

Análise da adequação das características de aerogeradores às condições de vento de um local – *Site Assessment*

INEGI – Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Pedro Miguel Pereira da Silva

Relatório da Dissertação do MIEM

Orientador: Prof. Álvaro Henrique Rodrigues



FEUP

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

Junho 2013

Aos meus Pais

Resumo

A seleção de um local para a instalação de aerogeradores requer dois tipos de avaliação do vento, a avaliação quantitativa e avaliação qualitativa. Este trabalho trata da avaliação qualitativa, em que se caracteriza os diferentes parâmetros de vento que permitem aferir da possibilidade de instalação e correto funcionamento dos aerogeradores no local. Os principais parâmetros a ter em conta nesta apreciação são a inclinação do escoamento, a inclinação do perfil vertical de velocidades, a distