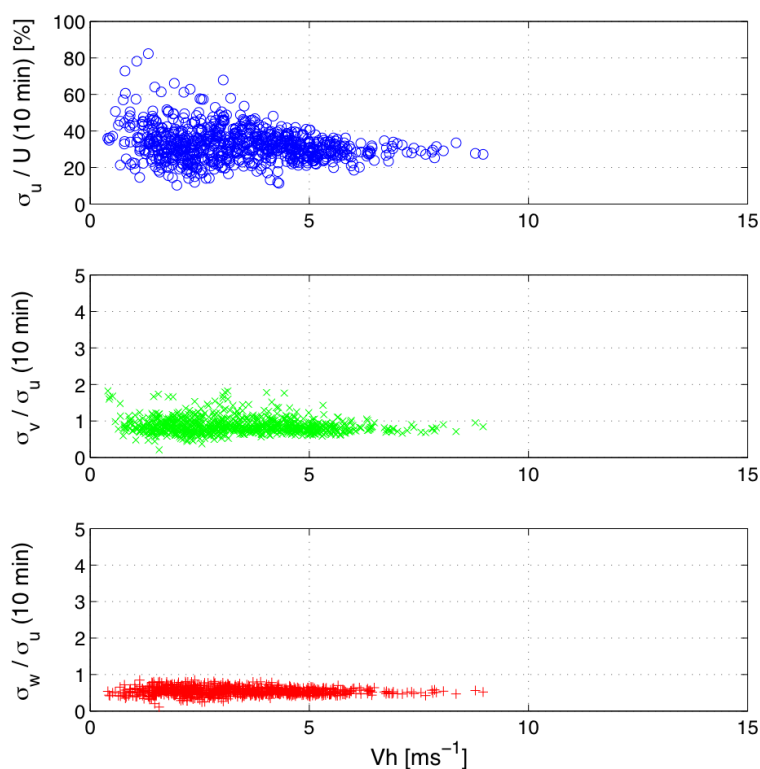


Figura 7.33 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS01 na geometria g2-Maio.

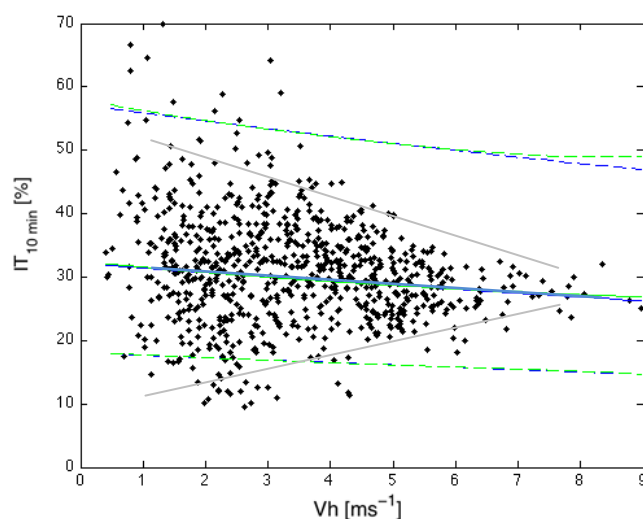


Figura 7.34 - Intensidade de turbulência global para SAAS01 na geometria g2-Maio

A recta de aproximação (a azul) tende a descer dos 30% de turbulência para valores de velocidade acima dos registados.

SAAS02 g2-Maio

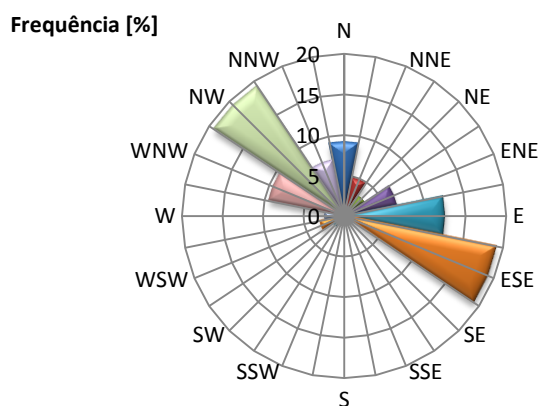


Figura 7.35 - Rosa-dos-ventos para SAAS02 entre 22 e 30 de Maio

A análise sectorial revela que tanto o sector 6, como o sector 15, têm 19,2% das ocorrências. Uma diferença relevante do ponto de vista energético prende-se com o facto de o primeiro apresentar uma velocidade média de 4,24 m/s, enquanto o segundo não ultrapassa os 3,81 m/s.

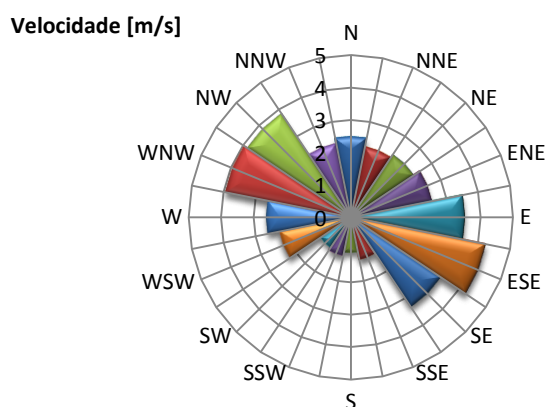


Figura 7.36 - Rosa das velocidades para SAAS02 na geometria g2-Maio

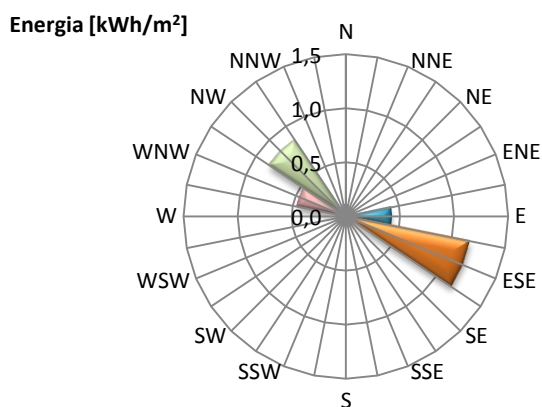


Figura 7.37 - Rosa da energia para SAAS02 na geometria g2-Maio

A velocidade média global do período de medições é de 3,33 m/s sendo a média da componente horizontal da velocidade de 3,28 m/s (Tabela 7.5).

Tabela 7.5 - Estatísticas gerais para SAAS02 na geometria g2-Maio

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	786	
Disponibilidade		100.00	[%]
V_{total}		3.33	[m/s]
$V_{horizontal}$		3.28	[m/s]
Direcção preferencial		18.1	[°]
TI		33.12	[%]
Gmax		2.13	
Gmin		0.08	
Inclinação		6.43	[%]
N.Ocorrências	$V_h > 3 \text{ m/s}$	53.69	[%]
TI	$(V > 3 \text{ m/s})$	32.48	[%]
Tlu	$(V > 3 \text{ m/s})$	34.16	[%]
sv/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.88	[%]
sw/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.46	[%]
Gmax	$(V > 3 \text{ m/s})$	2.09	
Gmin	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.06	
Inclinação	$(V > 3 \text{ m/s})$	6.30	[%]
Disponibilidade	$10 \leq V_h < 25 \text{ m/s}$	0.00	[%]
TI	$(10 \leq V < 25 \text{ m/s})$	-	[%]

Foram registadas 786 ocorrências, das quais 53,7% apresentam um valor de velocidade horizontal superior a 3 m/s. A intensidade de turbulência global é de 33,1% e para $V_h > 3 \text{ m/s}$ é de 32,5%.

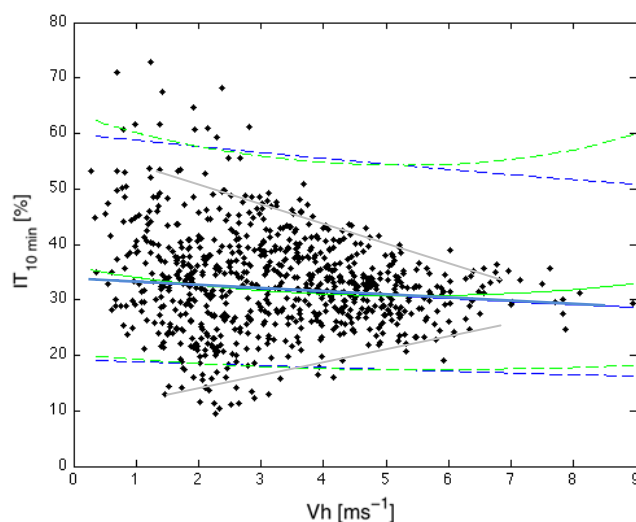


Figura 7.38 - Turbulência global do SAAS02 na geometria g2-Maio

A turbulência global apresenta valores elevados. A recta de aproximação (a azul) situa-se acima dos 30% para valores da baixa velocidade. A Figura 7.39 mostra a

dispersão de valores da turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector com maior contribuição energética, 6. De salientar as baixas inclinações registadas, com uma média de 7,4%, correspondente a 4,3°, aproximadamente. Em anexo apresentam-se os memos gráficos para o sector 15.

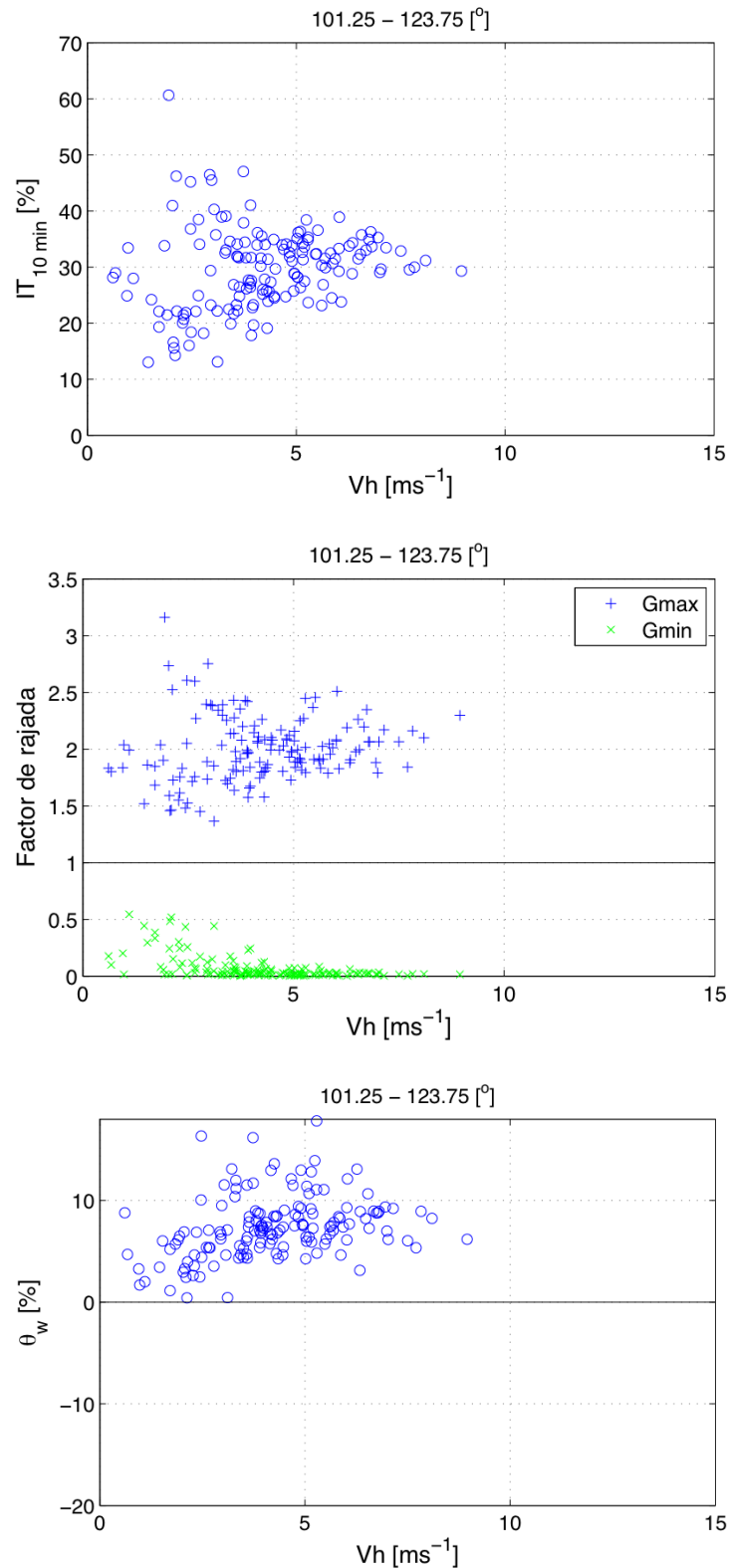


Figura 7.39 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 6 para os dados do SAAS02 na geometria g2-Maio

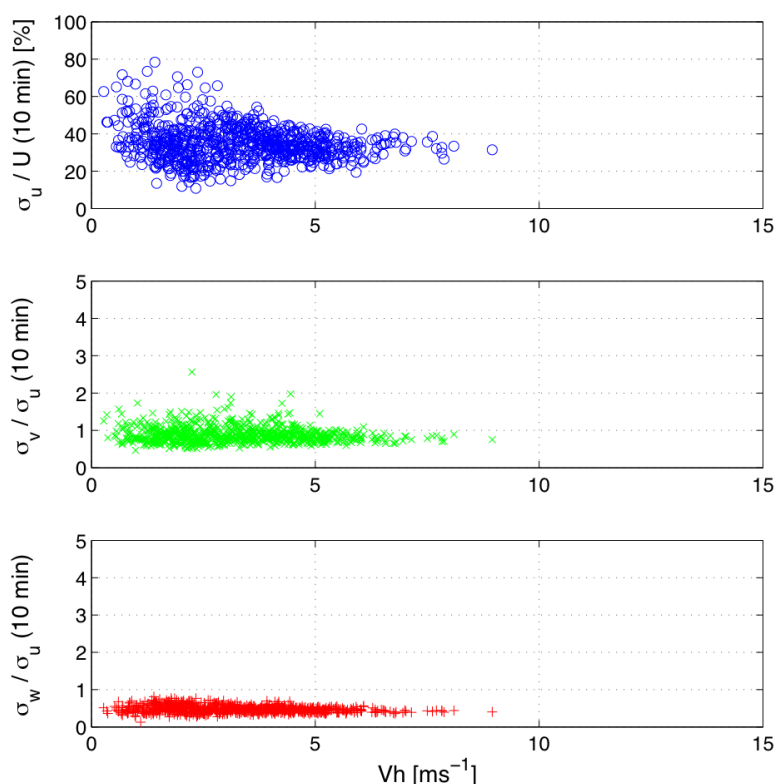


Figura 7.40 - Componentes da turbulência para o SAAS02 na geometria g2-Maio

A intensidade de turbulência longitudinal apresenta valores para maioritariamente entre os 20 e 60%, muito idêntico àqueles que se registaram na geometria g1. As componentes laterais e verticais também revelam uma grande proximidade com os valores da primeira geometria.

Para velocidades que permitem aproveitamento energético a turbulência é de 30,3% para o sector 6 e 30,1% para o sector 15. Outros sectores, como é caso do NNW apresentam turbulências muito elevadas, todavia, a baixa velocidade média registada e o baixo número de ocorrências invalidam uma análise sustentada.

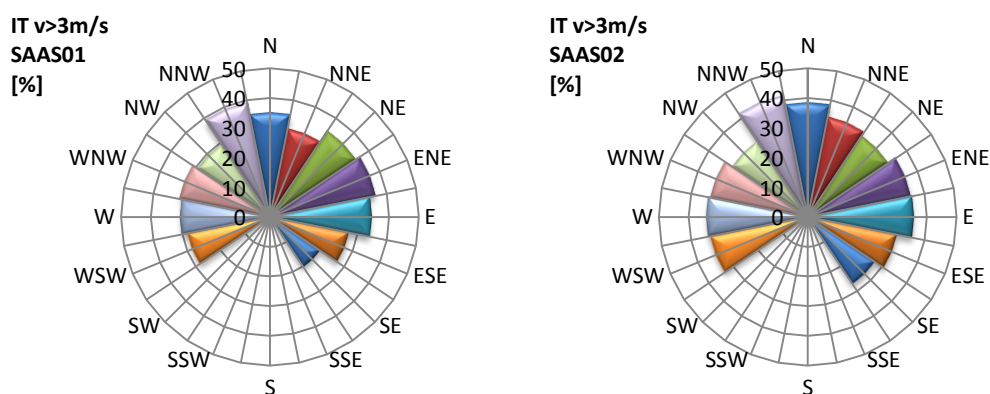


Figura 7.41 - Rosa de turbulências para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Maio

A análise sectorial, remetida para anexo, revela uma aparente inclinação acentuada do escoamento para o sector com maior contribuição energética (ESE). Essa inclinação é de 7,4%, o que se traduz em 4,2° aproximadamente. Já no caso do sector NW, a inclinação média ronda os 1,8°.

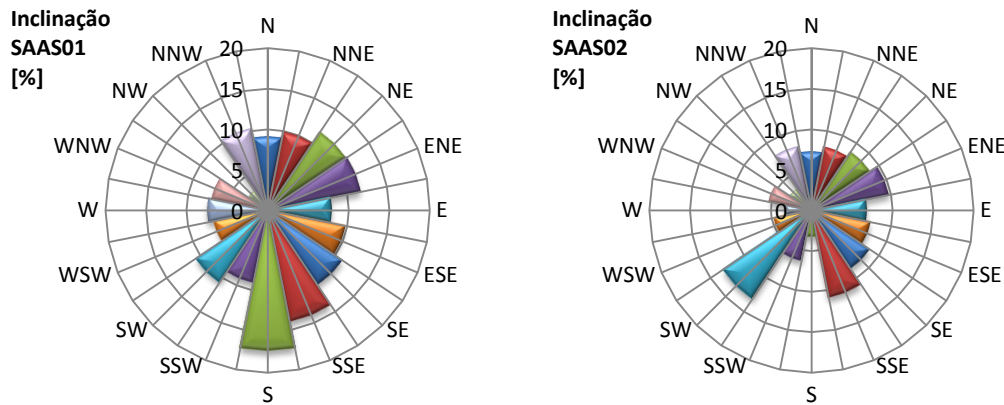


Figura 7.42 - Rosas de inclinação para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Maio

Visto que a velocidade vertical tem uma contribuição muito diminuta na produção de electricidade de um aerogerador, não é de esperar que haja uma vantagem relevante advinda da maior inclinação do escoamento verificada no sector 6.

Tal como aconteceu na geometria g1, também aqui se verifica uma tendência para haver maior turbulência na zona mais próxima da cobertura do edifício (Figura 7.41). Em termos da inclinação do escoamento verifica-se que para o sector Este, tal como aconteceu na geometria g1, há uma tendência para a inclinação ser menor do que dos sectores vizinhos.

As medições efectuadas entre o dia 02 e 09 de Junho diferem das medições de Maio no que respeita às direcções preferenciais do vento. Este facto leva a que se possam analisar características do escoamento para direcções que ainda não foram abordadas.

SAAS01 g2-Junho

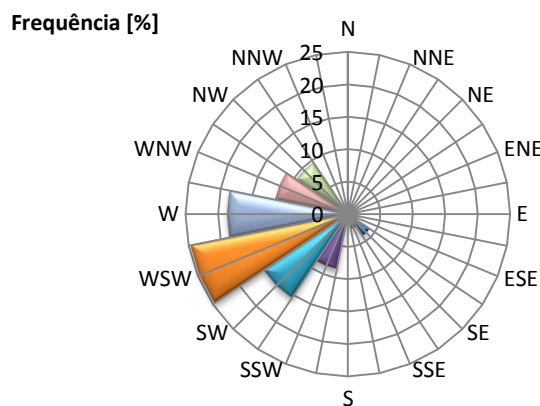


Figura 7.43 - Rosa-dos-ventos do SAAS01 entre 02 e 09 de Junho

O vento é predominantemente do quadrante Oeste, com especial destaque para os sectores 11, 12 e 13 (Figura 7.43). Estes três sectores perfazem um total de 58,6% das ocorrências.

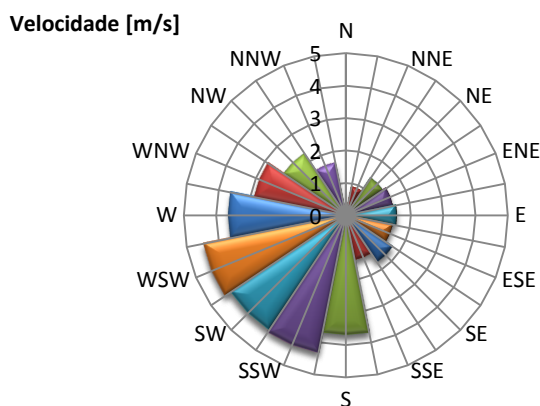


Figura 7.44 - Rosa das velocidades para SAAS01 na geometria g2-Junho

De uma maneira geral, os sectores com maiores velocidades médias são aqueles que apresentam também o maior número de ocorrências.

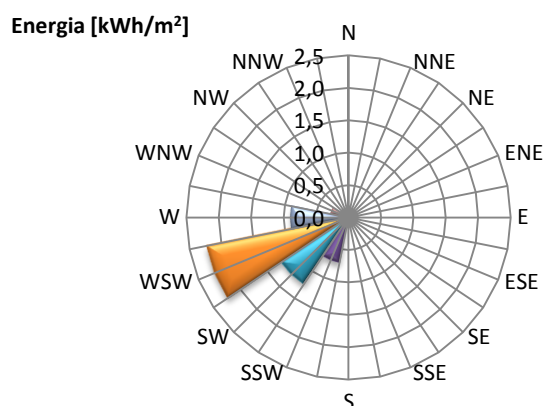


Figura 7.45 - Rosa da energia para SAAS01 na geometria g2-Junho

Os sectores 11, 12 e 13 representam conjuntamente quase 80% do total de energia disponível para este período. De entre eles, destaca-se o sector WSW, que contribui com 40% do total.

Durante o período de recolha de dados a velocidade média global foi de 3,62 m/s. A sua componente horizontal é de 3,56 m/s, a inclinação é de 7 pontos percentuais (aproximadamente 4°) e a turbulência global ronda os 32,5%. Das 1004 ocorrências registadas, 57,8% têm uma velocidade média acima dos 3 m/s, sendo a turbulência igual à global, de 32,5%, e inclinação média igual a 4,85%. Em nenhuma das 1004 ocorrências se verificou uma velocidade acima dos 10 m/s. Na Tabela 7.6 pode encontrar-se um resumo dos resultados.

Tabela 7.6 - Resumo dos dados do SAAS01 na geometria g2-Junho

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	1004	
Disponibilidade		100.00	[%]
V_{total}		3.62	[m/s]
$V_{horizontal}$		3.56	[m/s]
Direcção preferencial		251.4	[°]
TI		32.48	[%]
Gmax		2.05	
Gmin		0.10	
Inclinação		6.99	[%]
N.Ocorrências	$V_h > 3 \text{ m/s}$	57.87	[%]
TI	$(V > 3 \text{ m/s})$	32.50	[%]
Tlu	$(V > 3 \text{ m/s})$	33.69	[%]
sv/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.81	[%]
sw/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.47	[%]
Gmax	$(V > 3 \text{ m/s})$	2.05	
Gmin	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.09	
Inclinação	$(V > 3 \text{ m/s})$	4.85	[%]
Disponibilidade	$10 \leq V_h < 25 \text{ m/s}$	0.00	[%]
TI	$(10 \leq V < 25 \text{ m/s})$	-	[%]

Na Figura 7.46, a recta de ajustamento situa-se constantemente acima dos 30%. Neste gráfico, a tendência para a diminuição da intensidade de turbulência com o aumento de velocidade não é tão evidente. Isto poderá dever-se ao facto do vento ser predominantemente dos sectores 11, 12 e 13, nos quais a orografia que envolve o local das medições é particularmente complexa.

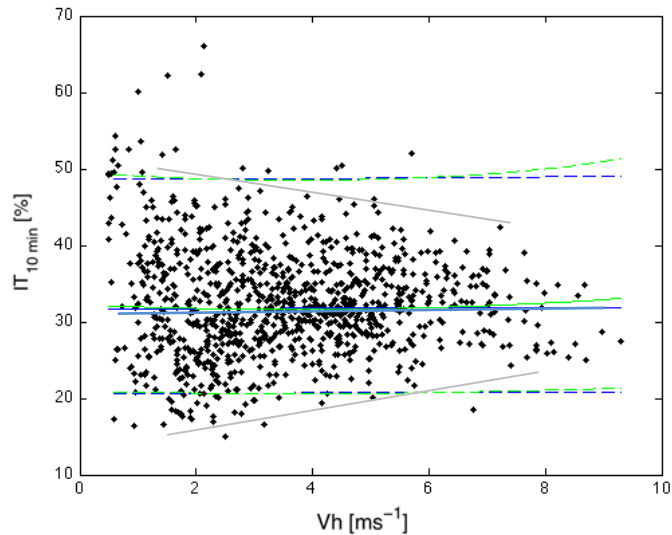


Figura 7.46 - Turbulência global do SAAS01 na geometria g2-Junho

O gráfico da dispersão de pontos para a intensidade de turbulência do sector 12 mostra que para os valores mais altos de velocidade horizontal a turbulência ronda os 30%. O factor de rajada máxima está tipicamente entre 1,5 e 2,5, já a rajada mínima está

sempre abaixo dos 0,5. A inclinação do escoamento, normalmente, está abaixo dos 10% excepto nas ocorrências com menor velocidade média (Figura 7.47).

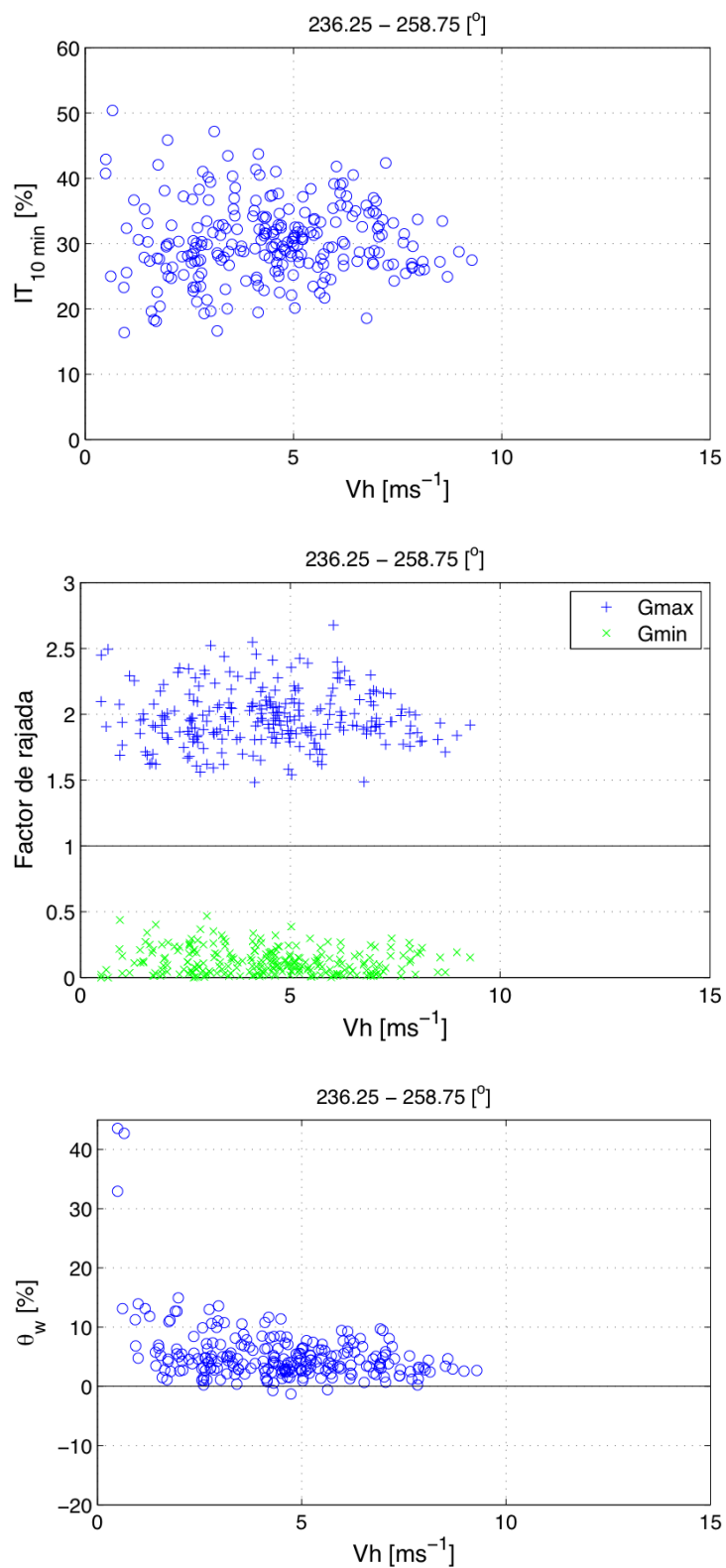


Figura 7.47 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 12 para os dados do SAAS01 na geometria g2-Junho

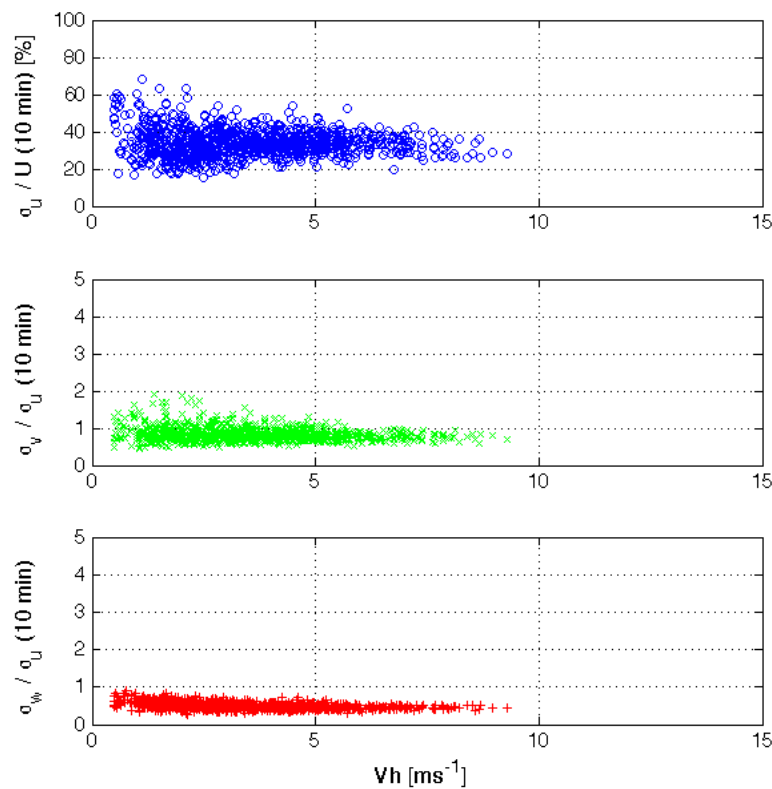


Figura 7.48 - Componentes da intensidade de turbulência para os dados do SAAS01 na geometria g2-Junho

Na figura 7.49 podem ver-se os sectores com maiores ocorrências para o entre 02 e 09 de Junho para o anemómetro sónico mais próximo do edifício. As semelhanças com a rosa-dos-ventos do SAAS01 são bem evidentes.

SAAS02 g2-Junho

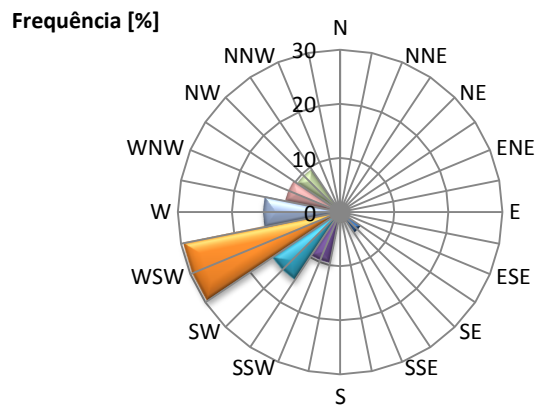


Figura 7.49 - Rosa-dos-ventos do SAAS02 entre 02 e 09 de Junho

O sector com maior número de ocorrências é o 12º com quase 30% do total. O sector 11 e 13 apresentam um número de ocorrências muito semelhante, de 15 e 14%, respectivamente. A velocidade mais elevada foi registada sector com maior número de ocorrências, com 3,85 m/s de média. A Figura 7.50 apresenta as velocidades médias em cada sector para o SAAS02 na geometria g2-Junho.

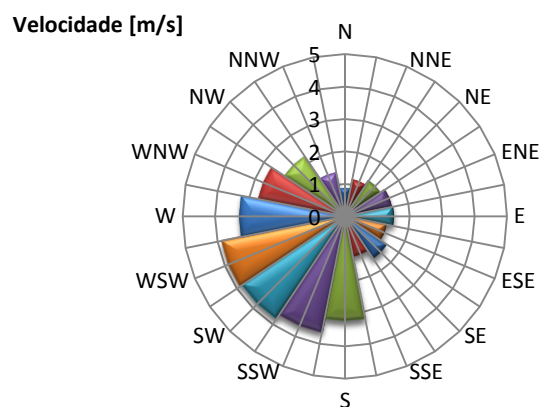


Figura 7.50 - Rosa das velocidades para SAAS02 na geometria g2-Junho

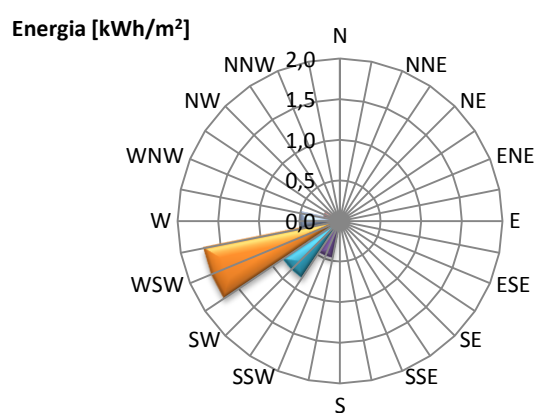


Figura 7.51 - Rosa da energia para a SAAS02 na geometria g2-Junho

O sector 12 prevalece como sendo o mais energético para este período de tempo com 44% do total de energia contida no vento.

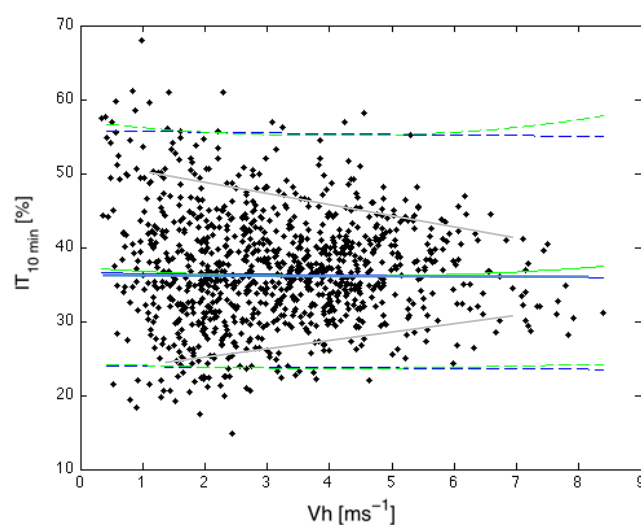


Figura 7.52 - Turbulência global para SAAS02 na geometria g2-Junho

Os gráficos da Figura 7.53 mostram a dispersão valores de turbulência, factor de rajada e inclinação para o sector 12.

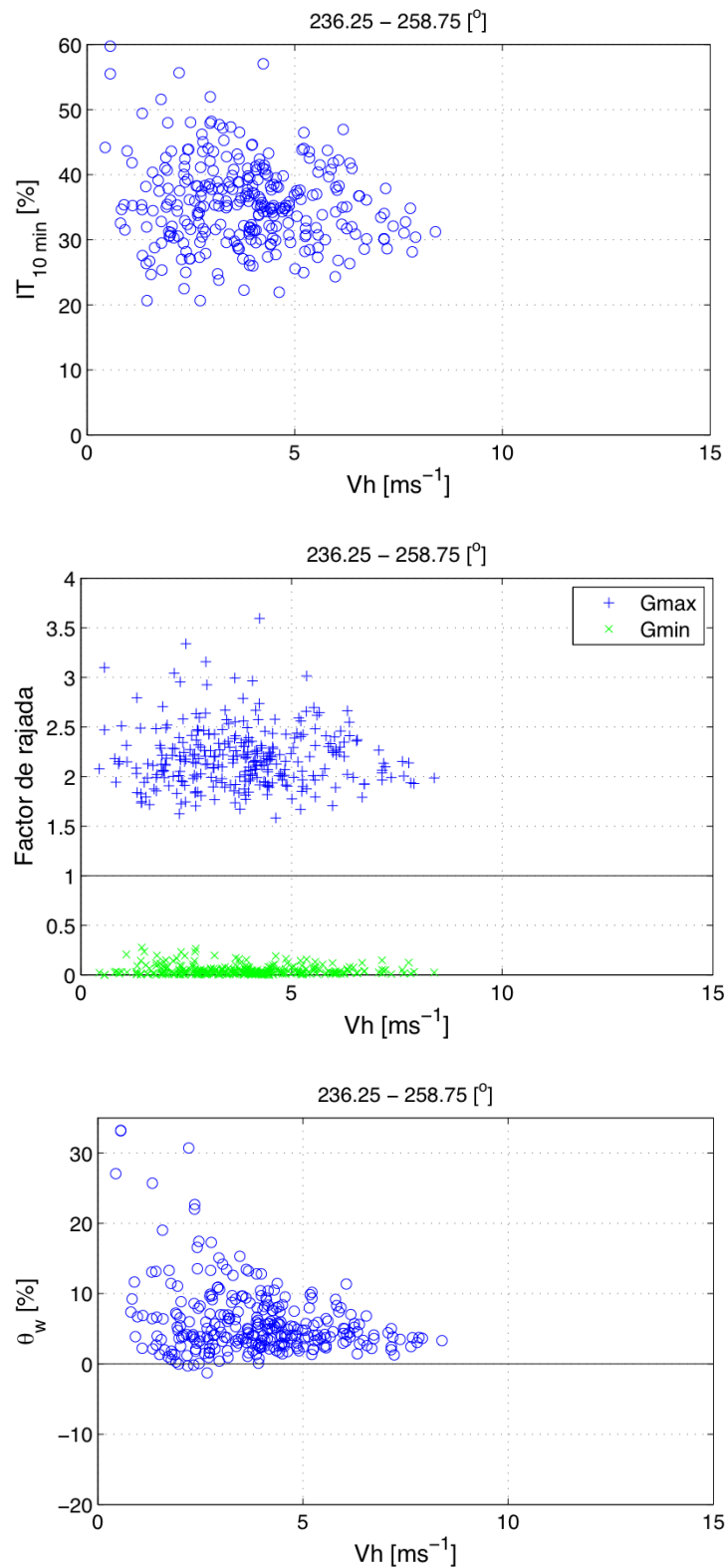


Figura 7.53 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para o sector 12 para os dados do SAAS02 na geometria g2-Junho

A inclinação do escoamento (Figura 7.53) revela algumas ocorrências com valores particularmente elevados para baixas velocidades horizontais.

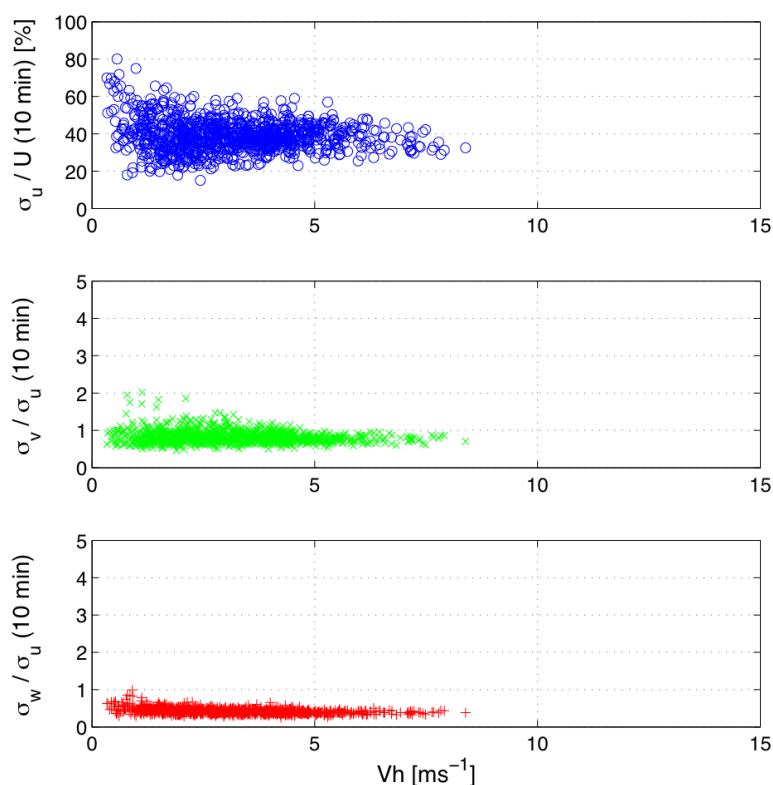


Figura 7.54 - Componentes da turbulência para SAAS02 para geometria g2-Junho

Tabela 7.7 - Resumo dos resultados para o SAAS02 na geometria g2-Junho

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	1002	
Disponibilidade		100.00	[%]
V_{total}		3.24	[m/s]
$V_{horizontal}$		3.19	[m/s]
Direcção preferencial		248.2	[°]
TI		37.11	[%]
Gmax		2.25	
Gmin		0.05	
Inclinação		6.68	[%]
N.Ocorrências	$V_h > 3 \text{ m/s}$	50.9	[%]
TI	$(V > 3 \text{ m/s})$	37.03	[%]
Tlu	$(V > 3 \text{ m/s})$	38.53	[%]
sv/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.8	[%]
sw/su	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.4	[%]
Gmax	$(V > 3 \text{ m/s})$	2.27	
Gmin	$(V > 3 \text{ m/s})$	0.04	
Inclinação	$(V > 3 \text{ m/s})$	5.34	[%]
Disponibilidade	$10 \leq V_h < 25 \text{ m/s}$	0.00	[%]
TI	$(10 \leq V < 25 \text{ m/s})$	-	[%]

O gráfico das componentes da turbulência revela valores particularmente elevados na componente longitudinal. A velocidade média horizontal ao longo deste período rondou os 3,2 m/s (Tabela 7.7). Cerca de 51% das ocorrências têm uma velocidade média acima dos 3m/s. A turbulência global média fixa-se nos 37,1%. A inclinação média total ronda os 6,7%, o que equivale a 3,8°.

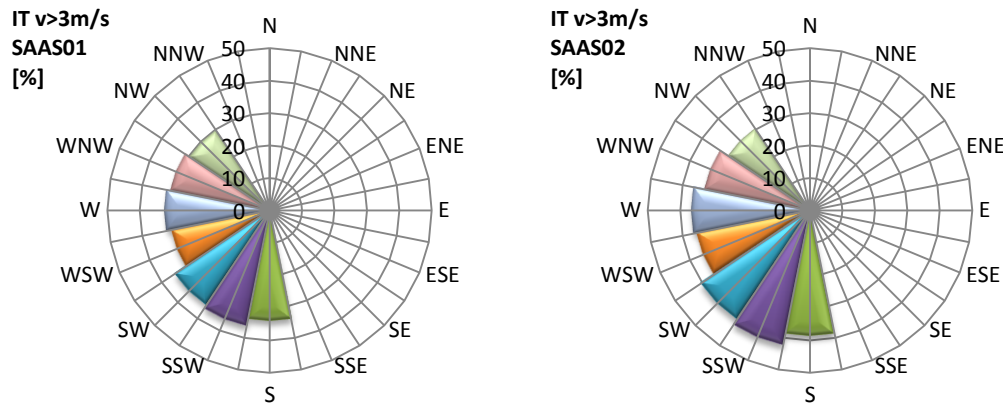


Figura 7.55 - Intensidade de turbulência para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Junho

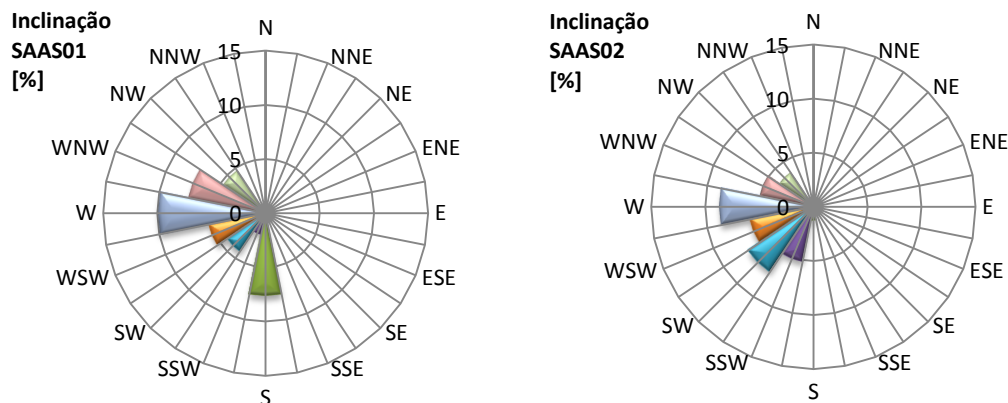


Figura 7.56 - Inclinação do escoamento para SAAS01 e SAAS02 na geometria g2-Junho

Os valores de turbulência para velocidades acima dos 3 m/s são mais elevados no SAAS02 em todos os sectores. O valor mais elevado é de 42,4 pontos percentuais e ocorre no sector SSW. Quanto à inclinação do escoamento, ambos os sónicos apresentam valores particularmente elevados para o sector Oeste. Para os sectores com maior velocidade média horizontal, verifica-se que as inclinações do escoamento são menos acentuadas. Na Figura 7.56 foram omitidas as inclinações dos sectores com menos ocorrências pois registavam valores muito elevados mas a sua análise é pouco relevante.

7.2.3 Geometria 3

A seguir são apresentados os valores para a geometria g3. O período de dados simultâneos para esta geometria é o mais curto da campanha, tratando-se apenas de 42 horas de medições.

SAAS01 g3

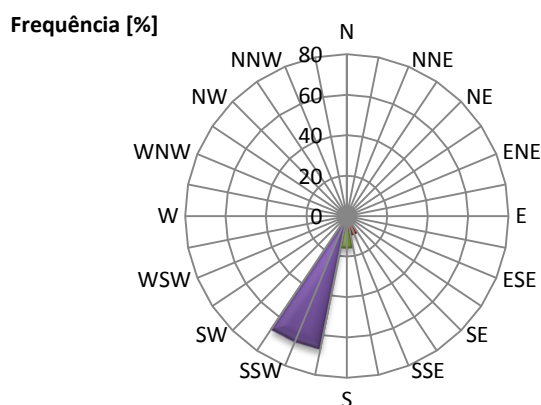


Figura 7.57 - Rosa-dos-ventos para SAAS01 entre 09 e 11 de Junho

O sector SSW perfaz 67% das ocorrências para esta geometria (g3). Este valor deve-se em muito ao curto período considerado. De todos os sectores somente cinco apresentam ocorrências.

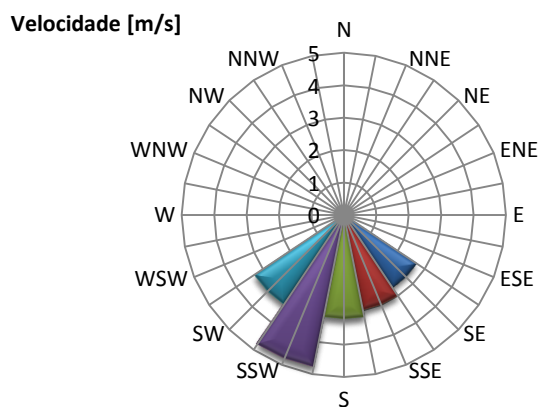


Figura 7.58 - Rosa das velocidades para SAAS01 na geometria g3

A velocidade média do sector 10 é de 4,8 m/s. Este valor de velocidade aliado ao elevado número de ocorrências leva a que o este sector reúna 88% da energia total do vento no período analisado (Figura 7.59).

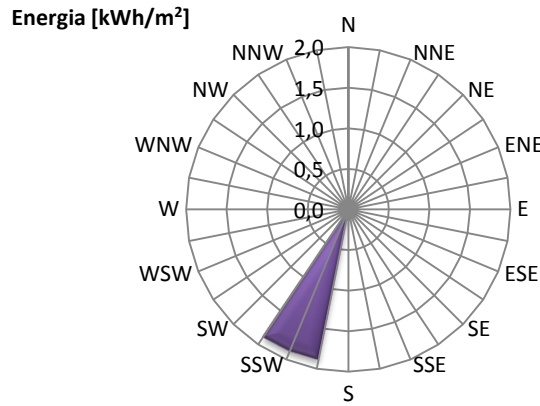


Figura 7.59 - Roda da energia para SAAS01 na geometria g3

A inclinação média é de cerca de 2,8%. Neste período, 82,1% das ocorrências cumpriram o requisito mínimo para que seja possível proceder-se a aproveitamento energético, ou seja, com velocidade superior a 3 m/s. A intensidade turbulência é elevada, ronda os 34,8% e a inclinação fixa-se nos 1,5%.

Tabela 7.8 - Resumo dos resultados do SAAS01 na geometria g3

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	252	
Disponibilidade		100.00	[%]
V _{total}		4.31	[m/s]
V _{horizontal}		4.23	[m/s]
Direcção preferencial		194.29	[°]
TI		34.21	[%]
Gmax		2.27	
Gmin		0.08	
Inclinação		2.79	[%]
N.Ocorrências	Vh>3m/s	82.14	[%]
TI	(V>3m/s)	34.81	[%]
Tlu	(V>3m/s)	35.38	[%]
sv/su	(V>3m/s)	0.80	[%]
sw/su	(V>3m/s)	0.52	[%]
Gmax	(V>3m/s)	2.29	
Gmin	(V>3m/s)	0.08	
Inclinação	(V>3m/s)	1.53	[%]
Disponibilidade	10<=Vh<25 m/s	0.00	[%]
TI	(10<=V<25 m/s)	-	[%]

A inclinação média do escoamento para este período é baixa, cerca de 0.8%. Os gráficos da Figura 7.60 evidenciam que a maioria das ocorrências apresenta intensidade de turbulência entre os 30 e os 40%. Os factores de rajada máxima situam-se entre os 2 e 2.5 e as rajadas mínimas estão sempre abaixo dos 0,3. O baixo valor da inclinação média do resulta da junção de valores positivos e negativos de inclinação. Estes valores estão tipicamente entre os -5 e +5% e sua dispersão pode ser vista no último gráfico da figura anteriormente referida.

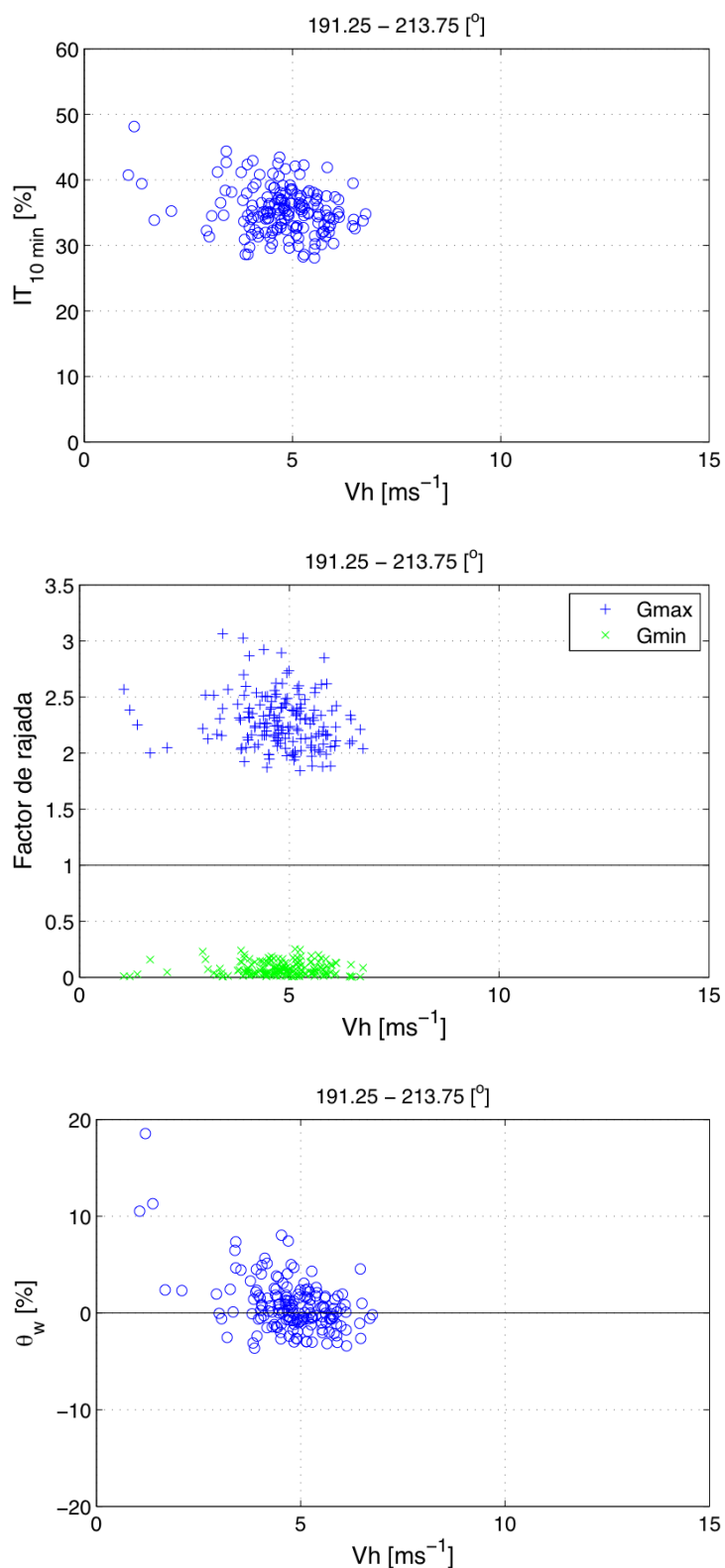


Figura 7.60 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do vento para o SAAS01 na geometria g3

A turbulência global (Figura 7.61) admite rectas de ajustamento pouco convencionais. O curto período de tempo considerado e o baixo número de ocorrências com velocidades baixas levam a tal situação.

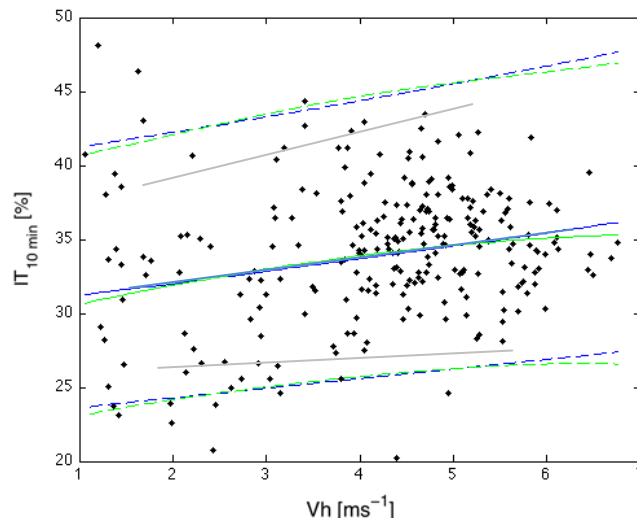


Figura 7.61 - Turbulência global para SAAS01 na geometria g3

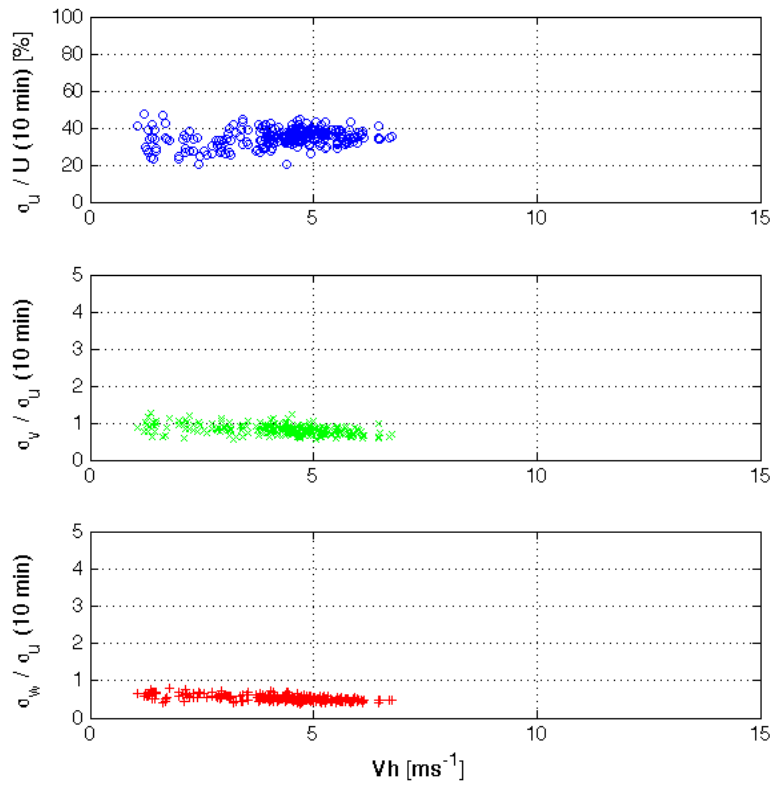


Figura 7.62 - Componentes da turbulência para SAAS01 na geometria g3

A Figura 7.62 mostra com clareza que grande parte das ocorrências está entre os 4 e 6 m/s. O gráfico das diferentes componentes da intensidade revela valores idênticos àqueles que foram obtidos na geometria g1 para gamas de velocidade idênticas. Nessa geometria, o anemómetro sónico1 ocupava a mesma posição que ocupa na geometria actual (g3).

SAAS02 g3

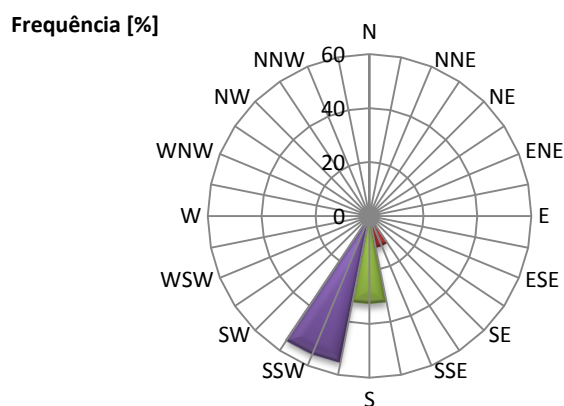


Figura 7.63 - Rosa-dos-ventos para SAAS02 entre 09 e 11 de Junho

Sectorialmente a rosa-dos-ventos do SAAS02 é muito idêntica à do SAAS01, com o sector 10 a conter o maior número de ocorrências (Figura 7.63).

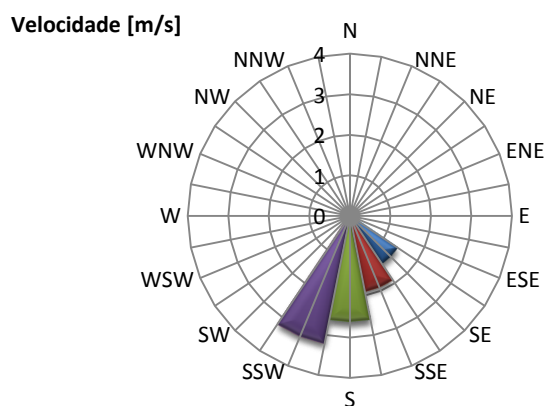


Figura 7.64 - Rosa das velocidades para SAAS02 na geometria g3

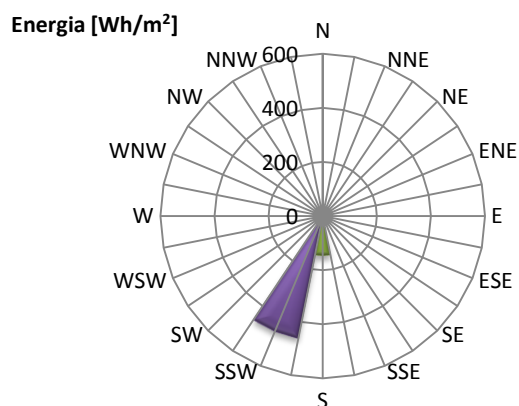


Figura 7.65 - Rosa da energia para SAAS02 na geometria g3

A diferença entre a velocidade é assinalável, no SAAS01, a velocidade média horizontal é de 4.23 m/s, já no SAAS02 este valor desce para os 2.85 m/s.

As elevadas intensidades de turbulência devem-se ao facto do anemómetro sónico 2 estar dentro da bolha de separação que se caracteriza por ser uma região do escoamento com elevadas turbulências e baixas velocidades.

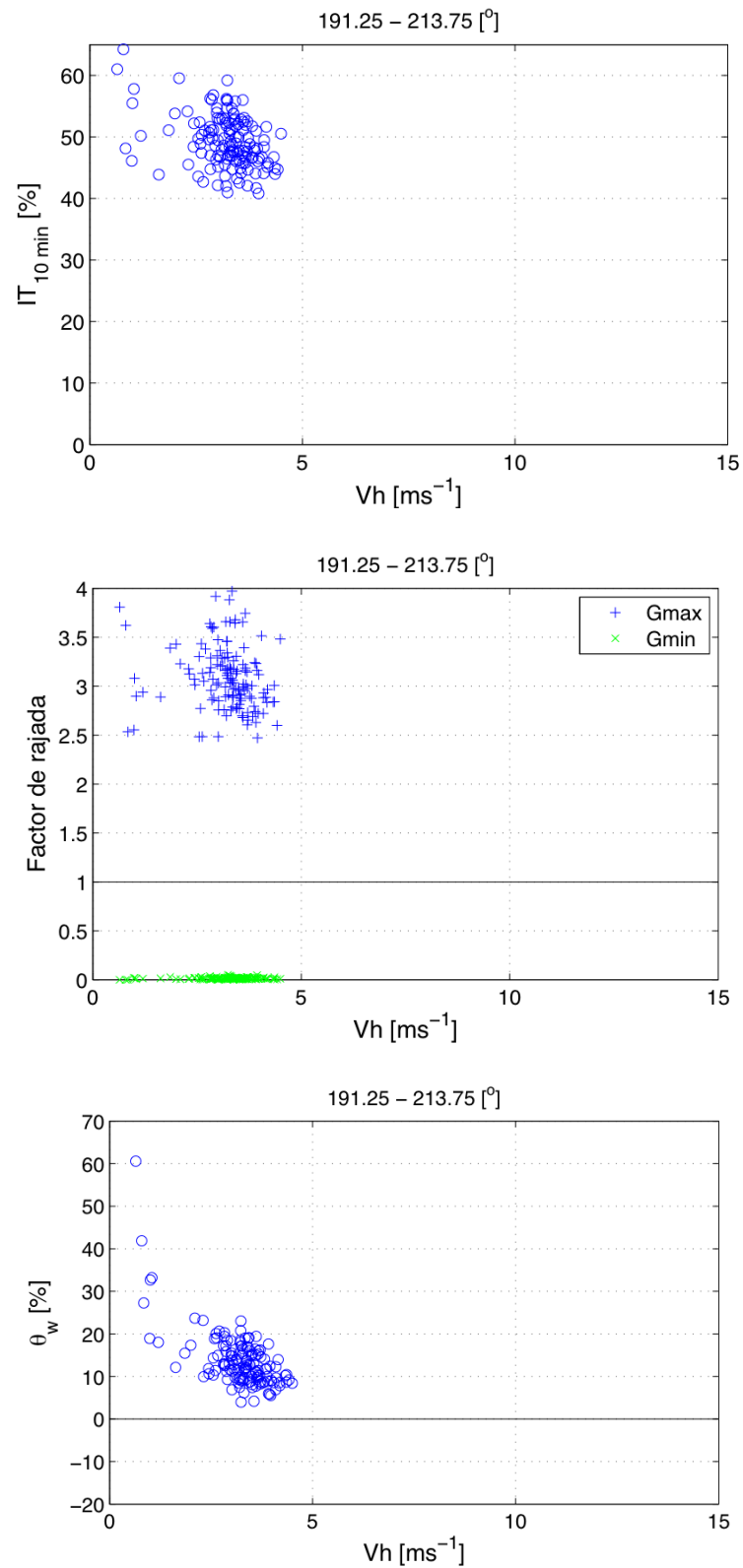


Figura 7.66 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação para SAAS02 na geometria g3

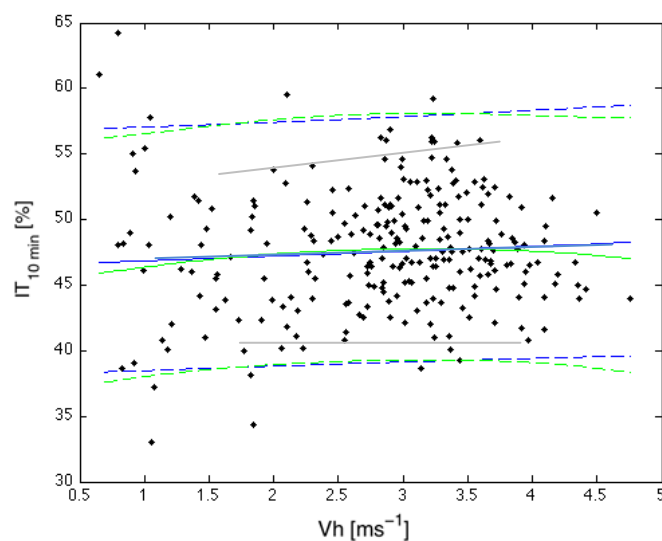


Figura 7.67 - Turbulência para SAAS02 na geometria g3

De uma maneira geral os valores da turbulência global estão acima dos 40%, o que mostra bem a elevada turbulência verificada neste local.

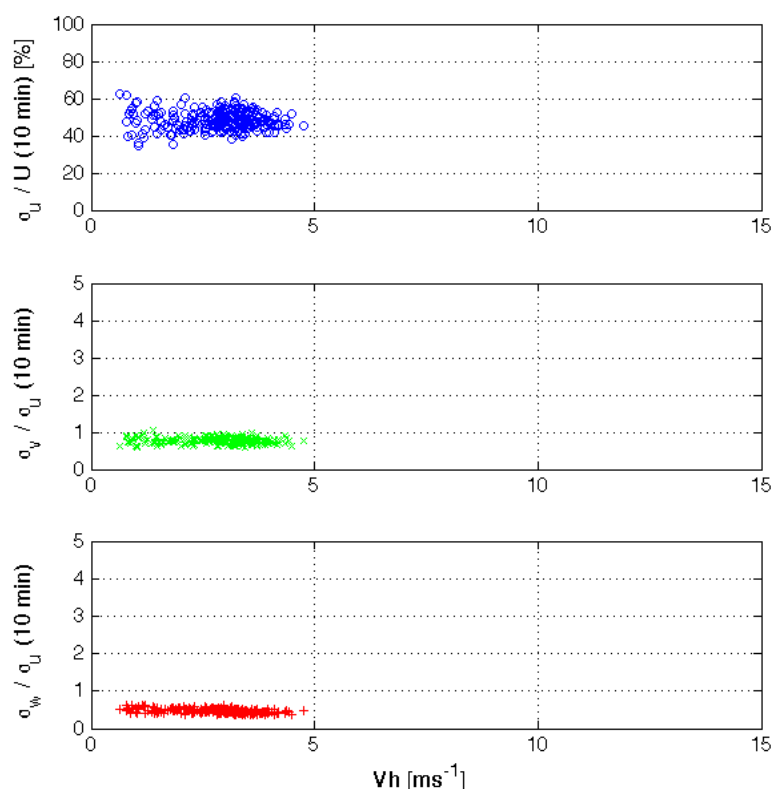


Figura 7.68 - Componentes da turbulência para o SAAS02 na geometria g3

A componente longitudinal da turbulência do SAAS02, correspondente à geometria g3, é mais elevada registada durante o período de medições. De salientar que nesta geometria o anemómetro2 dista somente 1 metro da cobertura do edifício.

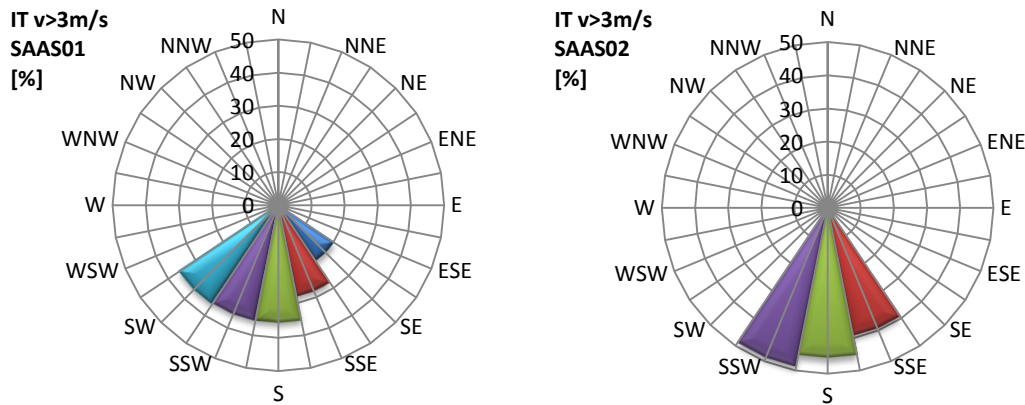


Figura 7.69 - Intensidade de turbulência para SAAS01 e SAAS02 para na geometria g3

Como se pode verificar a partir da Figura 7.69, a intensidade de turbulência no SAAS02 é bastante mais elevada do que aquela que se verifica no SAAS01 (a 6 metros de altura). O facto de os ventos serem predominantes de Sul, e os anemómetros estarem colocados no topo Norte, leva a que os valores do SAAS02 apresentem elevadas turbulências e velocidades reduzidas.

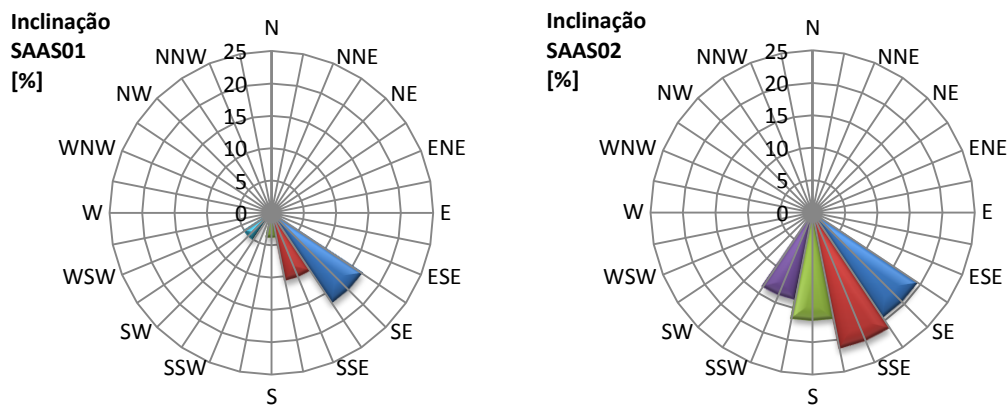


Figura 7.70 - Inclinação do escoamento para SAAS01 e SAAS02 na geometria g3

Na 3ª geometria, a inclinação do escoamento para o SAAS02 é significativamente maior do que aquela que o SAAS01 registou. Isto deve-se ao facto do SAAS02 estar muito próximo da aresta da cobertura (1 metro), onde as componentes verticais da velocidade são, tipicamente, mais acentuadas.

De uma maneira geral, ao longo das geometrias analisadas, verificou-se uma maior intensidade de turbulência na zona mais próxima da cobertura do DEMec. Os ventos predominantes de Sul, captados na última geometria, mostram claros indícios do fenómeno conhecido como bolha de separação. A série de dados do SAAS02, conseguida entre 23 e 29 de Junho, confirma os resultados aqui apresentados para a geometria g3. Em anexo podem ver-se os resultados para a série de dados do SAAS02 na geometria g3-SAAS02.

Para os anemómetros sónicos a série de dados recolhida no campo não foi obtida em período de tempo simultâneo com a série obtida no DEMec - FEUP. Se no caso dos anemómetros de copos havia um interesse particular em relação à comparação da intensidade do recurso, aqui o interesse fixa-se na comparação das características inerentes à complexidade do vento.

Campo2

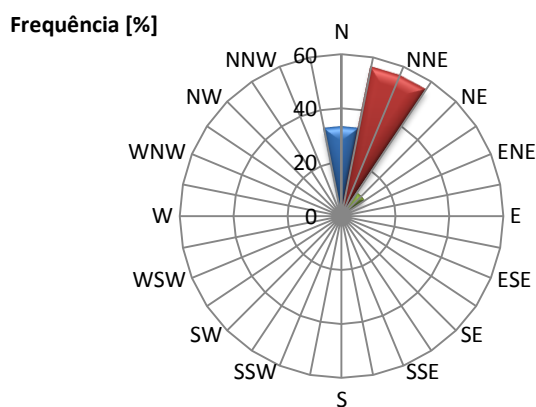


Figura 7.71 - Rosa-dos-ventos para os dados do Campo2

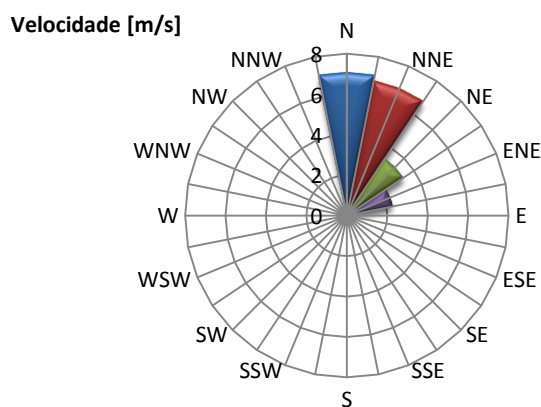


Figura 7.72 - Rosa das velocidades para os dados do Campo2

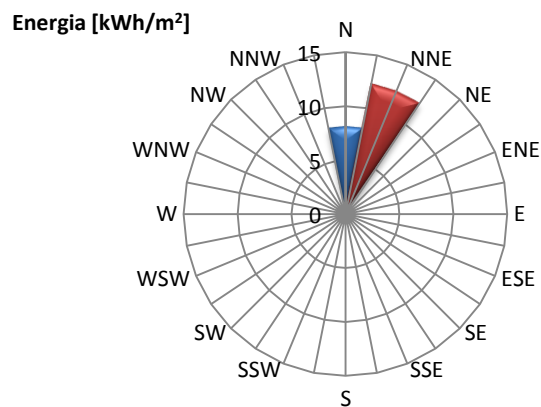


Figura 7.73 - Rosa da energia para os dados do Campo2

Como se pode ver na Figura 7.71 os sectores predominantes são o sector 1 e 2, sendo que o primeiro apresenta a velocidade média mais elevada (Figura 7.72).

Energeticamente, a elevada discrepância entre o número de ocorrências dá vantagem ao sector 2, que mesmo com uma velocidade média menor, apresenta maior contribuição energética que o primeiro.

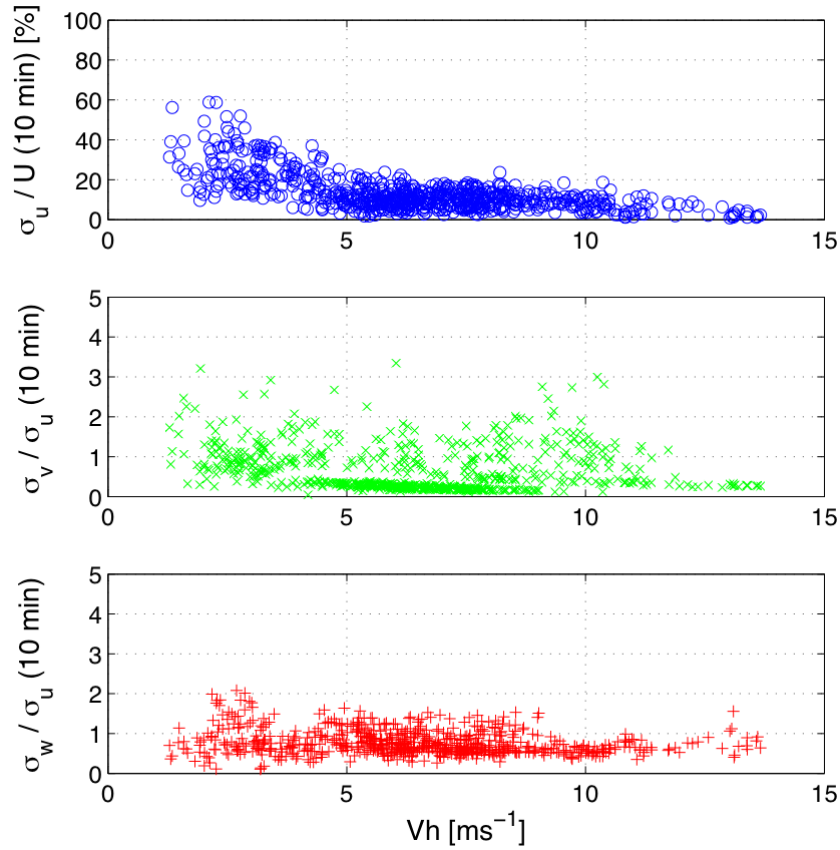


Figura 7.74 - Componentes da turbulência para os dados do Campo2

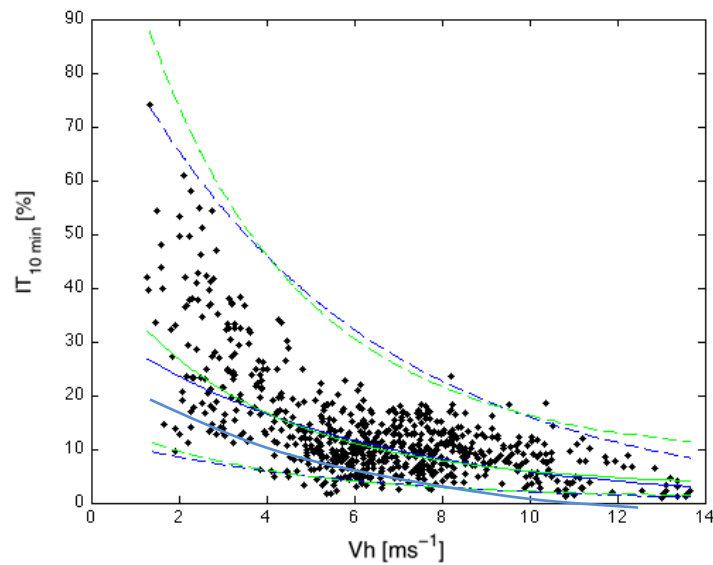


Figura 7.75 - Turbulência global para os dados do Campo2

Os gráficos de turbulência evidenciam valores elevados para velocidade abaixo dos 5 m/s. Acima dessa velocidade, os valores da componente longitudinal da turbulência baixam para valores razoáveis, abaixo dos 20%, já a componente lateral e vertical mostram valores bastante dispersos relativamente ao que se verificou em ambiente urbano.

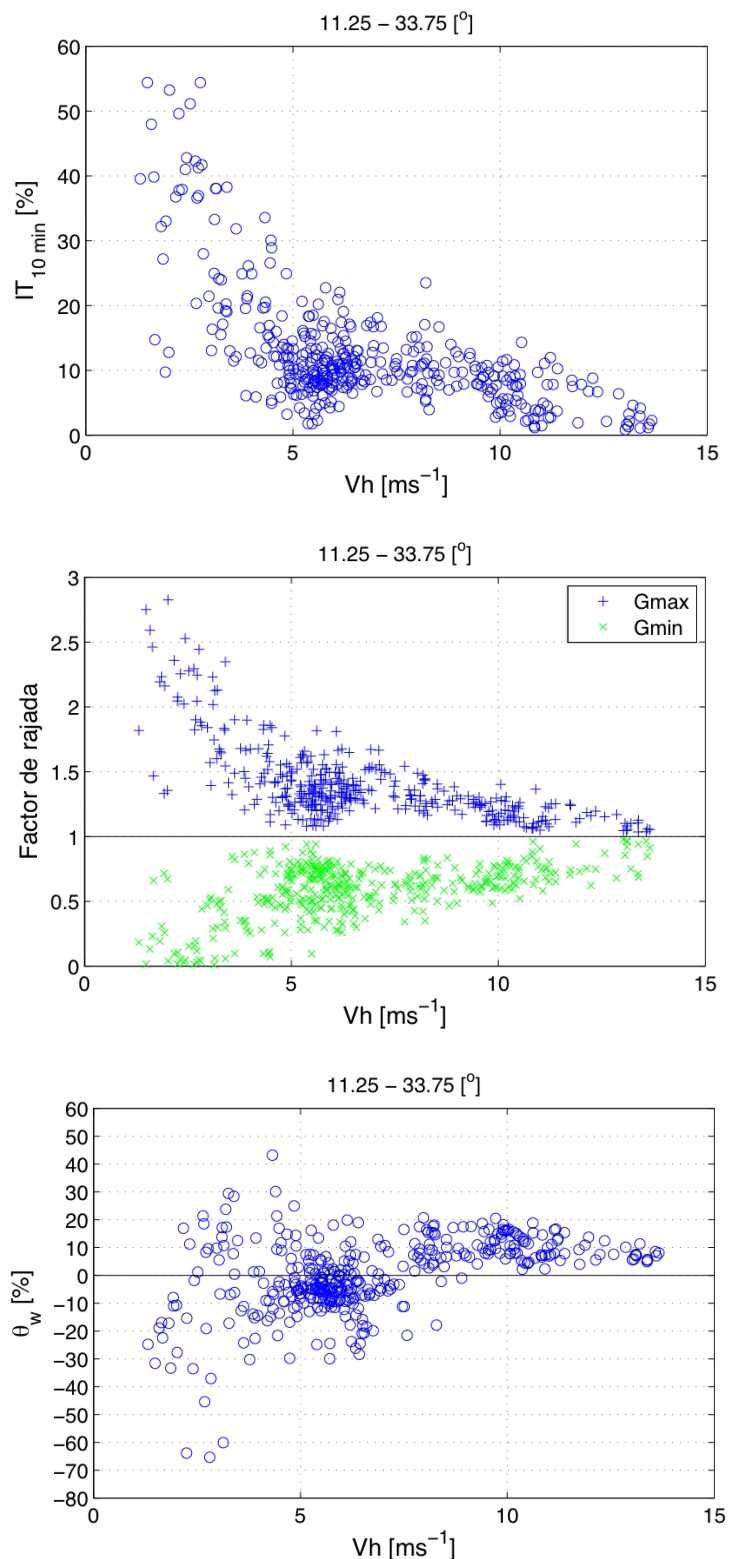


Figura 7.76 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação para o sector 2 do Campo2

Na figura 7.76 a turbulência apresenta a sua forma típica, com valores elevados para velocidades baixas e à medida que a velocidade sobe a turbulência desce. O gráfico dos factores de rajada também mostra a mesma tendência. Tanto num caso, como no outro, os valores são um pouco elevados, mas ainda dentro do aceitável para se proceder a aproveitamento energético. No que diz respeito ao terceiro gráfico, a inclinação do escoamento apresenta valores elevados, ora positivos ora negativos, o que tem implicações claras no bom funcionamento de aerogeradores, particularmente no caso dos de eixo horizontal.

Tabela 7.9 - Resumo dos dados do Campo2

Parâmetro	Restrição	Valor	Unidades
N.ocorrências	10min	700	
Disponibilidade		100.00	[%]
V _{total}		6.53	[m/s]
V _{horizontal}		6.46	[m/s]
Direcção preferencial		17.68	[°]
TI		13.44	[%]
G _{max}		1.41	
G _{min}		0.56	
Inclinação		-0.68	[%]
N.Ocorrências	V _h >3m/s	89.86	[%]
TI	(V>3m/s)	11.35	[%]
Tlu	(V>3m/s)	11.57	[%]
sv/su	(V>3m/s)	0.60	[%]
sw/su	(V>3m/s)	0.76	[%]
G _{max}	(V>3m/s)	1.34	
G _{min}	(V>3m/s)	0.60	
Inclinação	(V>3m/s)	-0.41	[%]
Disponibilidade	10<=V _h <25 m/s	0.00	[%]
TI	(10<=V<25 m/s)	-	[%]

Para o período de medições considerado no Campo2, a velocidade horizontal média apresenta valores de 6,5 m/s. A intensidade de turbulência para valores de velocidade acima dos 3 m/s está abaixo dos 11,4%, e a inclinação é de -0,4%. Porém, este valor pode revelar-se enganador pois é resultados da fusão de valores positivos e negativos. Na Figura 7.76 (em baixo) pode ter-se uma ideia daquilo que é a dispersão dos pontos da inclinação.

A comparação dos resultados de ambiente rural e urbano mostram que, de facto, as diferenças do recurso são bastante significativas. O recurso a anemometria de copos, permitiu, com recurso a séries concorrentes, constatar-se que a intensidade do recurso em ambiente urbano é consideravelmente menor do que em ambiente rural. Durante o período estudado, a energia disponível em ambiente rural é 4,8 vezes superior à que se verificou em ambiente urbano. Por outro lado, a elevada intensidade de turbulência

verificada na cobertura do DEMec, torna um possível aproveitamento energético mais difícil. Os valores mais elevados para a turbulência foram encontrados na zona mais próxima da cobertura. A inclinação do escoamento, de uma maneira geral, apresenta valores abaixo dos 8°, ultrapassando este valor somente em casos pontuais, sobretudo junto à face do edifício. Nos dados recolhido em ambiente rural, a intensidade de turbulência apresenta valores bem abaixo da generalidade dos valores no DEMec. A inclinação, por sua vez, está muitas vezes acima dos valores registados em ambiente urbano.

7.3 Simulação com software comercial

As simulações aqui utilizadas fazem parte do trabalho de fim de curso da Eng.^a Michela Cappannelli, que foi orientada pelo professor Mestre da Palma. Para a consulta mais pormenorizada dos seus resultados, aconselha-se a leitura do relatório que dá pelo nome de: “*Simulação do escoamento sobre o edifício da FEUP com software comercial CFD – Fluent®*”, disponível na *Università Degli Studi di Perugia – Facoltà di Ingegneria*. Neste trabalho, será somente efectuada uma breve comparação dos valores de velocidade e turbulência para duas das geometrias. Esta comparação visa, sobretudo, a validação dos resultados obtidos com recurso ao *CFD*. Os resultados da simulação para o sector NW serão comparados com os resultados respeitantes à geometria g1 e os resultados da simulação do sector SSW com os dados da geometria g3.

Para a simulação das diferentes direcções do vento foi utilizado um domínio de 300x300x100 metros definido em *Gambit*. Neste *software* foram também definidas as condições de fronteira e a malha a utilizar. Na entrada do domínio foi definida uma condição de *inflow velocity* e à saída um *outflow*. As malhas foram definidas para que o tamanho dos elementos junto ao edifício do DEMec não ultrapasse os 0,5 metros. No limite do domínio o tamanho máximo dos elementos é de 10 metros e junto aos outros edifícios a limite é de 1,5 metros. Para cada simulação (NW e SSW), são utilizadas malhas distintas, onde são considerados os edifícios com maior influência no escoamento.

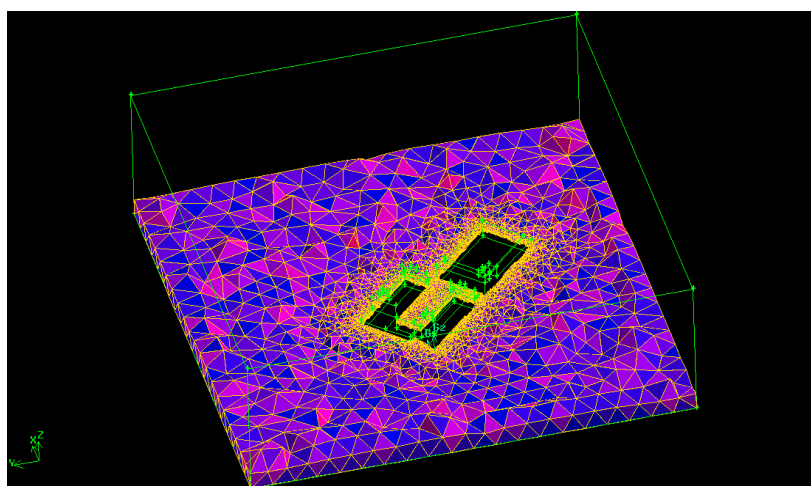


Figura 7.77 - Malha do domínio em *Gambit* para sector NW

Com 885090 elementos tetragonais, a malha apresenta um refinamento junto ao edifício, o que permite uma melhor caracterização dos fenómenos de pequena escala resultantes interacção do vento com os diversos pormenores da cobertura.

Para a simulação do sector NW foi utilizada uma velocidade de entrada de 4 m/s e uma intensidade de turbulência de 5%. Tanto na Figura 7.78 com na Figura 7.79, o edifício do DEMec aparece do lado direito da imagem.

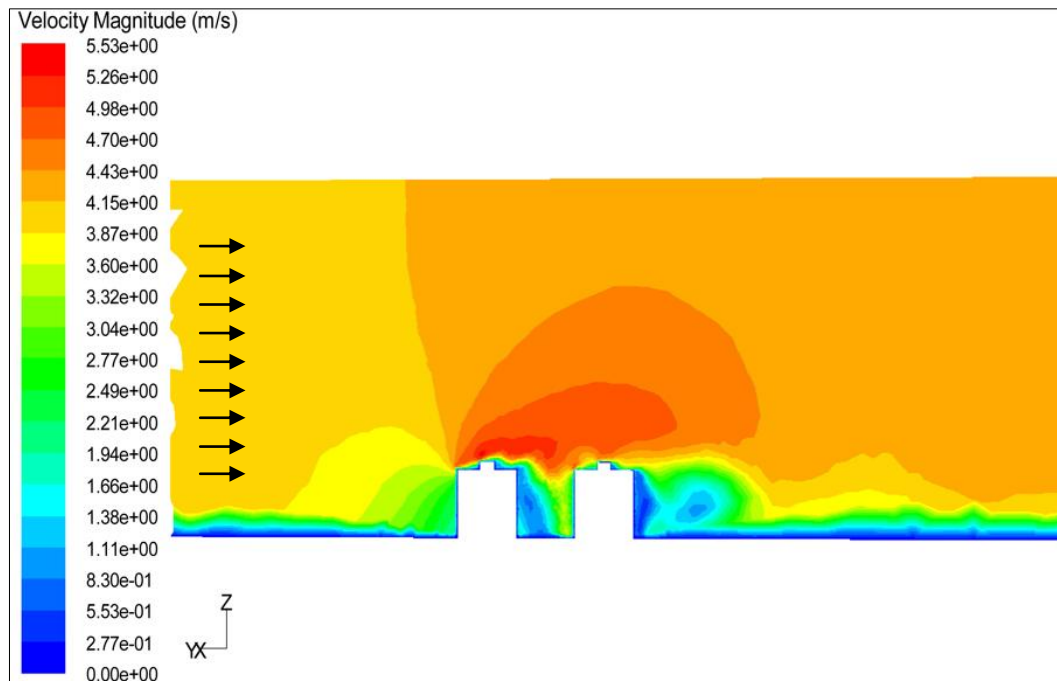


Figura 7.78 - Contorno das velocidades para sector NW

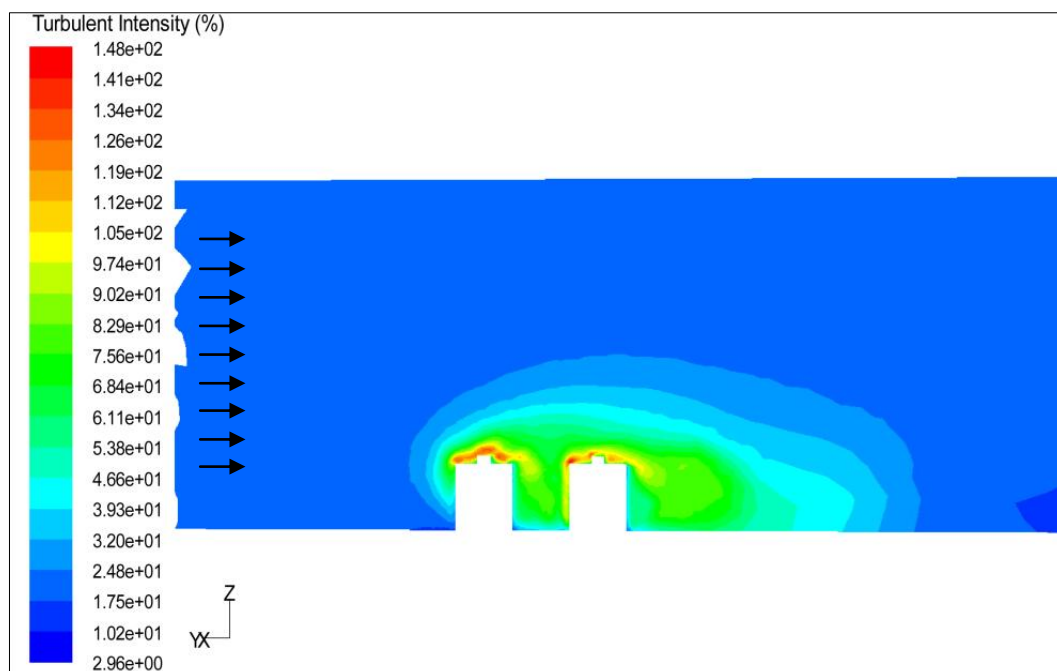


Figura 7.79 - Contorno das intensidades de turbulência para sector NW

Na Figura 7.78 pode ver-se o efeito de desaceleração que a vento sofre a montante do edifício da esquerda (zona esverdeada). Logo acima desse edifício, as cores mais quentes evidenciam o aparecimento de efeitos aceleradores. No DEMec esses efeitos são menos evidentes devido à sua localização relativa.

A intensidade de turbulência (Figura 7.79) exhibe os valores mais elevados na zona mais próxima da cobertura do edifício, formando-se a zona conhecida como bolha de separação. A jusante do DEMec, as elevadas turbulências (a verde), dizem respeito ao efeito de esteira provocado pelo escoamento em torno dos edifícios.

Tabela 7.10 - Valores de velocidade medidos e resultados da simulação NW

Distância à parede [m]	Valor medido [m/s]	Valor da simulação [m/s]	Diferença absoluta [m/s]	Diferença relativa [%]
0	0	0	0	-
3	3,74	4,644	0,904	0,88
6	4	4,908	0,908	0,93
9	4,06	4,931	0,871	-

Embora o valor da velocidade utilizado nas simulações seja um pouco elevado, verifica-se por comparação dos valores da Tabela 7.10 que o perfil de velocidades calculado pelo *Fluent®* é idêntico àquele que se verifica na cobertura do DEMec. A diferença entre os valores de velocidade ronda os 0,9 m/s. Assumindo-se que a velocidade a 9 metros coincidia com a velocidade calculada, as diferenças para os 3 e 6 metros passaria a ser de 0,88% e 0,93%, respectivamente. A diferença relativa é calculada subtraindo-se ao valor das velocidades da simulação a diferença absoluta para 9 metros, 0,871 m/s, (considera-se que as velocidades a 9 metros são iguais para as medições e a simulação) divide-se depois essa diferença (entre valor medido e valor calculado menos diferença absoluta) pelo valor da velocidade medido durante a campanha.

Tabela 7.11 - Valores de turbulência medidos e resultados da simulação NW

Distância à parede [m]	Valor medido [%]	Valor da simulação [%]	Diferença absoluta [%]
0	-	-	-
3	32,72	79,02	46,3
6	31	56,06	25,06
9	29,1	47,7	18,9

Por sua vez, os valores de turbulência calculados são claramente sobrestimados, especialmente na zona mais próxima da cobertura. Em anexo podem consultar-se mais resultados das simulações.

Para a simulação do sector SSW foi utilizada uma malha diferente da primeira (Figura 7.80) devido à posição relativa do edifício da biblioteca de FEUP.

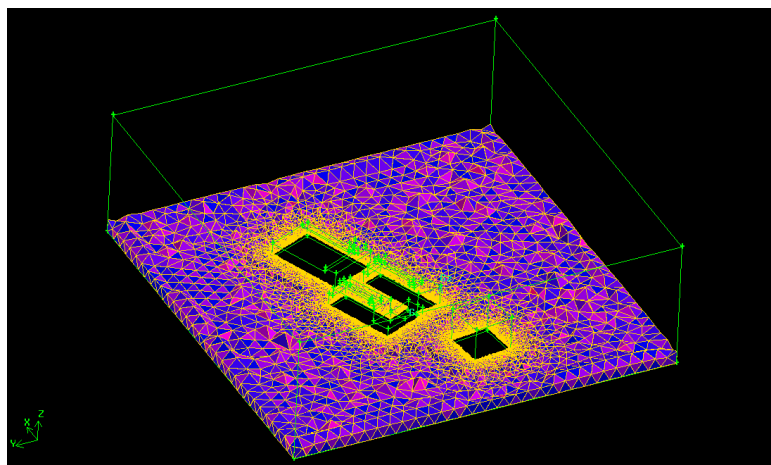


Figura 7.80 - Malha para sector SSW em Gambit

O contorno de velocidades (Figura 7.81) evidencia claramente os efeitos aceleradores muito acentuados no topo do edifício da biblioteca (à esquerda). No DEMec também aparecem efeitos aceleradores acima da aresta que enfrenta o vento. No local da torre (linha preta no edifício do centro) a velocidade do vento aumenta com a distância ao topo.

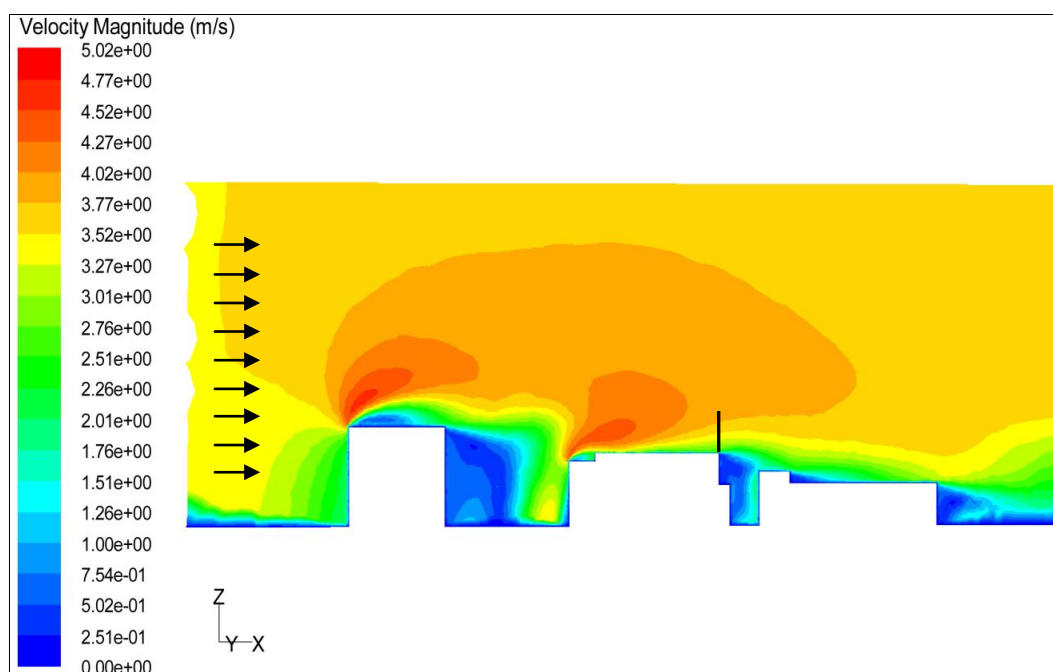


Figura 7.81 - Contorno da velocidade para sector SSW

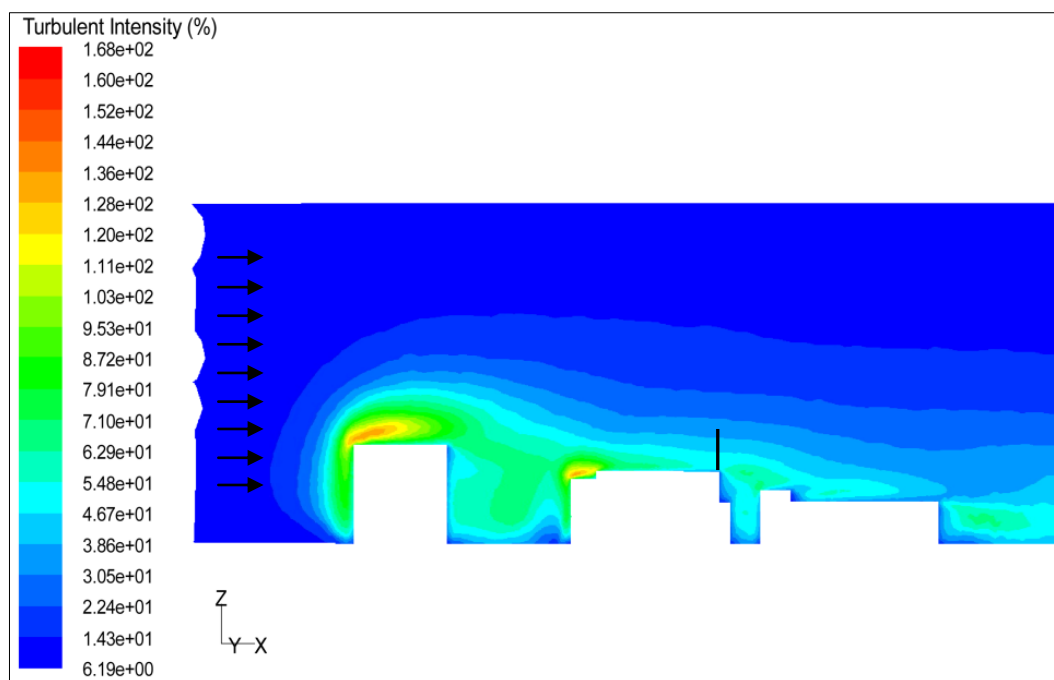


Figura 7.82 - Contornos da intensidade de turbulência para sector SSW

A intensidade de turbulência apresenta valores particularmente elevados no início da cobertura. Na zona onde está a torre de medição (linha preta no edifício central) a turbulência diminui com o aumento da distância à cobertura.

Os valores de velocidade desta simulação apresentam uma correlação pior com os valores medidos do que aquela que se verifica para o sector NW.

Tabela 7.12 - Valores de velocidade medidos e resultados da simulação SSW

Distância à parede [m]	Valor medido [m/s]	Valor da simulação [m/s]	Diferença [m/s]	Diferença [%]
0	0	0	0	0,00
1	3,2	3,05	0,15	37,81
6	4,78	3,46	1,32	0,84
9	5,1	3,74	1,36	-

Tabela 7.13 - Valores de turbulência medidos e resultados da simulação SSW

Distância à parede [m]	Valor medido [%]	Valor da simulação [%]	Diferença [%]
0	0	0	0
1	49,36	47,9	1,46
6	35,36	45,4	10,04
9	29,7	40,1	9,3

Por sua vez, o valor de turbulência está bastante próximo dos valores medidos, em particular na zona mais próxima da cobertura.

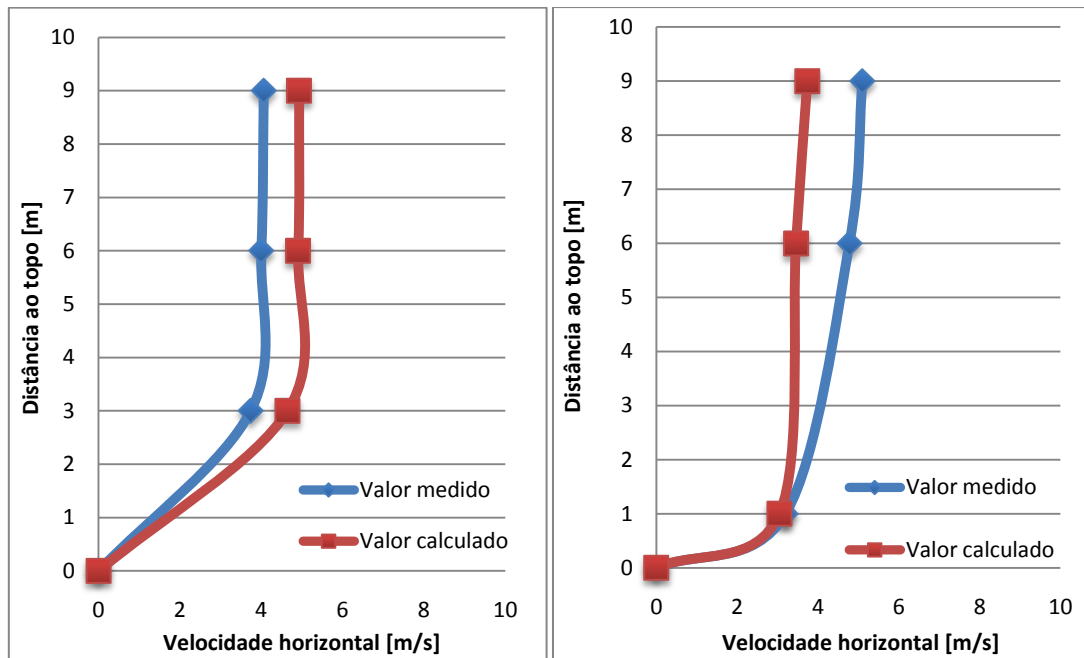


Figura 7.83 - Perfil de vento medido e calculado para sector NW (à esquerda) e SSW (à direita)

Na Figura 7.83 as diferenças entre os perfis são bem visíveis. O sector NW, à parte de um desvio de cerca de 0,9 m/s, apresenta um perfil muito idêntico entre as edições e cálculo com recurso a CFD. No caso do sector SSW, o perfil de vento apresenta-se um pouco mais distorcido, com o *Fluent*® a subestimar os valores de velocidade na zona mais distante do edifício.

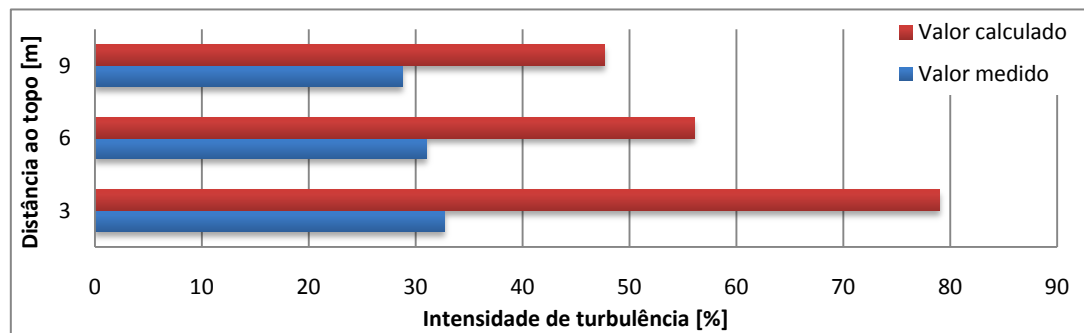


Figura 7.84 - Intensidades de turbulência medida e calculada para o sector NW

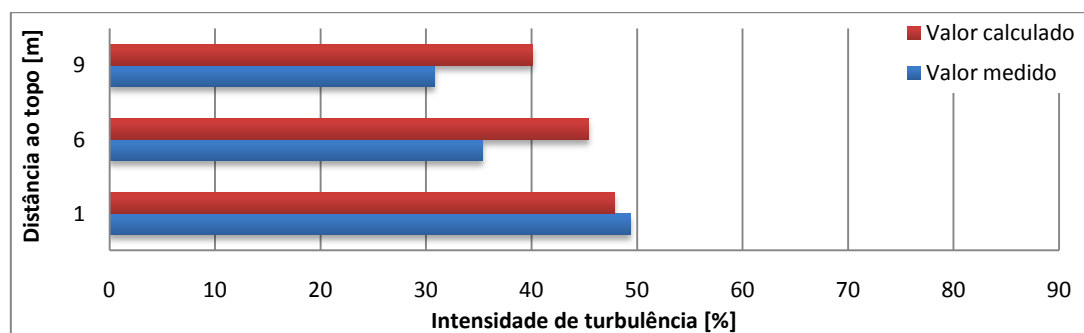


Figura 7.85 - Intensidade de turbulência medida e calculada para o sector SSW

De uma maneira geral o *Fluent*® sobrestima as intensidades de turbulência na cobertura do DEMec. A simulação do sector NW apresenta uma disparidade muito grande entre os valores medidos e os calculados. No sector SSW os valores estão mais ajustados à realidade, mas ainda assim com erros relativamente elevados.

8. Conclusões

O vento em ambiente urbano revelou-se, de facto, muito complexo e a sua análise merecedora de um cuidado suplementar. A comparação da intensidade do vento, conseguida com recurso a anemometria convencional, veio confirmar aquilo que eram as expectativas. Fruto da elevada rugosidade, a intensidade do recurso é significativamente mais baixa do que aquela que se faz sentir em ambiente rural. Durante os dois meses de medições, a velocidade média do vento na cobertura do DEMec apresentou valores constantemente mais baixos do que aqueles que se registaram no local designado Campo1, sendo a velocidade média de 2,9 m/s no primeiro caso e 4,9 m/s no segundo. De referir, que o local de ambiente rural com o qual se procedeu a comparações, não é, de modo algum, um sítio excepcional no que respeita à intensidade do recurso.

Assim, podemos afirmar que no topo edifício do DEMec a intensidade do vento é claramente menor do que aquela que se pode encontrar em ambiente rural.

Por outro lado, a comparação dos dados resultantes da anemometria ultra-sónica, ora recolhidos no edifício do DEMec, ora no local designado Campo2, revelou também diferenças interessantes, desta feita no que se refere à ‘qualidade’ do recurso. O local correspondente ao Campo2 tem evidenciado características de vento particularmente complexas, sendo disso prova, os problemas evidenciados por alguns dos aerogeradores que aí se encontram. Ainda assim, a comparação de resultados mostrou que em ambiente urbano são de esperar condições de vento mais complicadas do que aquelas que se verificam neste local (Campo2). A grande diferença está sobretudo relacionada com a elevada turbulência verificada na cobertura do DEMec. Se no local Campo2 as turbulências à altura do rotor rondam, de uma maneira geral, os 12%, em ambiente urbano esse valor fica normalmente acima dos 30%.

A componente não vertical do escoamento é muito depende da direcção do vento e do local das medições. Em grande parte das medições, a inclinação do escoamento apresenta valores aceitáveis, à excepção dos períodos correspondentes às geometrias g3 e g3-SAAS02, onde o anemómetro colocado a 1 metro da cobertura registou inclinações

muito acentuadas. Em determinados sectores, essas inclinações chegam a atingir os 14°, valor muito acima do desejável para instalação de aerogeradores convencionais. Os factores de rajada, por sua vez, apresentam valores médios compreendidos entre os 2 e 2,5, no caso da máxima, e 0 e 0,4 no caso da mínima.

Nos dados de campo, a inclinação do vento do sector 2 deixa prever dificuldades na conversão energética para baixos valores de velocidade. Os factores de rajada, tal como a turbulência, estão abaixo daquilo que se verifica em ambiente urbano, com valores de máxima a rondar os 1,45 e a mínima normalmente acima dos 0,5. A baixa variedade de sectores com ocorrências, no caso do Campo2, leva a que os resultados possam ser enganadores devido à possibilidade dos sectores predominantes apresentarem características muito particulares. Estudos anteriormente efectuados mostram uma tendência para inclinações relativamente elevadas, embora abaixo daquelas que aqui foram apresentadas.

As difíceis condições de vento do ambiente urbano, aliada à menor intensidade do recurso, fazem prever que o aproveitamento energético seja uma tarefa delicada. Portanto, os aerogeradores que lidem melhor com elevados valores de turbulência e que apresentem coeficientes de potência elevados nas gamas de velocidades mais baixas serão certamente os mais utilizados. Neste contexto, os aerogeradores de eixo vertical, pelas suas características, tendem a superar melhor as difíceis condições de vento destes ambientes, o que representa uma vantagem importante.

Quanto à simulação em *Fluent*®, verificou-se uma aproximação aceitável do campo de velocidades, particularmente no sector NW. Já as intensidades de turbulência são sobrestimadas em ambos os casos, particularmente no sector NW com valores que chegam ultrapassar os 240%.

Como possibilidade para trabalhos futuros, propõe-se uma campanha de medições que se baseie sobretudo na anemometria ultra-sónica, mas desta vez durante um período mais prolongado, com medição das características do escoamento em mais pontos do edifício, em particular junto às faces do mesmo. O desenvolvimento de ferramentas de análise e tratamento de dados é também um tema interessante a abordar. A principal melhoria a levar a cabo está relacionada com o sistema de aquisição de dados.

Os factores de disponibilidade do sistema de aquisição de dados foram de 79,8% para o SAAS01 e de apenas 42% para o SAAS02. Assim sendo, a análise de séries concorrentes no tempo tornou-se mais complicada, porque por diversas vezes não existiam séries de dados simultâneos entre ambos os anemómetros. Esta situação decorre do facto do SAAS estar ainda numa fase inicial do seu desenvolvimento.

Falta ainda referir que todos os resultados aprestados neste relatório dizem respeito ao edifício do DEMec. A sua extrapolação para outros edifícios não é aconselhada pois as características do vento dependem fortemente da forma e vizinhança dos mesmos.

9. Bibliografia

Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings. (s.d.). *Refocus Volume 3* .

Ammonit. (s.d.). Cup anemometer "first class advanced".

Ammonit. (s.d.). Wind Vane "first class".

Breeze, P. (2005). Power Generation Technologies.

Carlos Santos, Fernando Castro, Luís Ribeiro, Álvaro Rodrigues, José Palma. (2006). *The wind flow over the Picos site*.

Chapman, S. J. (2001). *MATLAB Programming for Engineers*.

Decreto-Lei 312/2001. (s.d.). in *Diário da República* .

Decreto-Lei 363/2007. (s.d.). in *Diário da República* .

Decreto-Lei 68/2002. (s.d.). in *Diário da República* .

Decreto-Lei 80/2006. (s.d.). in *Diário da República* .

DGGE. (2008). Estatísticas rápidas Dezembro 2008.

Energia fotovoltaica, manual sobre tecnologias projecto e instalações. (2004).

<http://www.broadstarwindsystems.com/products.php>. (s.d.). Obtido em 27 de 05 de 2009

<http://www.helixwind.com/en/S322.php>. (s.d.). Obtido em 27 de 05 de 2009

<http://www.nheolis.com/fr/index.php?page=nheowind-3d-50>. (s.d.). Obtido em 28 de 05 de 2009

<http://www.quietrevolution.co.uk/qr5.htm>. (s.d.). Obtido em 28 de 05 de 2009

<http://www.renovaveisnagora.pt/guiamicroproducao>. (s.d.).

<http://www.swiftwindturbine.com/pictures.php>. (s.d.). Obtido em 27 de 05 de 2009

- Leif Kristensen, F. (2005). *Fragments of the Cup Anemometer History*.
- Luís Ribeiro, Andreas Schimtz, Álvaro Rodrigues, Carlos Rodrigues, José Plama. (2008). *The wind flow over the site at Alto Arganil*.
- Malcolm A. Heath, J. D. (2007). Estimating the Potential Yield of Small Building-mounted Wind Turbines. *Wind Energy* .
- Mertens, S. (2003). The energy yield of roof mounted wind turbines. *Wind Engineering* .
- P. Busche, H. K. (2005). *Wind Tunnel Calibration of Sonic- and Cup Anemometers*.
- Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005. (s.d.). in *Diário da República* .
- Ribeiro, L. M. (2005). *Sonic Anemometer and Atmospheric Flows over Complex Terrain*.
- Rodrigues, Á. (2009). *Acetatos aulas de Energias Renováveis*.
- Rodrigues, Á. *Parques Eólicos em Portugal, Dezembro 2008*.
- Simon Watson, D. I. (s.d.). Predicting the Performance of Small Wind Turbines in the Roof-Top Urban Environment.
- Tony Burton, D. S. (2001). *Wind Energy Handbook*.
- Vries, E. d. (2006). New research on integrating wind energy in buildings. *Renewable Energy World* .
- Vries, E. d. (2006). Urban challenges: New research on integrating wind energy in buildings. *Renewable Energy World* .
- Webb, A. (2007). *The Viability of Domestic Wind Turbines for Urban Melbourne*.
- Wind energy in urban areas: Concentrator effects for wind turbines close to buildings. (2002). *Refocus Vol3* .
- www.ambienteonline.pt. (s.d.). Obtido em 13 de 05 de 2009
- www.ffi-solar.com. (s.d.).
- www.renovaveisnagora.pt. (s.d.). Obtido em 16 de 05 de 2009

Anexos

Anexo A: Definição da geometria g1

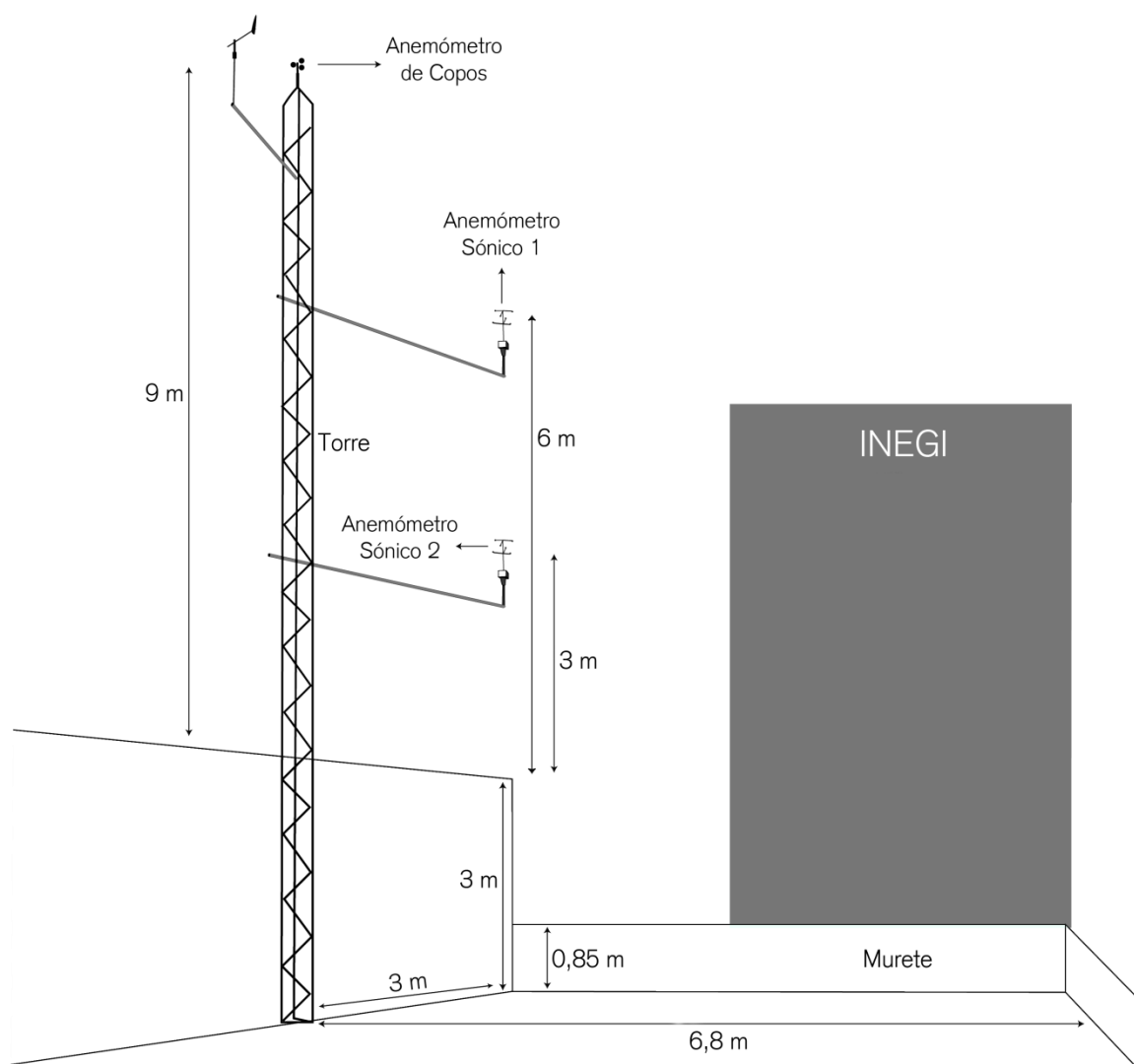


Figura A.0.1 - Esboço da disposição dos anemômetros na geometria g1

Na geometria g1 ambos os anemômetros se encontram alinhados com a face Norte do edifício. O anemômetro sónico 1 encontra-se a cerca de 6 metros de altura. O sónico 2, por sua vez, está a 3 metros da cobertura. Em ambos os casos a orientação das hastes de suporte é paralela ao eixo longitudinal do edifício e em direcção a Norte.

Anexo B: Definição da geometria g2

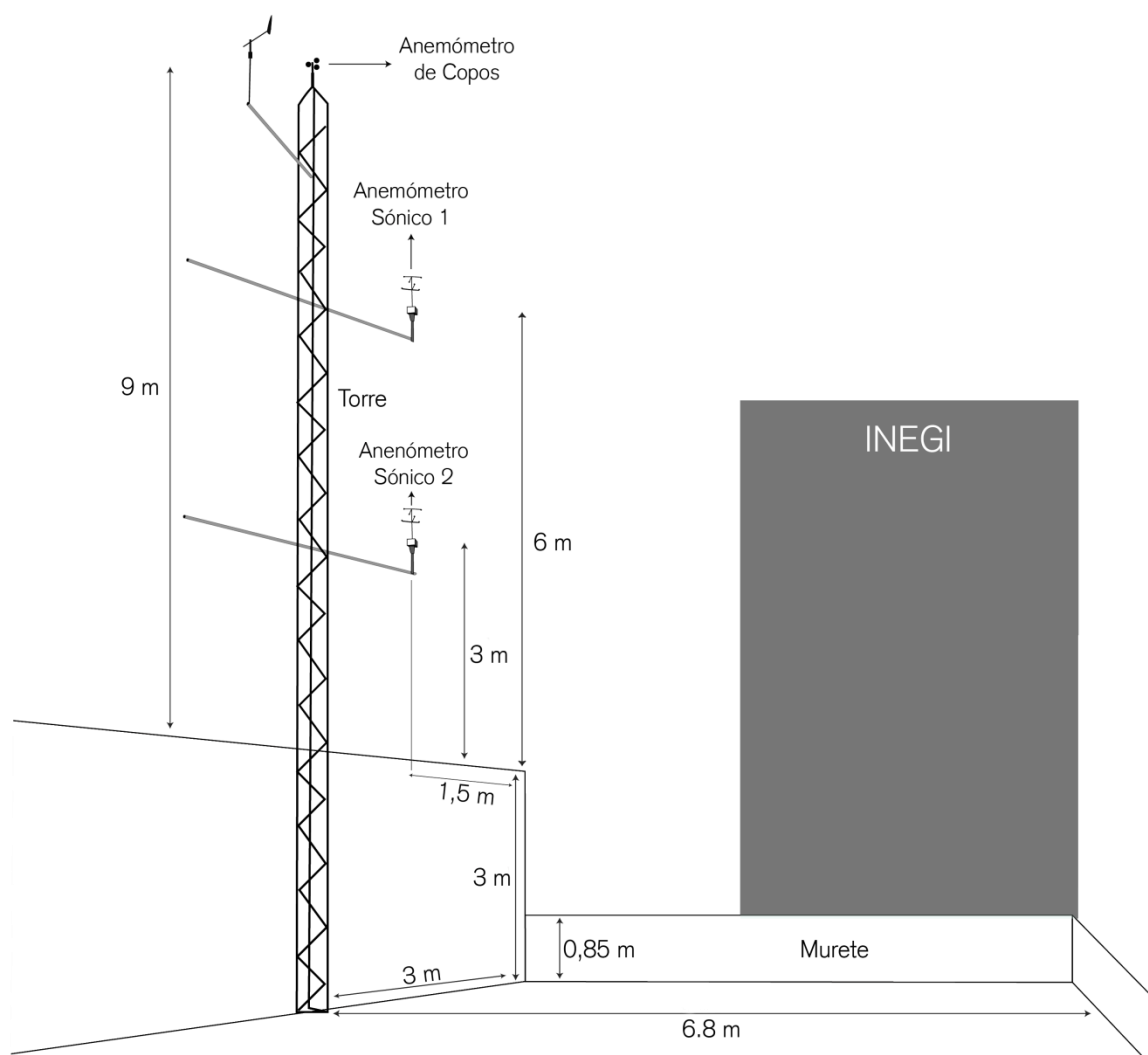


Figura B.0.1 - Esboço da disposição dos anemômetros na geometria g2-Maio e g2-Junho

Os dados referentes à segunda geometria foram separados em duas séries distintas. A primeira diz respeito aos dados recolhidos no final do mês de Maio e a segunda aos dados recolhidos no início do mês de Junho.

Nesta geometria o anemômetro 1 encontra-se orientado a Norte, com uma distância ao topo do edifício de 6 metros e a 1,5 metros de distância do alinhamento da parede. O anemômetro 2 está localizado três metros abaixo do primeiro. A orientação e a distância à parede são idênticas à do primeiro.

Anexo C: Definição da geometria g3

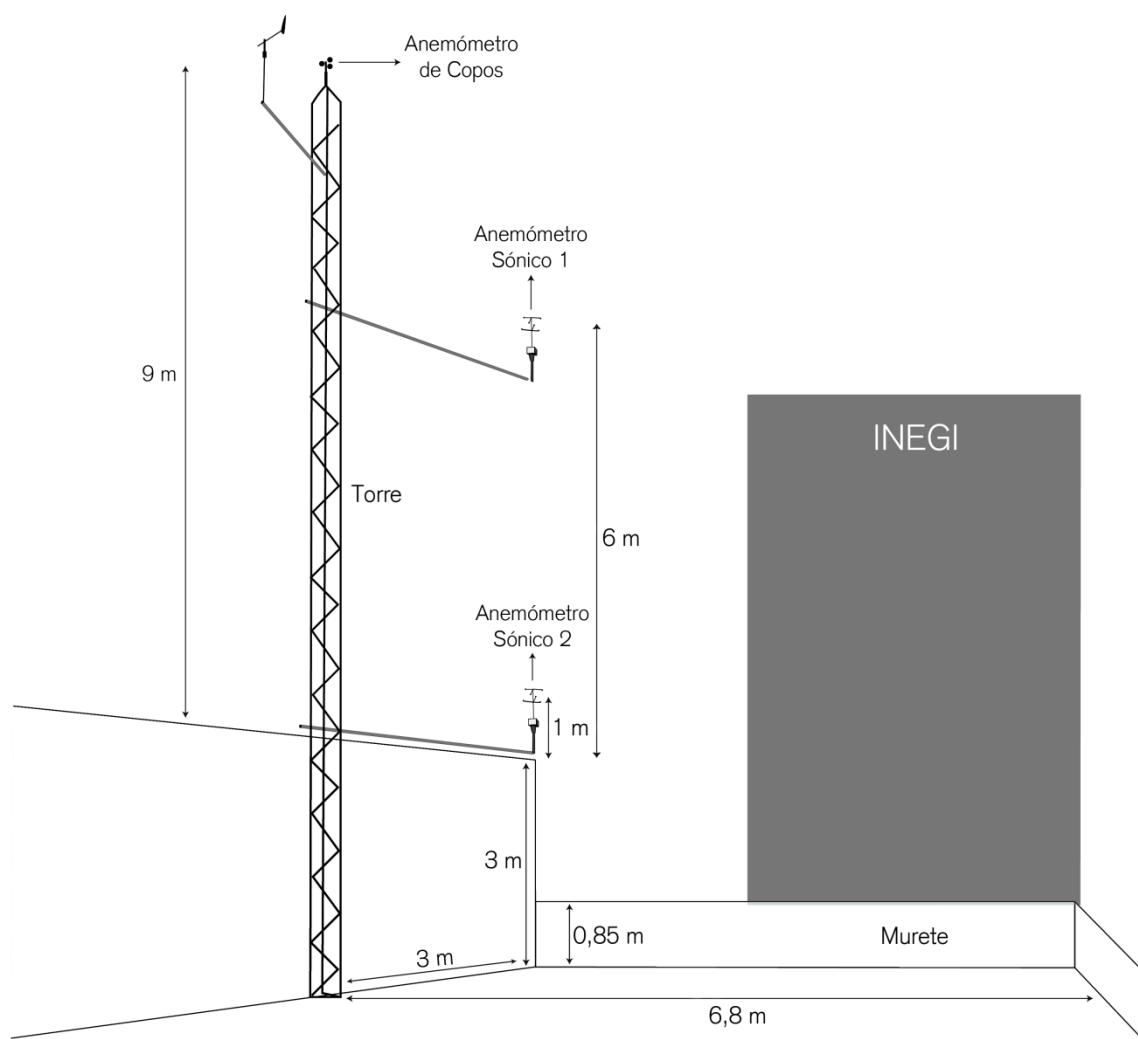


Figura C.0.1 - Esboço da disposição dos anemômetros na geometria g3 e g3-SAAS02

A geometria g3 proporcionou a aquisição de duas séries de dados. A primeira é uma série de dados simultâneos para o SAAS01 e SAAS02, a segunda diz somente respeito a dados do segundo anemômetro.

O anemômetro sônico 1 situa-se na mesma posição que ocupara durante a primeira geometria. O segundo está colocado junto da aresta do edifício, a um metro do topo e alinhado com a face Norte. A orientação das hastes é a mesma que foi utilizada durante todo o período de medições, ou seja, paralela à caixa de escadas (direcção Sul - Norte).

Anexo D: Dados a 9 metros para geometria g1

(Distância ao topo do edifício)

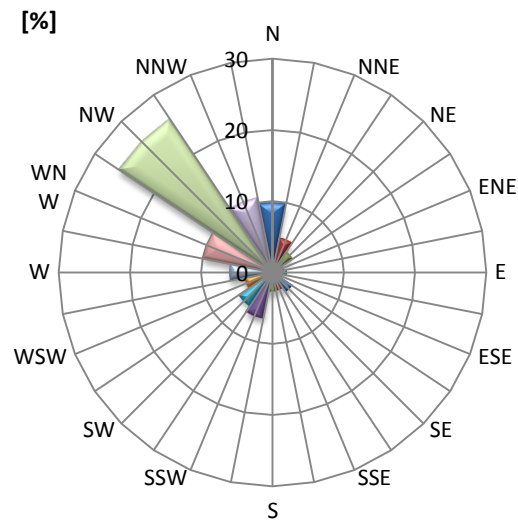


Figura D.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g1

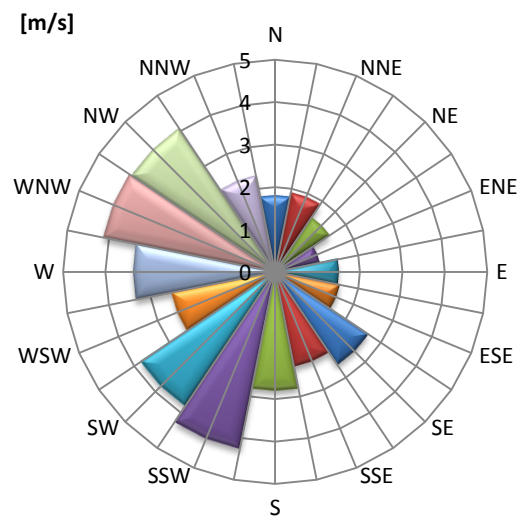


Figura D.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g1

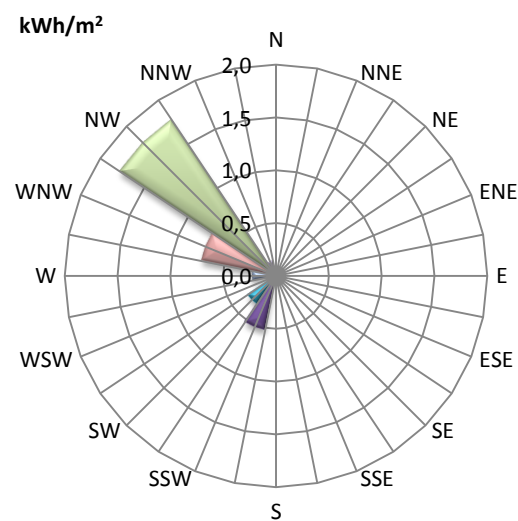


Figura D.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g1

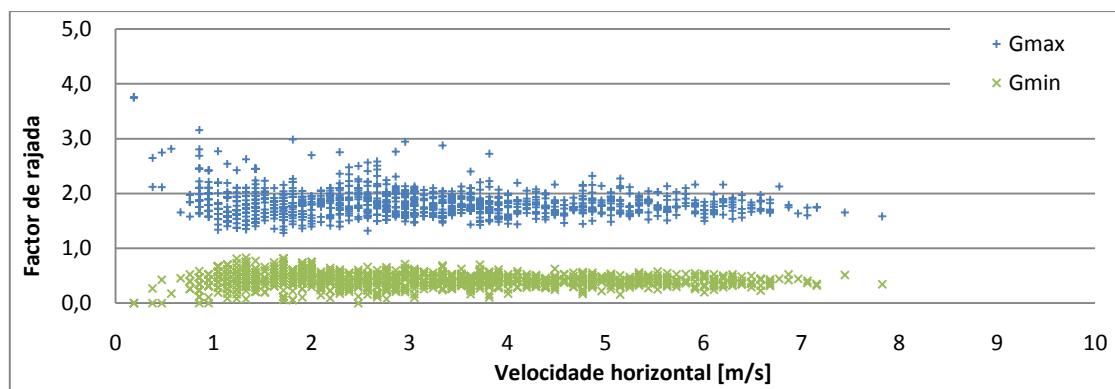


Figura D.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g1

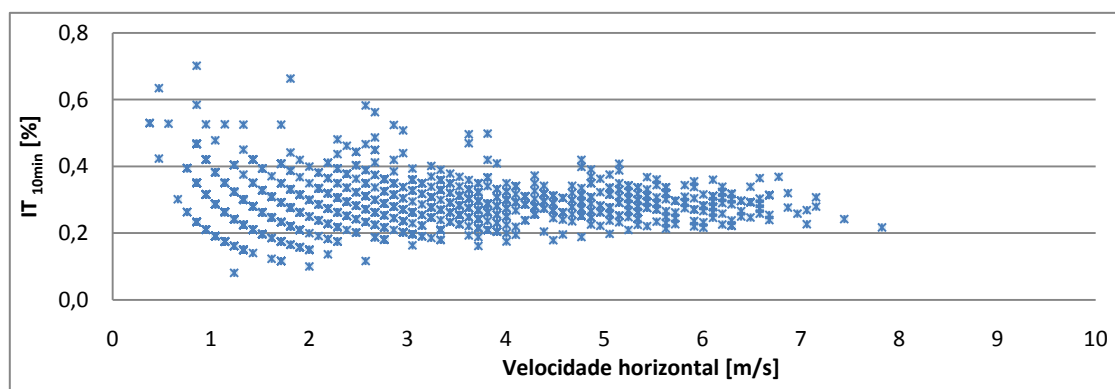


Figura D.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g1

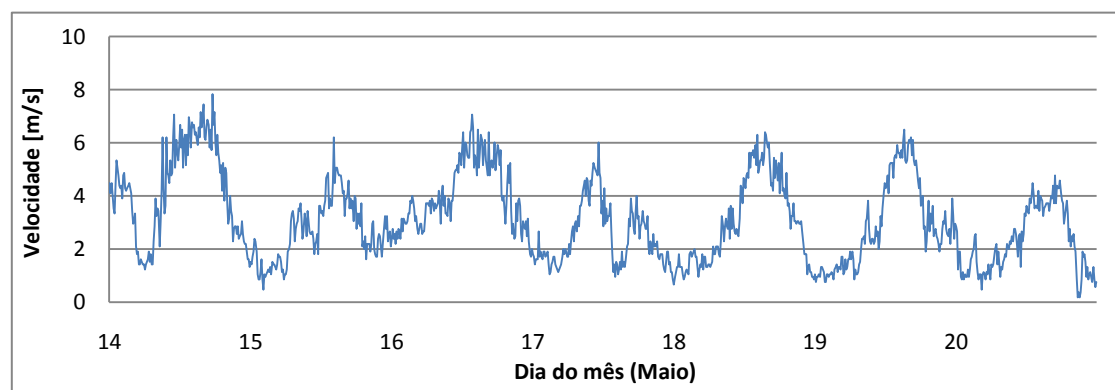


Figura D.0.6 - Velocidade horizontal média para anemómetro de copos na geometria g1

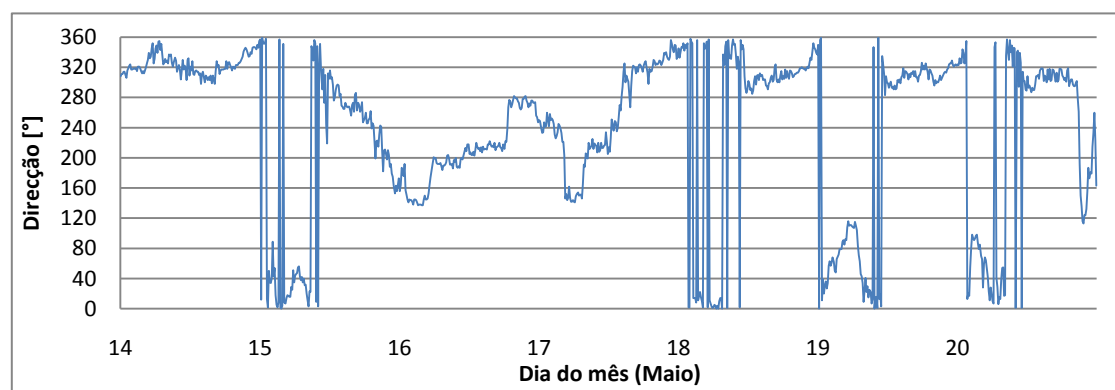


Figura D.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g1

Anexo E: Dados a 9 metros para a geometria g2Maio

(Distância ao topo do edifício)

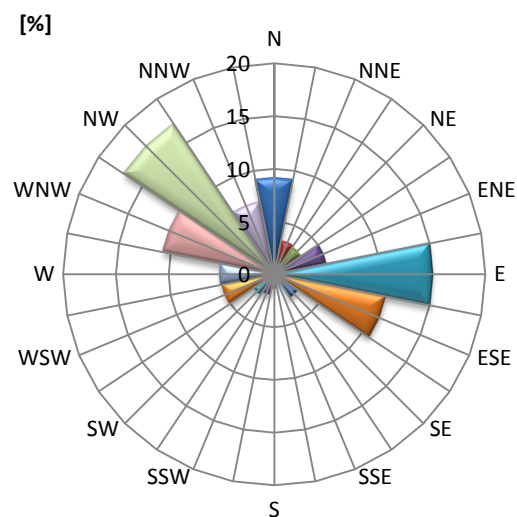


Figura E.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

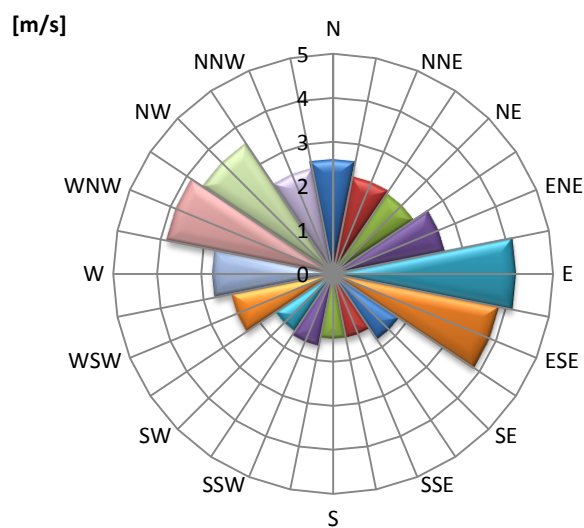


Figura E.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

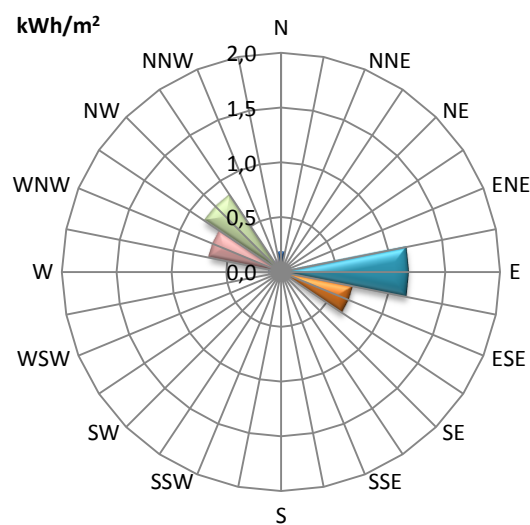


Figura E.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

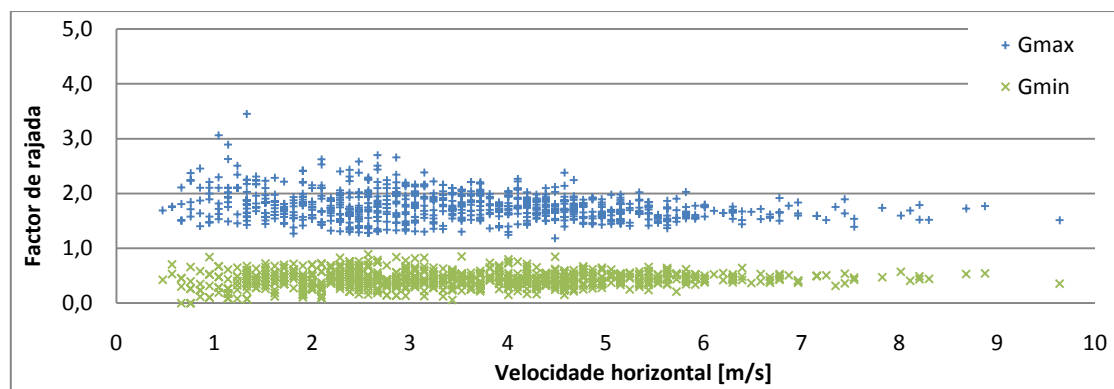


Figura E.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

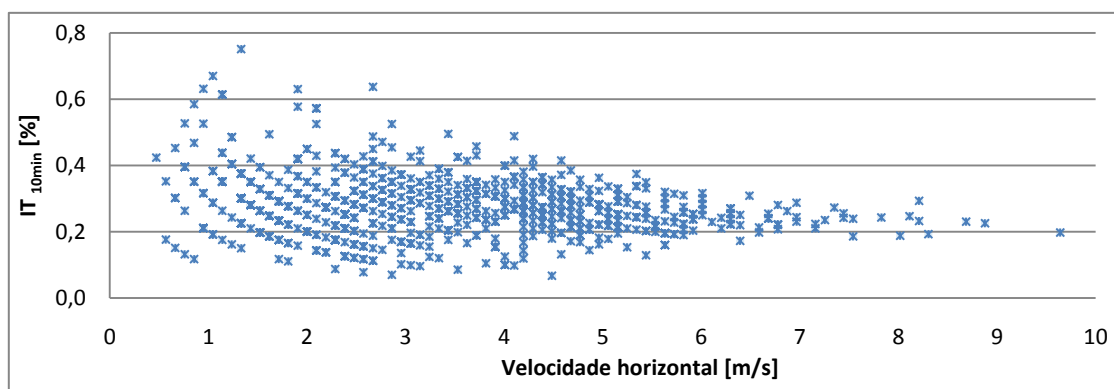


Figura E.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

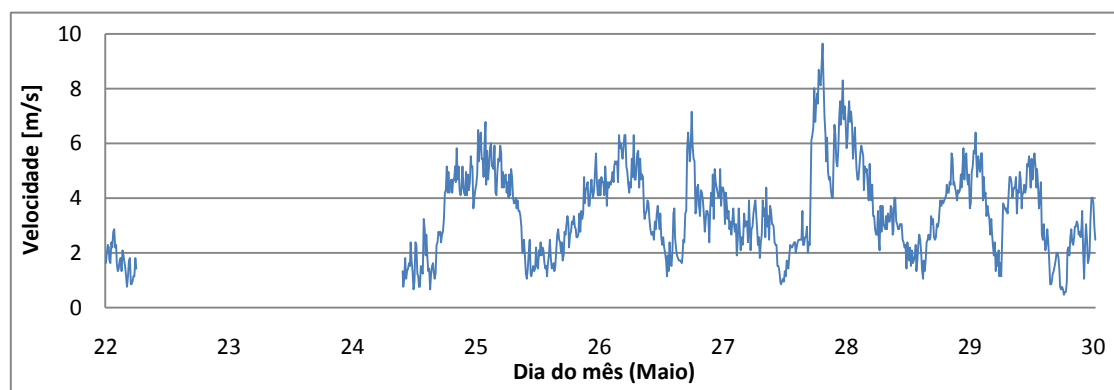


Figura E.0.6 - Velocidade horizontal média para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

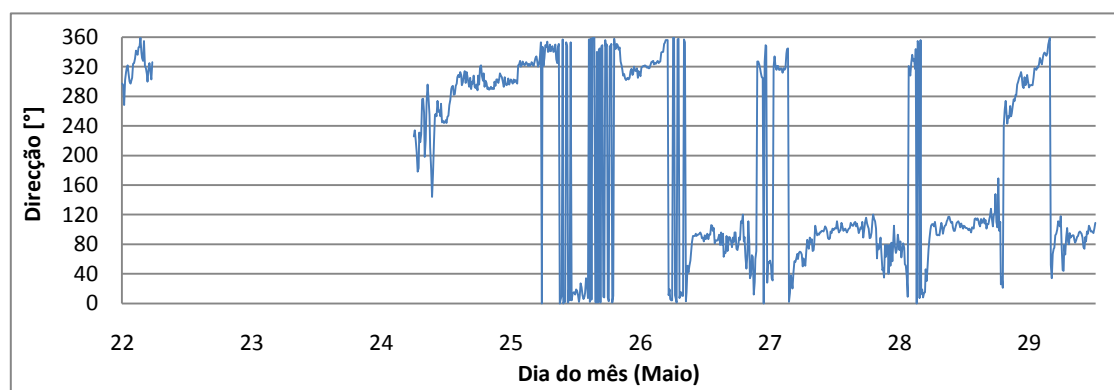


Figura E.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g2-Maio

Anexo F: Dados a 9 metros para a geometria g2Junho

(Distância ao topo do edifício)

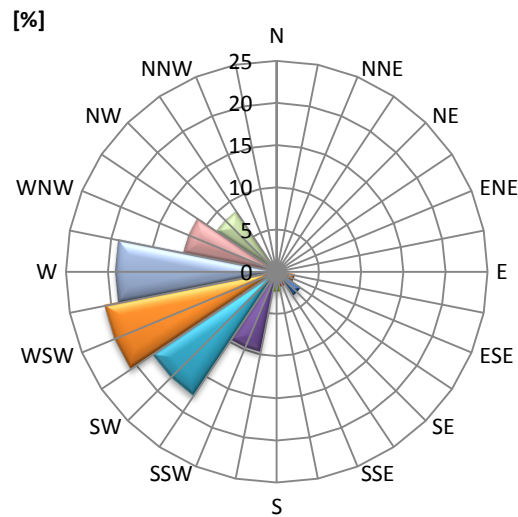


Figura F.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

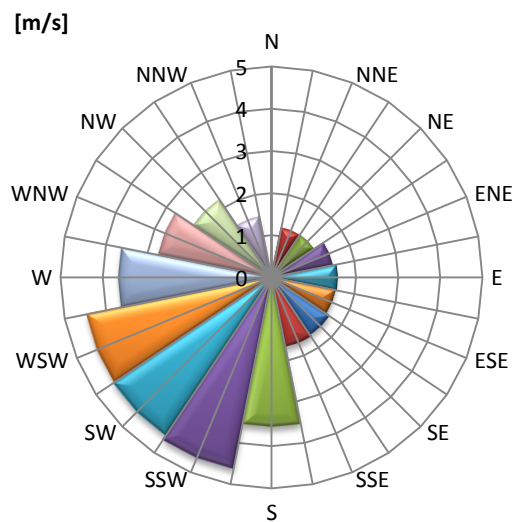


Figura F.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

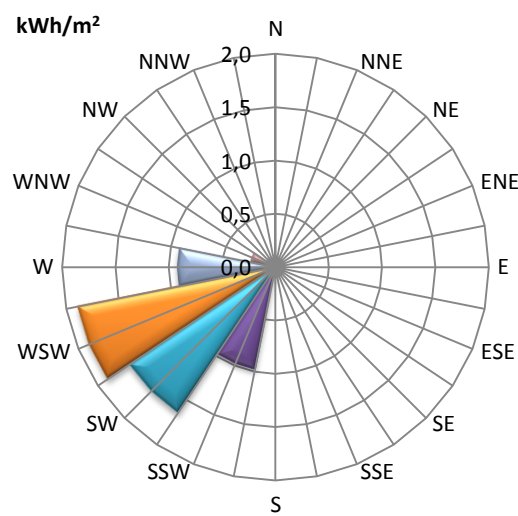


Figura F.0.3 - Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

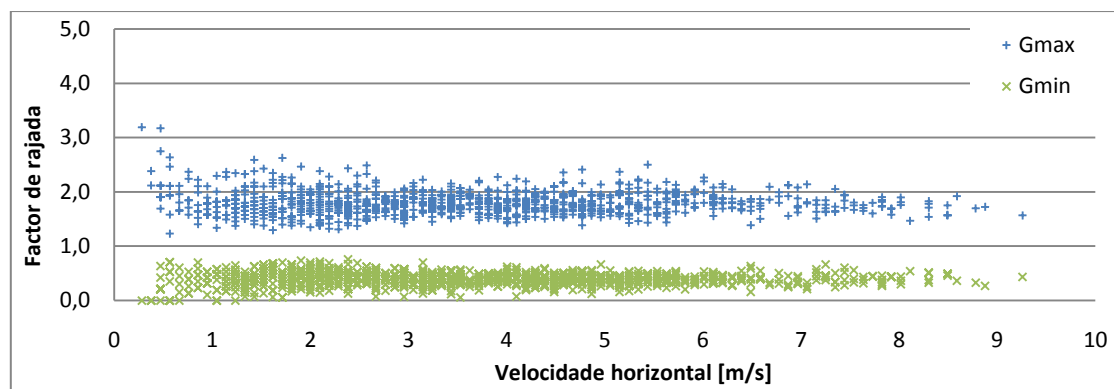


Figura F.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

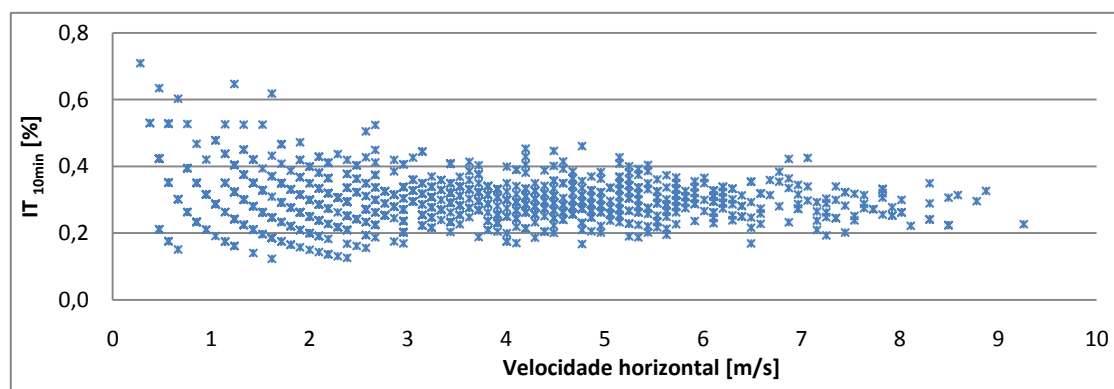


Figura F.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

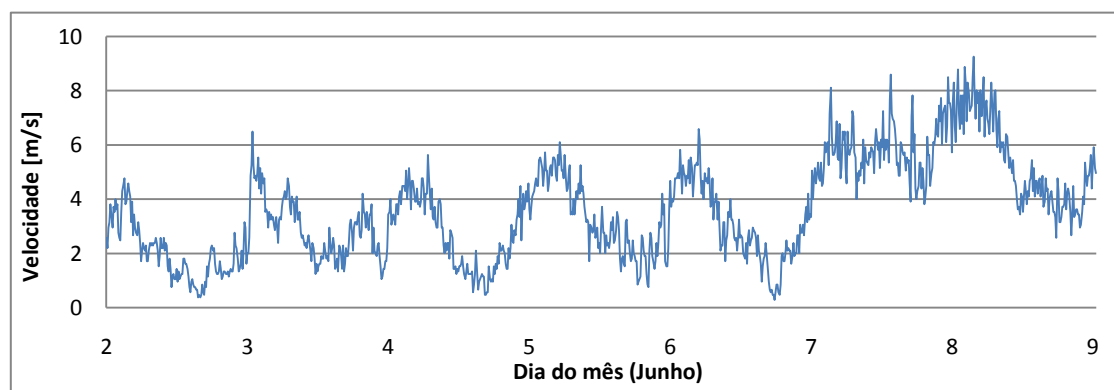


Figura F.0.6 - Velocidade média para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

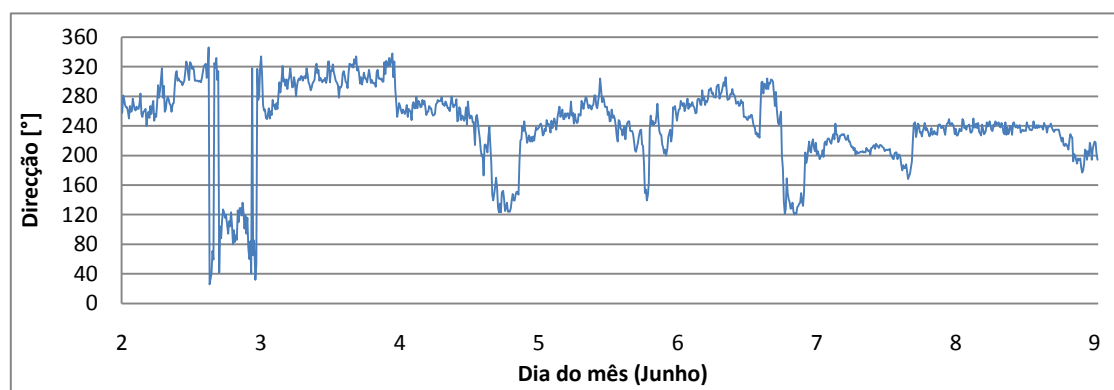


Figura F.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g2-Junho

Anexo G: Dados a 9 metros para a geometria g3

(Distância ao topo do edifício)

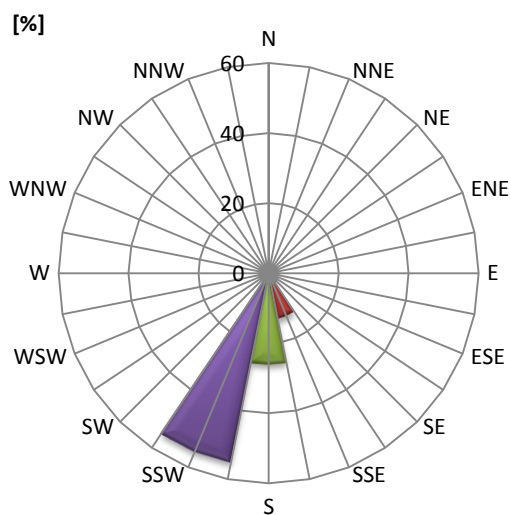


Figura G.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemómetro de copos na geometria g3

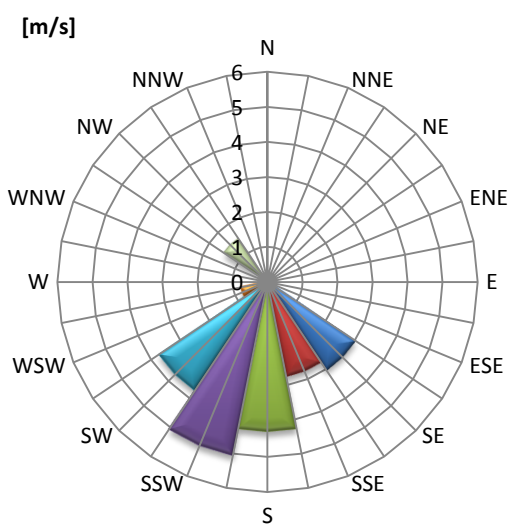


Figura G.0.2 - Rosa das velocidades para anemómetro de copos na geometria g3

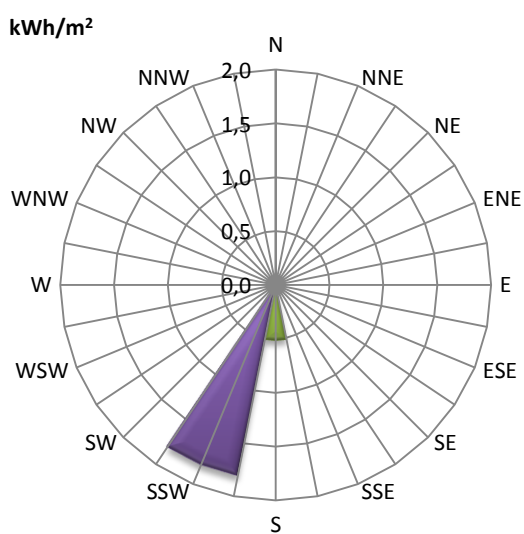


Figura G.0.3 -Rosa da energia para anemómetro de copos na geometria g3

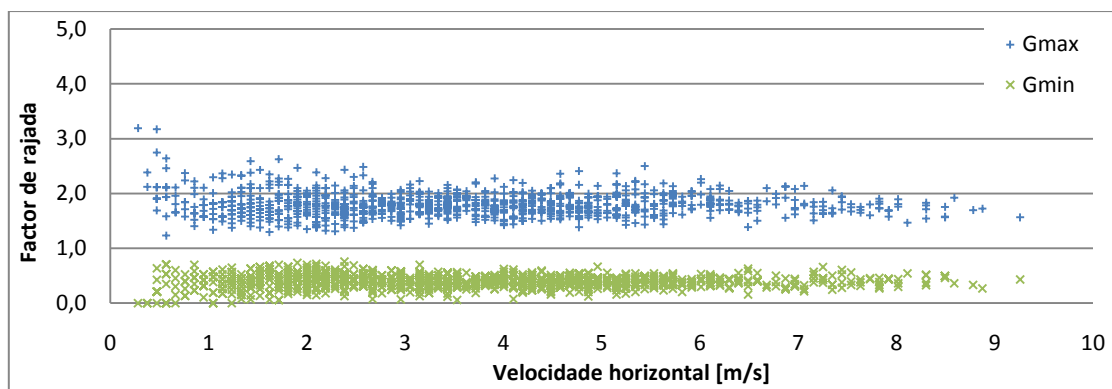


Figura G.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g3

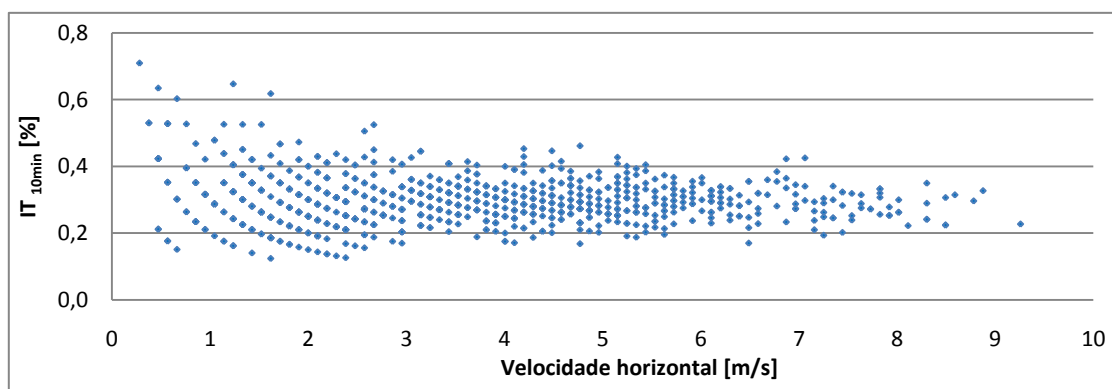


Figura G.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g3

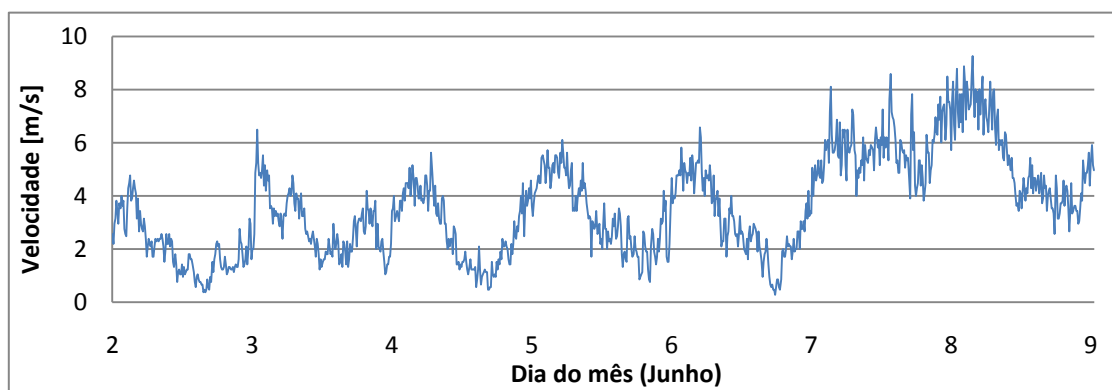


Figura G.0.6 - Velocidade média horizontal para anemómetro de copos na geometria g3

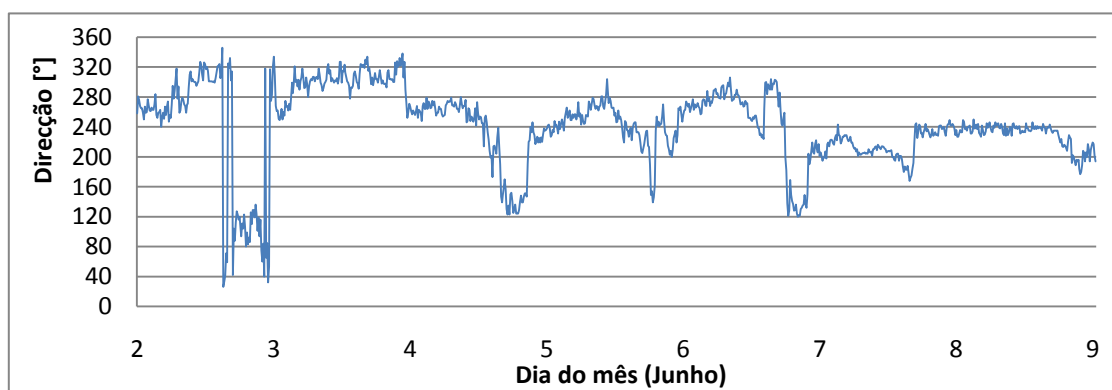


Figura G.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g3

Anexo H: Dados a 9 metros para a geometria g3SAAS02

(Distância ao topo do edifício)

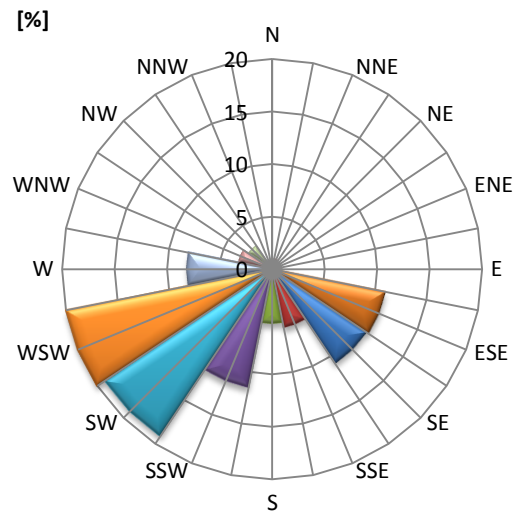


Figura H.0.1 - Rosa-dos-ventos para anemômetro de copos na geometria g3-SAAS02

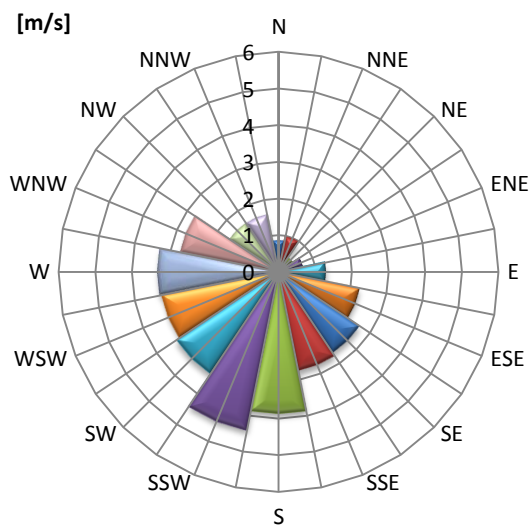


Figura H.0.2 - Rosa das velocidades para anemômetro de copos na geometria g3-SAAS02

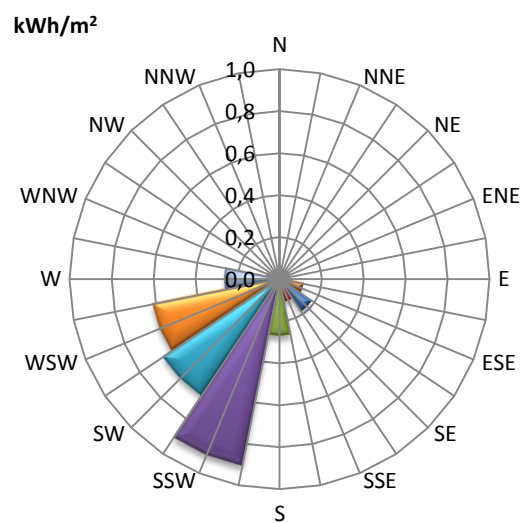


Figura H.0.3 - Rosa da energia para anemômetro de copos na geometria g3-SAAS02

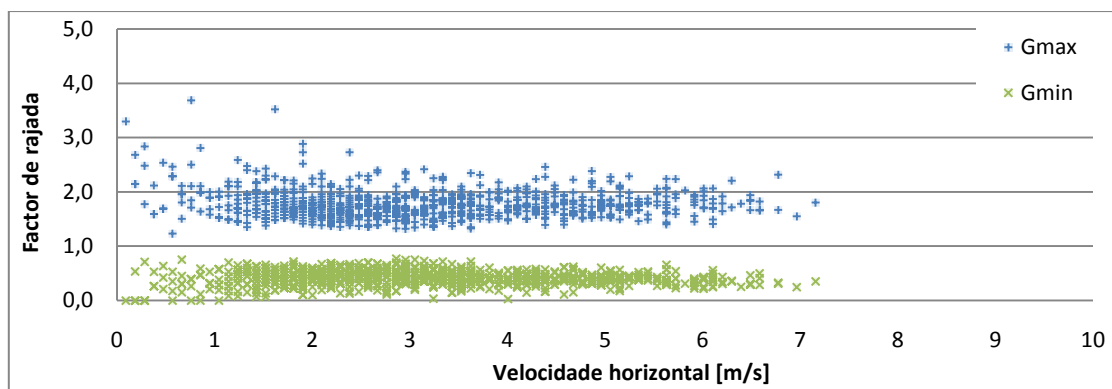


Figura H.0.4 - Factor de rajada para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02

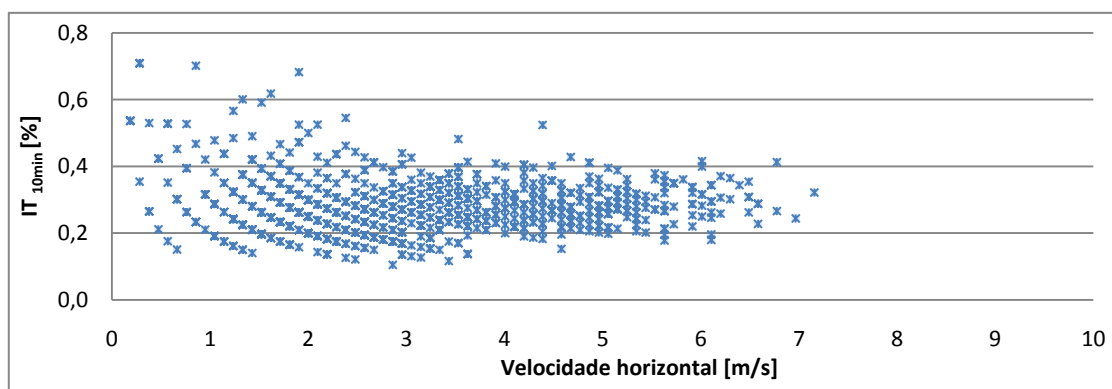


Figura H.0.5 - Intensidade de turbulência para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02

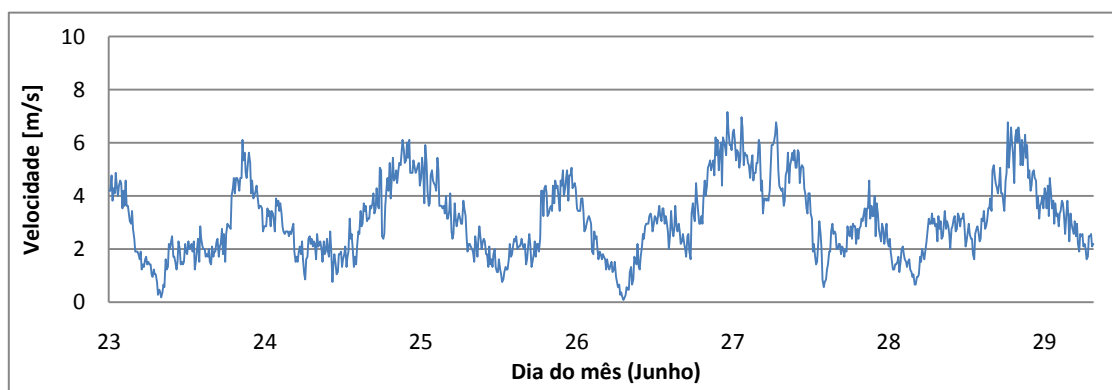


Figura H.0.6 - Velocidade média horizontal para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02

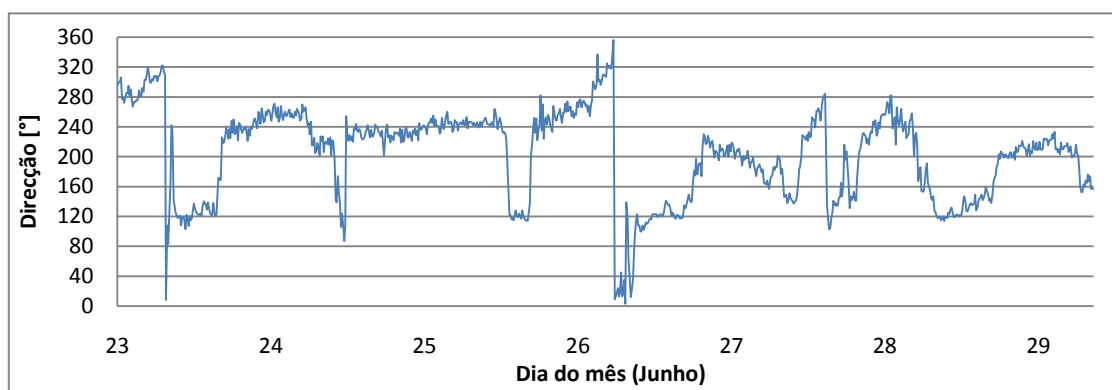


Figura H.0.7 - Direcção do vento para anemómetro de copos na geometria g3-SAAS02

Anexo I: Dados complementares para a geometria g1

Tabela I.0.1 - Análise sectorial para SAAS01 na geometria g1

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	82	8.14	1.75	358.92	34.55	2.15	0.09	12.856	40.34
2	22.50	53	5.26	1.90	21.98	31.20	2.07	0.11	15.170	32.87
3	45.00	30	2.98	1.72	45.57	29.24	2.01	0.14	14.775	24.58
4	67.50	23	2.28	1.14	67.35	30.76	2.03	0.13	12.898	-
5	90.00	19	1.89	1.43	92.29	24.03	1.82	0.30	7.303	-
6	112.50	14	1.39	1.65	114.37	25.88	1.82	0.16	14.827	-
7	135.00	22	2.18	2.57	140.20	24.88	1.80	0.19	16.444	25.09
8	157.50	35	3.48	2.48	153.65	25.86	1.88	0.18	14.177	25.41
9	180.00	20	1.99	2.27	183.55	35.09	2.26	0.09	4.382	34.56
10	202.50	63	6.26	3.86	203.23	35.46	2.20	0.07	2.064	34.54
11	225.00	62	6.16	4.15	220.91	35.41	2.20	0.07	3.705	35.51
12	247.50	44	4.37	2.36	247.32	29.59	1.98	0.15	5.478	29.68
13	270.00	57	5.66	3.41	270.86	33.12	2.07	0.08	9.514	32.22
14	292.50	100	9.93	4.09	296.85	29.38	1.96	0.15	4.849	29.33
15	315.00	280	27.81	4.00	315.04	31.00	2.03	0.12	2.558	30.33
16	337.50	103	10.23	2.16	337.21	35.54	2.22	0.08	10.908	35.78

Tabela I.0.2 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g1

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	69	6.86	1.54	358.90	38.30	2.31	0.04	14.818	33.81
2	22.50	48	4.77	1.84	22.38	33.22	2.10	0.09	13.798	37.06
3	45.00	31	3.08	1.54	44.77	32.64	2.19	0.10	12.523	26.62
4	67.50	17	1.69	1.10	67.97	33.01	2.19	0.12	13.640	-
5	90.00	23	2.29	1.20	91.35	27.66	1.97	0.17	6.597	-
6	112.50	18	1.79	1.45	113.84	28.27	1.89	0.13	14.511	-
7	135.00	22	2.19	2.07	140.28	32.80	2.14	0.07	13.629	33.89
8	157.50	32	3.18	2.23	152.88	34.82	2.18	0.04	10.614	-
9	180.00	30	2.98	2.14	182.30	39.57	2.46	0.04	2.923	37.46
10	202.50	66	6.56	3.47	204.33	42.12	2.51	0.03	2.884	40.90
11	225.00	55	5.47	3.45	221.13	42.85	2.51	0.02	5.736	41.82
12	247.50	46	4.57	2.34	246.23	32.92	2.10	0.06	1.655	31.62
13	270.00	55	5.47	3.06	269.69	36.90	2.25	0.04	4.913	35.30
14	292.50	114	11.33	3.88	296.56	32.15	2.07	0.08	4.504	31.79
15	315.00	287	28.53	3.74	313.97	32.72	2.13	0.10	4.272	31.74
16	337.50	93	9.24	1.88	338.97	37.73	2.32	0.06	10.575	39.93

Anexo J: Dados complementares para a geometria g2Maio

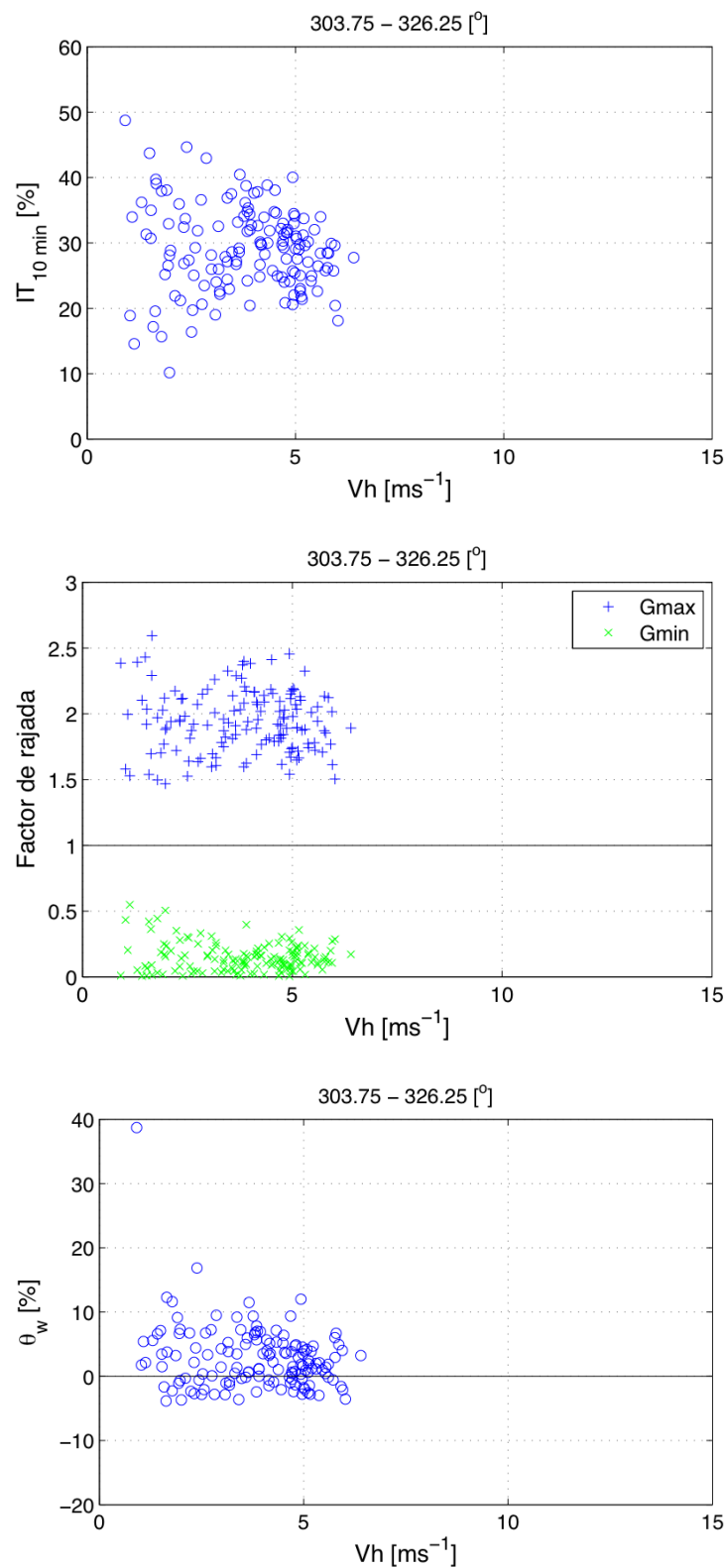


Figura J.0.1 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento NW para o SAAS01 na geometria g2-Maio

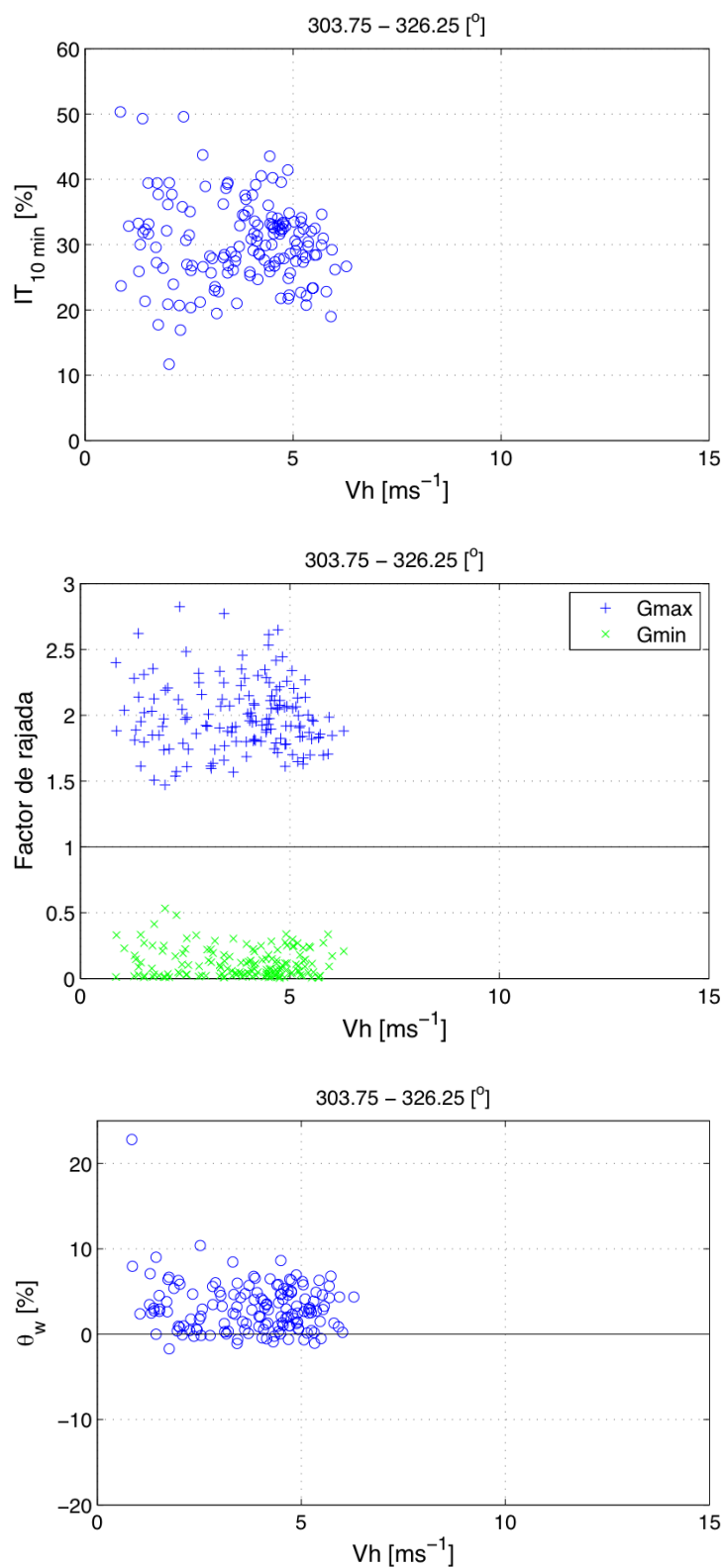


Figura J.0.2 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento NW para o SAAS02 na geometria g2-Maio

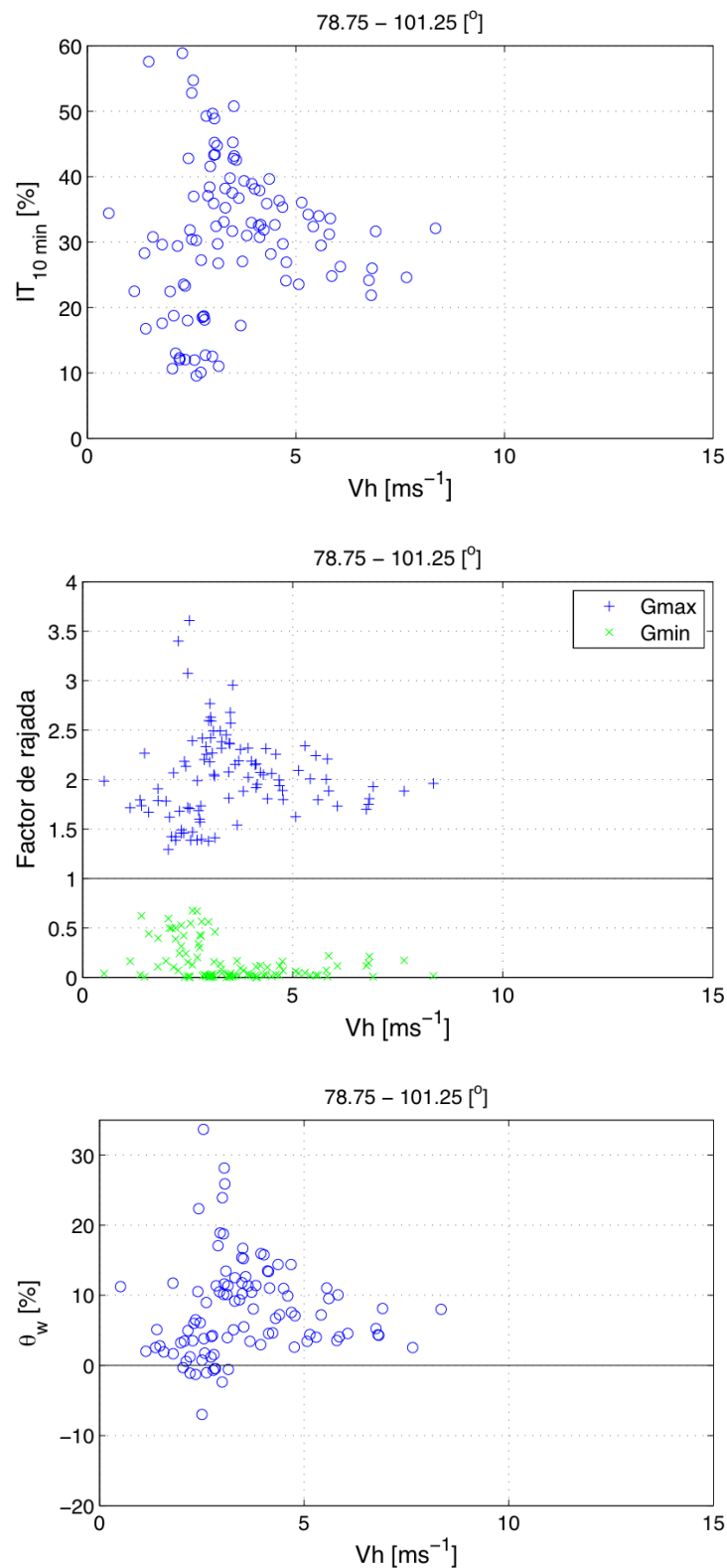


Figura J.0.3 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Este para o SAAS01 na geometria g2-Maio

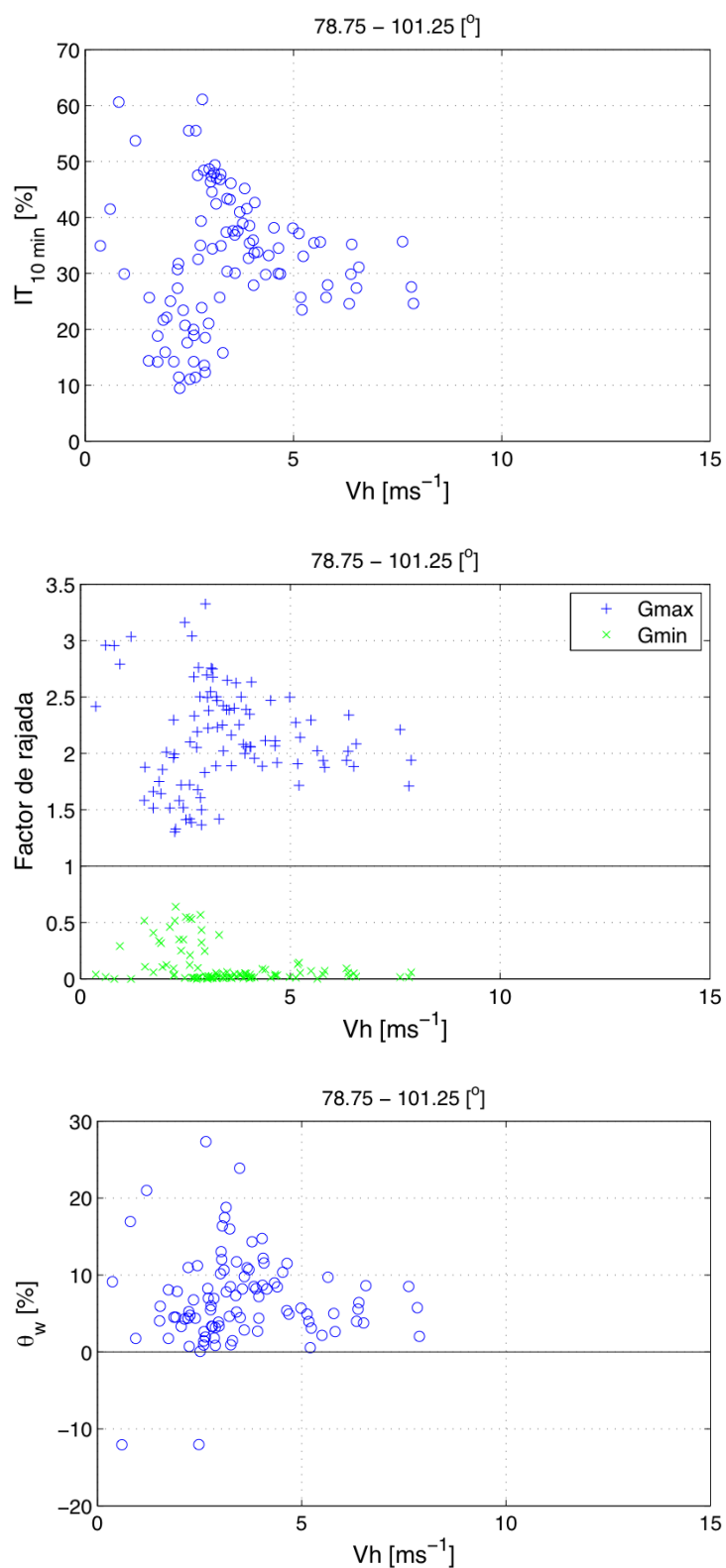


Figura J.0.4 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Este para o SAAS02 na geometria g2-Maio

Tabela J.0.1 - Análise sectorial para SAAS01 na geometria g2-Maio

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	75	9.54	2.59	358.04	32.77	2.13	0.09	9.057	34.83
2	22.50	42	5.34	2.58	20.35	33.08	2.18	0.08	9.873	30.24
3	45.00	26	3.31	1.96	45.27	32.84	2.14	0.11	11.572	34.76
4	67.50	50	6.36	2.59	68.36	33.72	2.27	0.13	11.730	36.14
5	90.00	101	12.85	3.54	92.87	30.97	2.03	0.15	7.850	33.87
6	112.50	145	18.45	4.52	111.23	27.56	1.92	0.12	9.720	27.10
7	135.00	10	1.27	3.02	128.58	28.65	1.87	0.15	11.063	20.00
8	157.50	1	0.13	1.45	152.73	32.49	1.86	0.12	13.954	-
9	180.00	3	0.38	1.58	178.40	42.04	2.42	0.03	17.237	-
10	202.50	5	0.64	1.19	204.62	39.91	2.12	0.06	9.046	-
11	225.00	12	1.53	1.35	226.15	36.85	2.07	0.09	10.555	-
12	247.50	23	2.93	2.43	251.63	29.17	1.90	0.14	6.635	28.03
13	270.00	17	2.16	3.03	272.68	30.27	1.93	0.10	7.386	29.98
14	292.50	80	10.18	4.18	296.56	31.53	1.99	0.10	6.924	30.93
15	315.00	144	18.32	3.84	315.60	29.10	1.94	0.15	2.740	29.08
16	337.50	52	6.62	2.44	338.65	35.65	2.20	0.06	10.243	38.97

Tabela J.0.2 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g2-Maio

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	71	9.03	2.48	358.85	35.48	2.30	0.06	7.195	38.26
2	22.50	37	4.71	2.19	21.32	34.90	2.26	0.07	7.862	34.10
3	45.00	23	2.93	2.31	43.78	36.19	2.29	0.12	8.578	32.47
4	67.50	52	6.62	2.54	68.05	33.29	2.25	0.11	9.766	35.41
5	90.00	98	12.47	3.49	93.63	32.52	2.13	0.11	6.841	35.68
6	112.50	151	19.21	4.24	110.60	29.77	2.00	0.07	7.380	30.33
7	135.00	10	1.27	3.31	128.26	36.32	2.20	0.05	8.591	26.90
8	157.50	4	0.51	1.34	157.99	54.85	2.99	0.02	10.986	-
9	180.00	2	0.25	1.08	184.34	43.66	2.45	0.01	3.217	-
10	202.50	3	0.38	1.21	206.55	41.21	2.22	0.04	6.306	-
11	225.00	12	1.53	1.11	224.81	45.36	2.35	0.02	13.062	-
12	247.50	24	3.05	2.25	248.62	32.78	2.03	0.07	4.652	33.32
13	270.00	19	2.42	2.58	270.19	38.24	2.12	0.04	3.091	33.86
14	292.50	74	9.41	3.94	295.76	33.70	2.08	0.05	5.193	33.08
15	315.00	151	19.21	3.81	313.74	30.30	1.99	0.12	3.073	30.11
16	337.50	55	7.00	2.29	339.58	37.45	2.31	0.07	7.891	41.45}

Anexo L: Dados complementares para a geometria g2Junho

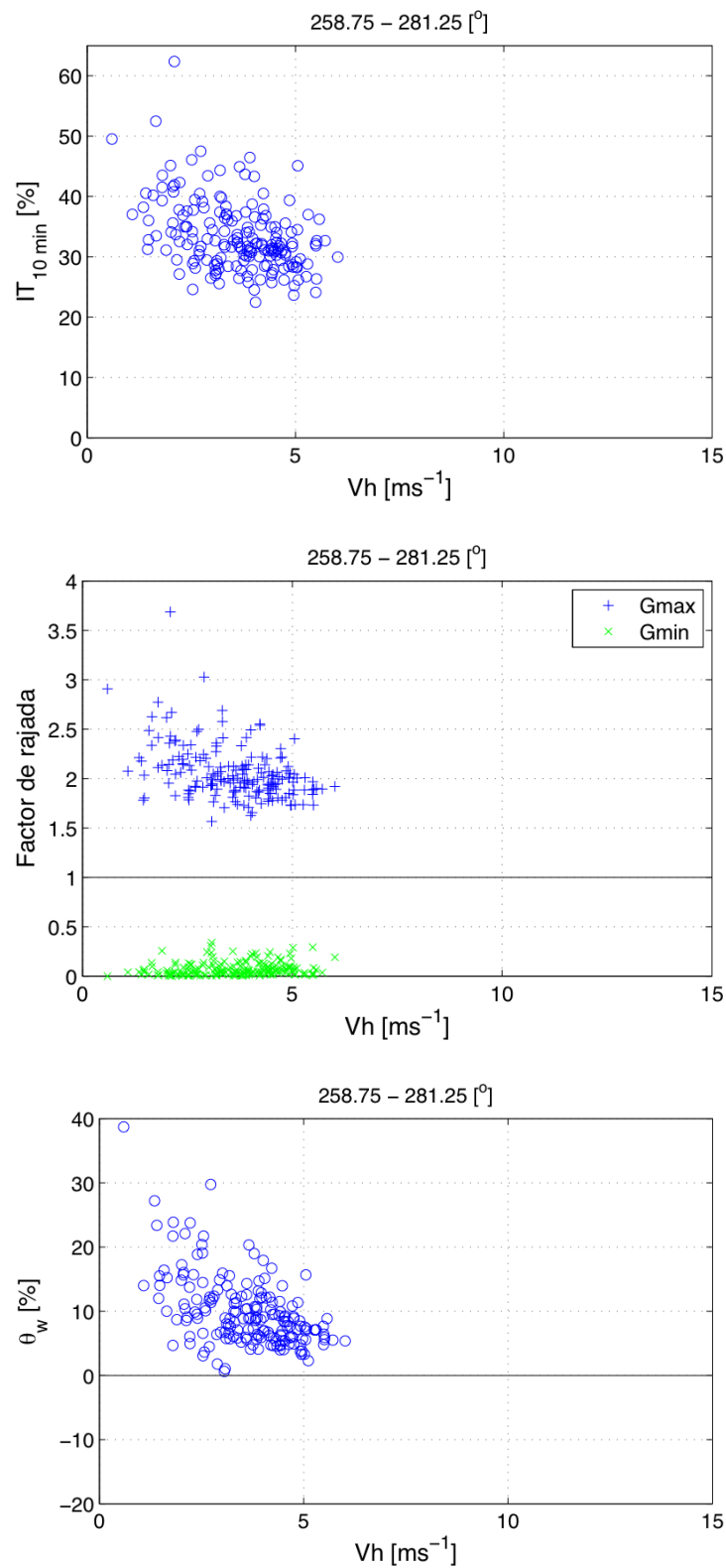


Figura L.0.1 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Oeste para o SAAS01 na geometria g2-Junho

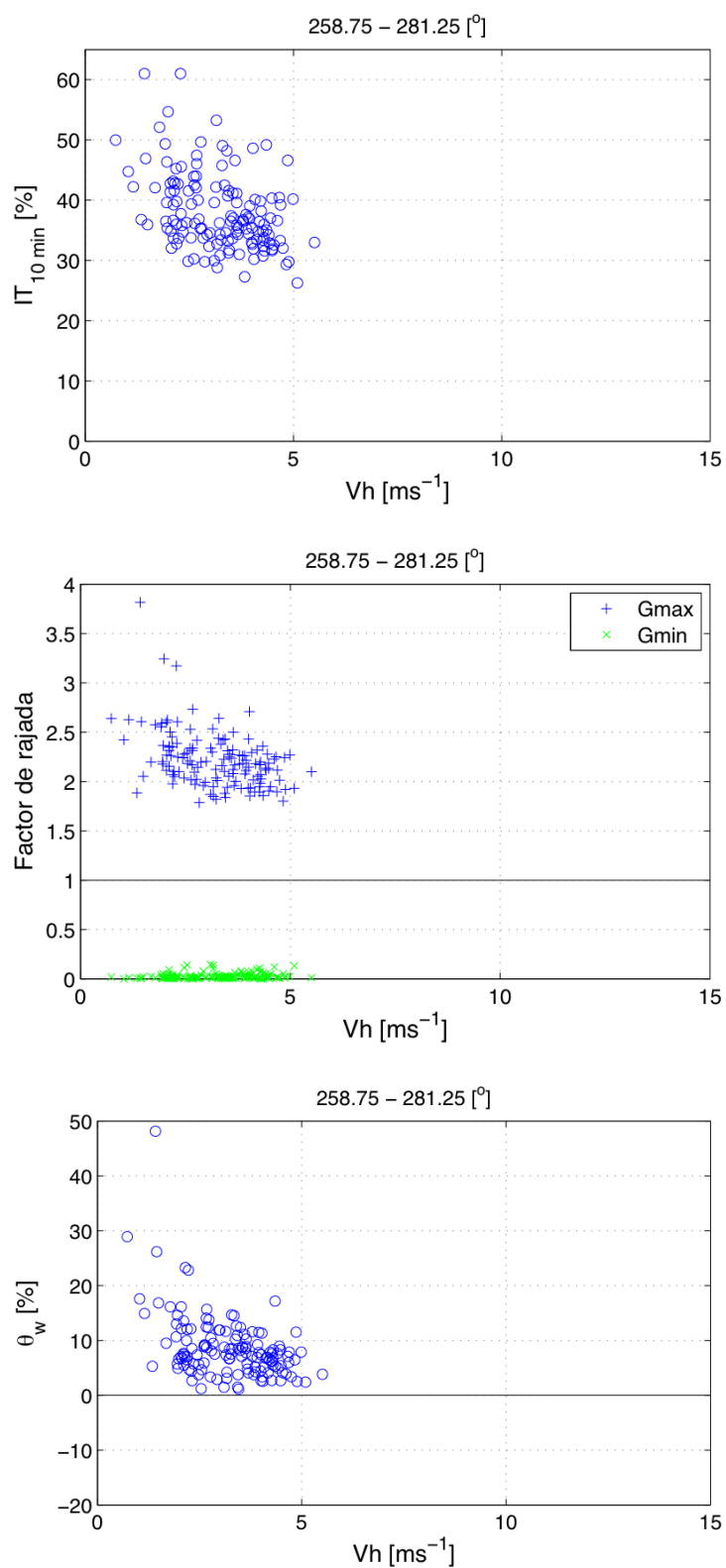


Figura L.0.2 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para vento Oeste para o SAAS02 na geometria g2-Junho

Tabela L.0.1 - Análise sectorial para SAAS01 na geometria g2-Junho

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	0	0.00	-	-	-	-	-	-	-
2	22.50	2	0.20	0.86	27.87	37.41	1.95	0.02	33.187	-
3	45.00	5	0.50	1.36	45.01	34.20	2.09	0.03	11.345	-
4	67.50	5	0.50	1.46	71.76	46.85	2.48	0.02	24.525	-
5	90.00	8	0.80	1.56	91.69	41.90	2.17	0.05	18.179	-
6	112.50	14	1.39	1.47	113.90	29.22	1.95	0.09	15.314	-
7	135.00	40	3.98	1.73	134.56	26.36	1.85	0.13	15.412	-
8	157.50	23	2.29	1.39	155.14	32.24	1.97	0.11	15.007	-
9	180.00	15	1.49	3.69	183.15	36.54	2.43	0.07	7.649	34.07
10	202.50	87	8.67	4.31	205.88	36.25	2.22	0.07	1.959	36.06
11	225.00	156	15.54	4.27	227.17	35.35	2.17	0.08	4.227	34.93
12	247.50	246	24.50	4.47	246.73	30.37	1.97	0.12	5.220	30.72
13	270.00	186	18.53	3.61	269.07	33.40	2.06	0.07	9.848	31.98
14	292.50	113	11.25	2.86	295.27	30.62	1.99	0.14	7.155	30.95
15	315.00	94	9.36	2.27	312.65	30.28	1.95	0.15	4.649	29.22
16	337.50	10	1.00	1.65	333.73	38.23	2.15	0.06	14.330	-

Tabela L.0.2 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g2-Junho

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	1	0.10	0.85	355.63	40.38	2.18	0.03	14.492	-
2	22.50	4	0.40	1.14	29.06	39.86	2.58	0.08	22.897	-
3	45.00	3	0.30	1.31	45.43	32.04	2.21	0.09	1.642	-
4	67.50	6	0.60	1.47	70.31	50.20	2.70	0.01	14.780	-
5	90.00	9	0.90	1.50	88.83	43.43	2.27	0.02	16.461	-
6	112.50	12	1.20	1.30	113.51	36.46	2.22	0.03	8.633	-
7	135.00	45	4.49	1.56	134.18	34.19	2.13	0.04	10.246	-
8	157.50	19	1.90	1.27	154.79	38.64	2.34	0.05	10.649	-
9	180.00	19	1.90	3.21	180.69	37.85	2.54	0.05	1.285	38.49
10	202.50	96	9.58	3.63	204.69	43.00	2.54	0.03	5.142	42.37
11	225.00	150	14.97	3.80	226.83	40.91	2.44	0.03	7.211	40.32
12	247.50	295	29.44	3.85	246.57	35.63	2.19	0.05	5.897	35.28
13	270.00	140	13.97	3.23	267.88	38.04	2.22	0.03	8.607	36.32
14	292.50	101	10.08	2.68	295.89	33.25	2.10	0.09	4.960	32.97
15	315.00	93	9.28	2.19	312.22	31.33	1.99	0.14	3.699	29.82
16	337.50	9	0.90	1.34	333.43	43.83	2.50	0.03	21.436	-

Anexo M: Dados complementares para a geometria g3SAAS02

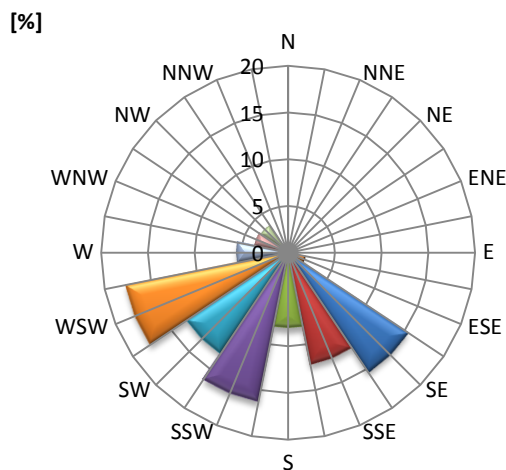


Figura M.0.1 - Rosa-dos-ventos para SAAS02 na geometria g3-SAAS02

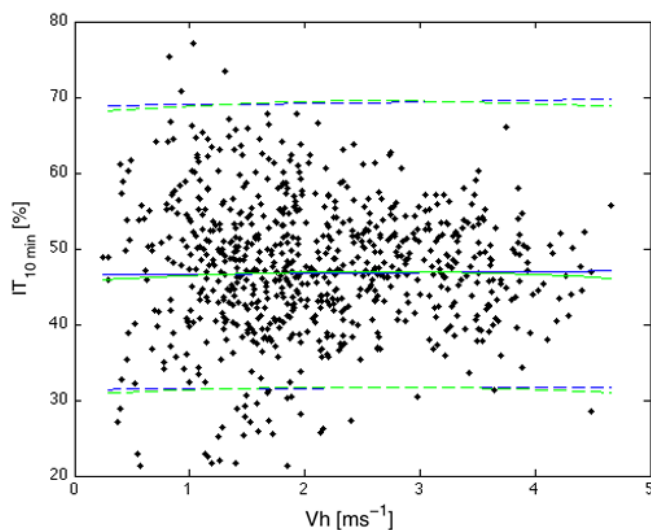


Figura M.0.2 - Turbulência global para dados do SAAS02 na geometria g3-SAAS02

Tabela M.0.1 - Análise sectorial para SAAS02 na geometria g3-SAAS02

Número	Sector	N.Ocor	Freq[%]	Vh[m/s]	Dir[°]	TI[%]	Gmax	Gmin	Incl[%]	TI(3)[%]
1	0.00	3	0.40	0.65	2.53	34.98	2.21	0.03	32.271	-
2	22.50	7	0.93	0.92	20.67	31.91	2.14	0.06	27.587	-
3	45.00	4	0.53	0.55	43.97	38.73	2.41	0.08	27.884	-
4	67.50	3	0.40	0.80	70.86	35.51	2.05	0.17	21.450	-
5	90.00	3	0.40	1.02	96.48	51.95	2.67	0.01	22.553	-
6	112.50	14	1.85	1.22	114.29	43.08	2.49	0.02	17.655	-
7	135.00	116	15.36	1.65	132.66	46.08	2.65	0.01	21.632	-
8	157.50	92	12.19	1.80	156.31	47.98	2.89	0.01	27.964	46.34
9	180.00	61	8.08	2.31	180.75	48.64	3.05	0.01	25.228	47.02
10	202.50	123	16.29	2.82	202.74	51.97	3.08	0.01	21.413	51.12
11	225.00	98	12.98	2.16	224.56	52.09	3.02	0.01	25.595	48.19
12	247.50	133	17.62	2.09	244.17	49.03	2.85	0.01	21.456	44.76
13	270.00	41	5.43	2.65	269.04	45.10	2.54	0.01	20.650	41.06
14	292.50	27	3.58	2.26	296.25	37.00	2.23	0.03	22.244	36.13
15	315.00	26	3.44	1.87	307.62	30.06	1.96	0.09	20.254	37.44
16	337.50	4	0.53	0.74	340.36	50.83	2.68	0.00	34.861	-

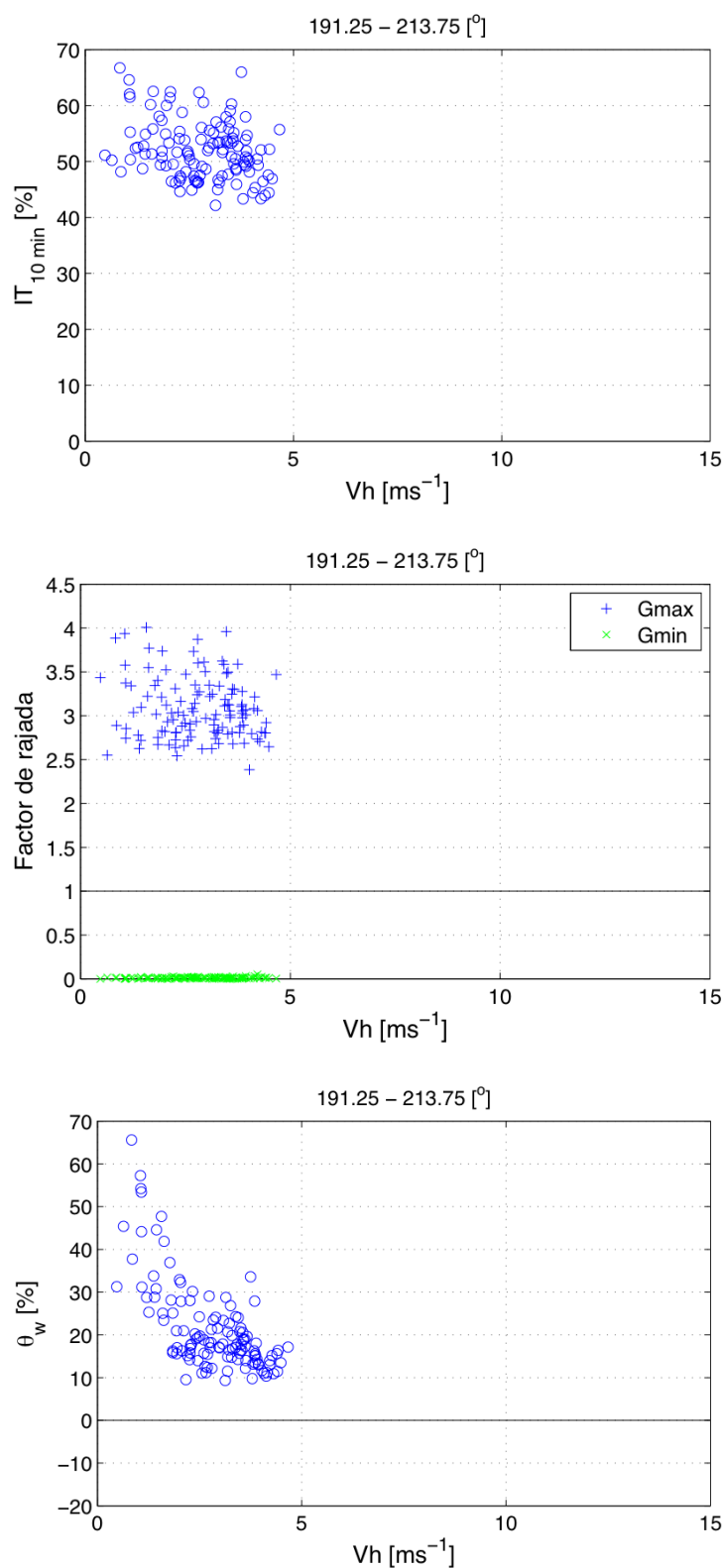


Figura M.0.3 - Intensidade de turbulência, factor de rajada e inclinação do escoamento para sector SSW para o SAAS02 na geometria g3-SAAS02

Anexo N: Campos de velocidade e turbulência calculados pelo Fluent®

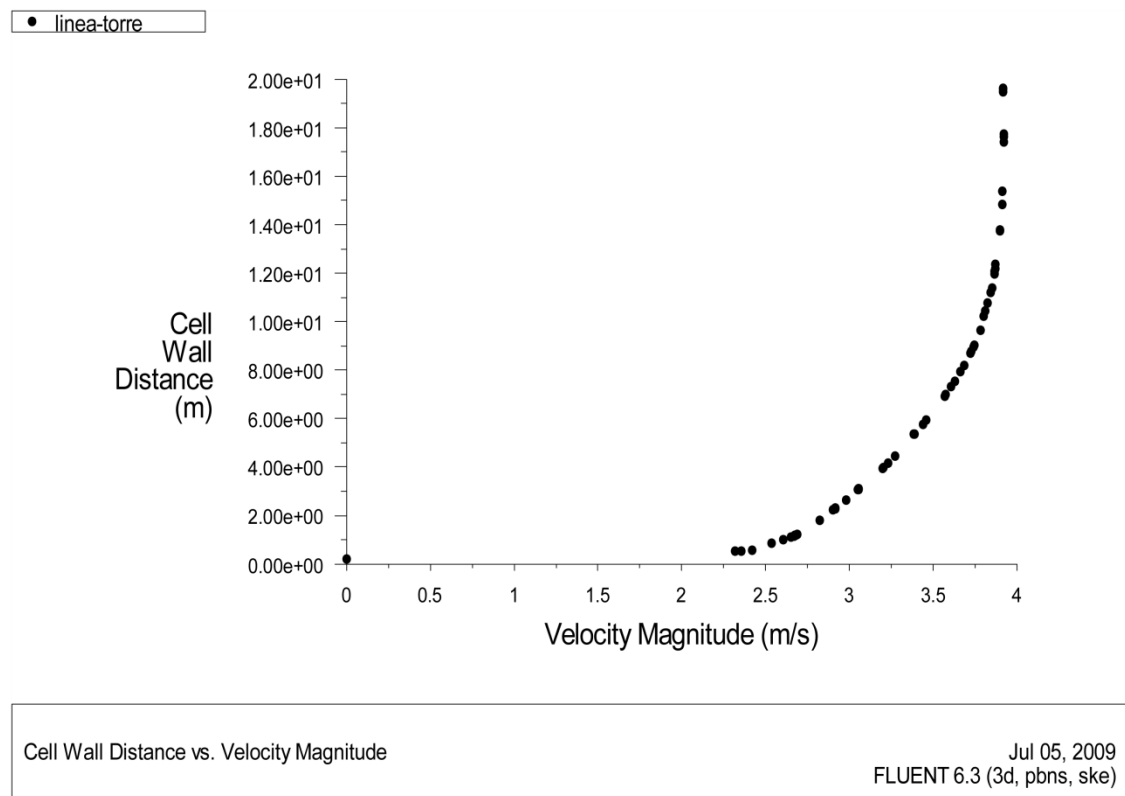


Figura N.0.1 - Perfil de velocidade para simulação do sector SSW

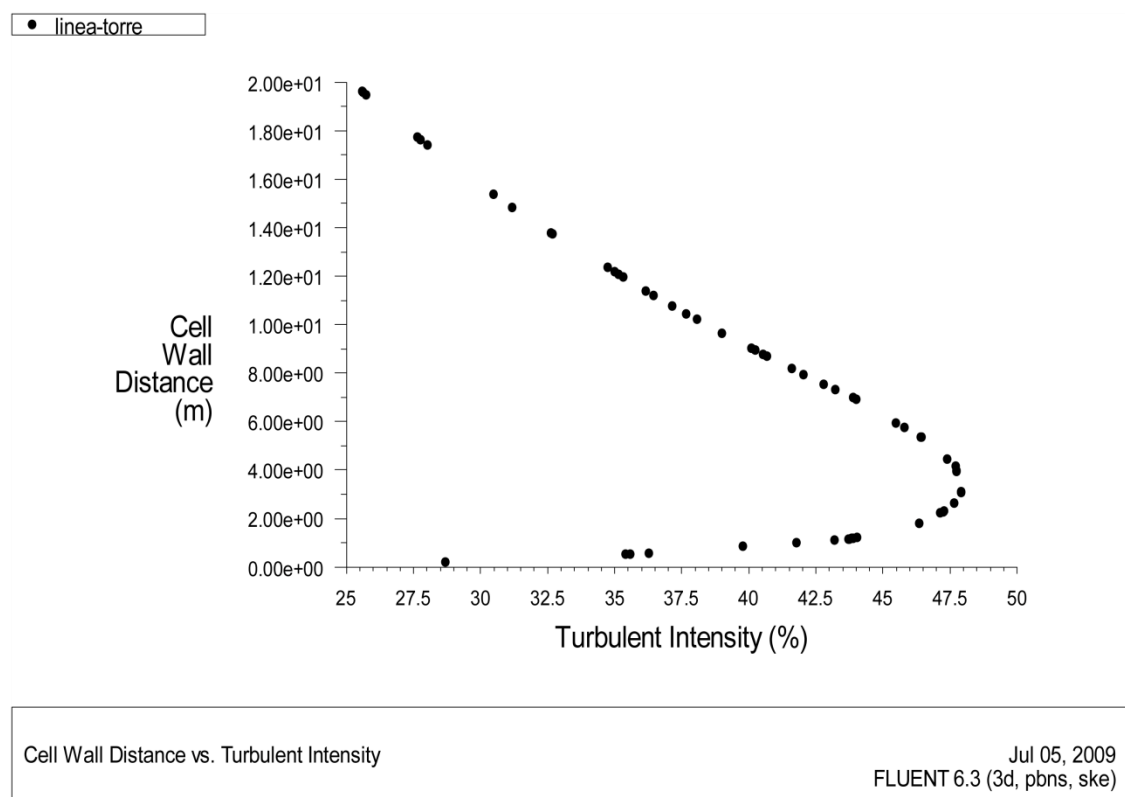


Figura N.0.2 - Perfil de turbulência para simulação do sector SSW

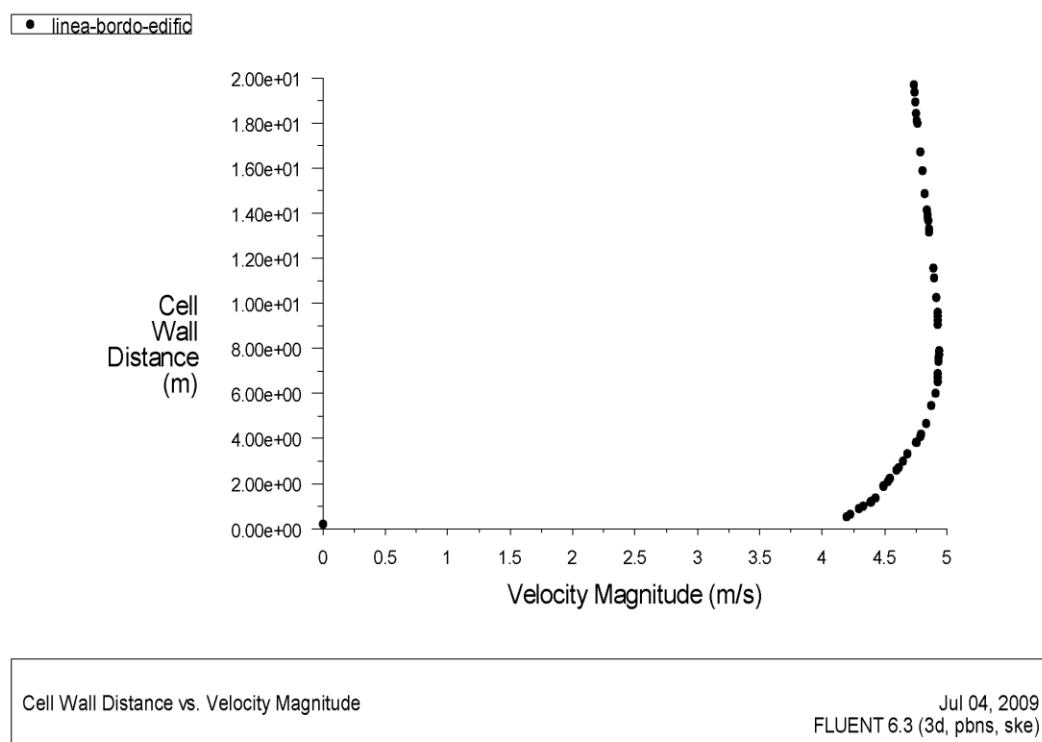


Figura N.0.3 - Perfil de velocidade para simulação do sector NW

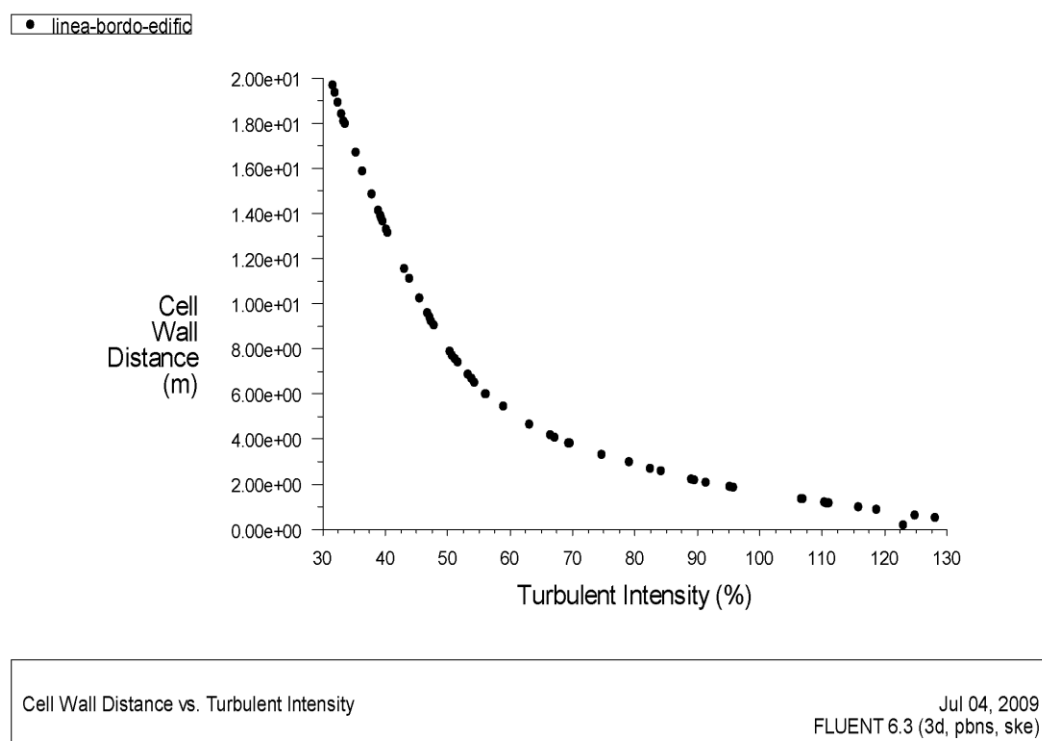


Figura N.0.4 - Perfil de turbulência para simulação do sector NW

Anexo O: Procedimento de calibração

0.1 Verificar valores de velocidade

Os valores de velocidade lidos pelo sónico em ar estagnado devem ser, teoricamente, nulos. Contudo, tal situação raramente se verifica devido à dificuldade de se garantir velocidade nula do ar.

Para se garantir uma velocidade do ar aproximadamente nula, cobre-se o anemómetro com uma bolsa em tecido espesso e pouco permeável.

O valor de velocidade lido nas diversas componentes em tais condições não deve ultrapassar os 10 cm/s.

0.2 Iniciar calibração

No caso de o anemómetro ter aquecimento dos sensores, este deve ser desligado antes de se proceder à calibração. Para tal deve introduzir-se a instrução HT=0 e esperar-se que os sensores atinjam a temperatura ambiente.

Deve alterar-se o modo de trabalho do anemómetro para modo de serviço com recurso ao comando SV (Service Mode).

SV ↵

0.3 Efectuar medições

As distâncias P1, P2 e P3 podem ser obtidas por medição directa das distâncias entre sensores com recurso a um Calliper.

À distância medida devem adicionar-se sempre 10 mm e no caso de não se conseguir medir directamente entre as superfícies dos sensores, deve acrescentar-se ainda 1 mm devido às lentes de silicone (0,5 mm para cada uma). A temperatura TC deve ser medida com recurso a um termómetro.

As distâncias P1, P2 e P3 podem ser identificadas no topo do anemómetro.

0.4 Introduzir valores

A introdução dos valores deve ser feita em unidades de 0.1 mm para as distâncias P1, P2 e P3 e no caso da temperatura TC, em unidade de 0.01 °K.

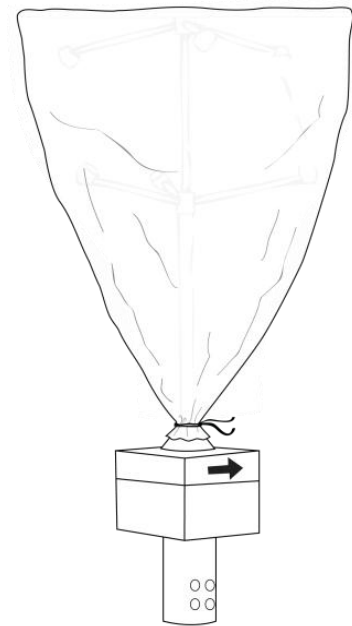


Figura O.0.1 - Anemómetro sónico coberto para simulação de velocidade nula.

Por exemplo para $P1=175.0$ mm, $P2=176.0$ mm, $P3=175.5$ mm e $TC=283.50$ °K.

$P1=1750$ º

$P2=1760$ º

$P3=1755$ º

$TC=28350$ º

CA º

Resultado

... done ou ...failed

No caso do resultado ser *done* a calibração foi concluída com sucesso! Caso seja *failed* deve retomar-se o ponto O.3 deste anexo.

0.5 Verificar valores

Caso os valores de velocidade em ar estagnado e depois da calibração sejam menores que 10 cm/s considera-se a calibração aceitável. Caso tal não se verifique, deve retomar-se o ponto O.2 deste anexo.

Anexo P: Data logger Ammonit

Technical Data

Data Logger Series 32			
	P2500 WICOM-32	P2510 METEO-32	P2520 METEO-32X
Input channels	3 x Wind speed 2 x Wind direction	3 x Wind speed 2 x Wind direction 1 x Rel. air humidity 1 x Air temperature 1 x Air pressure 1 x Global radiation 1 x Rain	3 x Wind speed 2 x Wind direction 1 x Rel. air humidity 1 x Air temperature 1 x Air pressure 1 x Global radiation 1 x Rain 4 x 12-bit-ADC 2 x 16-bit Counter 2 x Status
Housing - Protection - Dimensions - Weight - Connectors	IP65, connectors IP67 (closed) 120mm x 200mm x 75mm approx. 1.2 kg (incl. batteries) screwed miniature round-socket, Binder series 723		
Power Supply - Operation: - External - Current	2 alkaline batteries (9V E-Block - 6LR61 - PP3), optional lithium batteries input 12 VDC 10...24 Volt (connector supplied) approx.: 0,5 mA (between the measurements), 45 mA (measuring)		
Temperature - Operation - Display readable	- 40°C ... + 85°C - 10°C ... + 50°C Before being delivered to the customer, each appliance must pass a 24-hour test at temperatures from -30° to +60°C		
Memory	1000 KByte non-volatile-memory (EEPROM) recorded 500.000 values.		
Clock Backup battery	Buffered real time clock, error at -30°C ... +60°C: < 25ppm 3V lithium button cells CR2032, approx. 180...230mAh		
Digital output	Open-Drain, 12 ... 24VDC, approx. 20mA, e.g. can switch on or off a sensor heating via relay (also via SMS)		
Data output	Display: 2 x 16 character double spaced, RS232 serial: 38.400 baud, E71 ASCII		
Series measurements - Scan interval - Log interval - Configuration - Functions	1 ... 60 seconds 1 ... 9999 scan intervals Ring memory, subdivided in daily data blocks Average, maximum, minimum, standard deviation		
Statistics - Scan interval - Log interval - Configuration - Evaluation	1 minute Monthly according to real time calendar Shift register, subdivided in 4 statistic blocks 29 classes ±1 m/s wind speed distribution (in 2 heights) 36 sector wind rose with unique distributions (anemometer 1)		
SMR - Scan interval - Memory capacity - Configuration	1 ... 60 seconds 180 Measurement lines separatel non-volatile memory		
Included delivery	User's manual, Batteries, Drying agent, PC-cable, 3 pin plug (ext. supply), CALLaLOG2002 Software.		
Recommended sensors - Wind speed - Wind direction - Temperature - Temp./ Humidity - Air pressure - Precipitation	P6100(H), P6171, P6140, P6160 (mit Adapter P9112) P6200(H),P6230(H),P6240,P6245	P6100(H), P6171, P6140, P6160 (mit Adapter P9112) P6200(H), P6230(H), P6240, P6245 P6471 P6831 P6520, P6542 P6720, P6721	

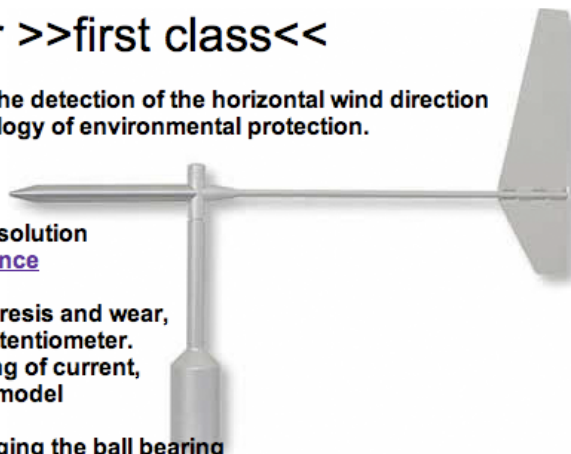
Anexo Q: Ficha técnica do sensor de direcção

Wind Direction Sensor >>first class<<

The wind direction transmitter serves for the detection of the horizontal wind direction in the field of meteorology and the technology of environmental protection.

Special characteristics:

- High level of measuring accuracy and resolution
- High damping ratio at a small delay distance
- Low starting threshold
- Magnetic coupling, which is free of hysteresis and wear, situated between the axis of vane and potentiometer.
- Electronic protective circuit for the limiting of current, and against erroneous connection, with model 4.3150.x0.110 und 4.3150.x0.012
- Easy removal, and mounting when changing the ball bearing



An electronically-regulated heating system has been installed with the wind direction sensor for winter operation in order to prevent the ball-bearing and the external rotation parts from freezing. Power supply for the heating system could be provided for instance by our Power Supply Unit, order-no. 9.3388.00.000.

Mode of operation

The dynamic characteristics of the wind vane is achieved by the aluminum light-weight construction. The co-action of wind vane and balance weight results in a high damping ratio with small delay distance as excellent characteristic of the complete vane.

The axis of the wind vane is running in ball bearings, and is coupled, in contact less magnetic manner, with the axis of the integrated potentiometer. Thus, clearance and friction in the coupling are avoided, and an easy starting is guaranteed.

An AC- or DC-voltage of 24 V is intended for the separate supply of the optional heating. In all probability, the heating guarantees a trouble-free function of the Wind Direction Transmitter First Class even under extreme meteorological icing-conditions.

The outer parts of the instrument are made of corrosion-resistant anodized aluminum, and stainless steel. Highly effective labyrinth gaskets and O-rings protect the sensitive parts inside the instrument against humidity and dust.

Order-No. 4.3150.xx.xxx

.00.xxx with heating

.10.xxx without heating

.xx.000 Digital output: 8 bit Thies serial, resolution: 2,5 ° (for Thies datalogger)

.xx.001 Digital output: 10 bit Thies serial, resolution: 0,35°

.xx.400 Digital output: 12 bit serial telegram, RS 458, resolution: 0,01 °

.xx.012 Potentiometer: 0 ... 2 k with 50 ohms protection

.xx.110 Potentiometer: 0 ... 10k with 50 ohms protection

.xx.212 Potentiometer: 0 ... 2k without protection

.xx.210 Potentiometer: 0 ... 10k without protection

.xx.140 Analogue output: 0 ... 360° ~ 0 ... 20 mA

.xx.141 Analogue output: 0 ... 360° ~ 4 ... 20 mA

.xx.161 Analogue output: 0 ... 360° ~ 0 ... 10 V

Measuring range	0 ... 360 °
Measuring Accuracy	0,25% (1°)
Survival speed	85 m/s up to 0,5 h (without damages)
Permissible ambient conditions for operation	-50 ... +80°C all occurring situations of rel. humidity incl. dew moistening
Electrical output	Potentiometer 10 k An electronic protective circuit avoids an overloading of the potentiometer in case of erroneous connection, and on transition from 0° to 360 °. The protective circuit represents a series resistance of 500 ohms, however it limits the short-circuit-current on transition from 0° to 360 ° (and vice versa) to < 2,5 mA..
Linearity	0,25% (1°)
Starting threshold	< 0,5 m/s at 10° amplitude
Delay distance	< 1 m (nach ASTM D 53666 – 96)
Damping ratio	D > 0,25 (acc. to ASTM D 53666 – 96)
Quality factor	K > 1
	$K = \frac{4 \cdot D \cdot \omega_0}{\rho \cdot u}$
	D damping ratio,
	ω_0 angular frequency of undamped oscillation,
	ρ air density
	u wind speed
Heating	Surface temperature of housing neck > 0 °C at 20 m/s up to –10 °C air temperature, at 10 m/s up to –20 °C, using the Thies icing standard 012002 on the housing neck. Heating regulated with temperature sensor
Electrical supply for Potentiometer	Voltage: 4 DC – 42 V DC (galvanic isolation from housing); current: <2,5 mA on transition from 0-360 ° and 360 –0°; series resistance: 500 ohms (representative)
Electrical supply for heating	voltage: 24V AC/DC (galvanic isolation from the housing); Capacity: 25 W
Connection	8-pole plug connection for shielded cable in the shaft
Montage	Mounting on mast 1", for ex. DIN 2441 1½ " with separate adaptor (option)
Weight	approx. 0,7 kg
Protection	IP 55 (DIN 40050)
EMC	EN 61000-6-2:2001 (immunity) EN 55022:2001, Class B (interfering transmission)

Anexo R: Ficha técnica do anemómetro de copos

Wind Sensor >>first class advanced<<

For site assessment and measurement of power performance of wind energy power plants.
Class A, B and S accredited according to
IEC 61400-12-1 (2005-12) ISO 17713-1,
Measnet; Classcup

- High quality anemometer class 0.5
- Optimised dynamic behaviour even at high turbulence intensity
- minimum over-speeding
- excellent linearity $r > 0,99999$
- low power
- high survival speed
- excellent price performance ratio

patented design EP 1 489 427, DE 103 27 632, EP 1 398 637



1.Application

The wind transmitter is designed for the acquisition of the horizontal component of the wind speed in the fields of meteorology and environmental measuring technology. The measuring value is available at the outputs in digital form. It can be transmitted to display instruments, recording instruments, dataloggers, as well as to process control systems. For winter operation the instrument is equipped with an electronically regulated heating, which guarantees a smooth running of the ball bearings, and prevents the shaft and slot from icing-up.

2. Construction and Mode of Operation

A low-inertia cup star with 3 cups, made of carbon-fibre-reinforced plastic, is set into rotation by the wind. The rotation is scanned opto-electronically, and is converted into a square wave signal. The frequency of this signal is proportional to the number of rotations. Depending on the supply voltage, the output signal ranges between maximal output voltage and ground or a potential (life-zero), lifted by approx. 1,2 V. The supply of the electronics can be done by DC-voltage of 3,3 V up to 42 V at a very low current consumption. An AC- or DC-voltage of 24 V is intended for the separate supply of the optional heating. In all probability, the heating guarantees a trouble-free function of the Wind Transmitter First Class even under extreme meteorological icing-conditions.

The outer parts of the instrument are made of corrosion-resistant anodised aluminium. Highly effective labyrinth gaskets and O-rings protect the sensitive parts inside the instrument against humidity and dust. The instrument is mounted onto a mast tube; the electrical plug-connection is located in the transmitter shaft.

Order-No. 4.3150.xx.xxx

- .00.xxx** with heating
- .10.xxx** without heating
- .xx.000** Digital output: 8 bit Thies serial, resolution: 2,5 ° (for Thies datalogger)
- .xx.001** Digital output: 10 bit Thies serial, resolution: 0,35°
- .xx.400** Digital output: 12 bit serial telegram, RS 458, resolution: 0,01 °
- .xx.012** Potentiometer: 0 ... 2 k with 50 ohms protection
- .xx.110** Potentiometer: 0 ... 10k with 50 ohms protection
- .xx.212** Potentiometer: 0 ... 2k without protection
- .xx.210** Potentiometer: 0 ... 10k without protection
- .xx.140** Analogue output: 0 ... 360° ~ 0 ... 20 mA
- .xx.141** Analogue output: 0 ... 360° ~ 4 ... 20 mA
- .xx.161** Analogue output: 0 ... 360° ~ 0 ... 10 V

Technical Data	
Meas. range	0,3...75 m/s
Meas. instability (w/o calibration)	0,3...50 m/s < 1% of meas. value or < 0,2 m/s
Survival speed	80 m/s (min. 30 minutes)
Permissible Ambient condit.	-50...+80 °C, all occurring situations of relative humidity (incl. dew moistening)
Output signal	
Form	rectangle
Frequency	1082 Hz @ 50 m/s
Amplitude	is supply voltage, max. 15 V
Load	R > 1 kΩ (Push-pull output with 220 Ω in series) C < 200 nF (corresp. to length typical cable < 1km)
Linearity	Correlation factor r between frequency and wind speed y = 0,0462*f + 0,21 typical r > 0.999 99 (4...20 m/s)
Starting velocity	< 0,3 m/s
Resolution	0,05 m <u>wind run</u>
Distance constant	< 3m (acc. To ASTM D 5096 – 96)
Inclined flow	
Measuring value deviation Δv compared with stationary horizontal flow: Δv < 1 %	
Wind velocity	v = 8 m/s
Horizontal turbulence intensity	t ≤ 20%
Turbulence structure (rough country)	r ≤ 0,8d
Average deviation from the horizontal flow	δ ≤ 2°
Turbulent flow	Deviation Δv turbulent compared with stationary horizontal flow -0.5% < Δv < +2% Frequency < 2 Hz
Classification	According to IEC 61400-12-1 (2005-12) Class A classification index A 0,9 Class B classification index B 3,0 Class S classification index S 0,5
wind load at 75 m/s	approx. 100 N
Heating	Surface temperature of housing neck > 0 °C at 20 m/s up to -10 °C air temperature, at 10 m/s up to -20 °C using the THIES icing standard 012002 on the housing neck. Heating regulated by temperature sensor.
Electrical supply for opto-electronic scanning	
Voltage	3,3...42 V DC (galvanic isolation from housing)
Current	0,3 mA @ 3,3 V typical (w/o external load) < 0,5 mA @ 5 V (w/o external load)
Electrical supply for heating	
Voltage	24 V AC/DC (galvanic isolation from housing)
Idling voltage	max. 30 V AC, max. 42 V DC
Capacity	25 W
Connection	8-pole plug-connection for shielded cable in the shaft
Mounting	Mounting on mast R 1", for ex. DIN 2441 1½ " with separate adaptor (option)
Weight	approx. 0,5 kg
Protection	IP 65 (DIN 40050)
EMC	EN 61000-6-2:2001 (immunity) EN 55022:2001, class B (interfering transmission)

Anexo S: Vista a 360°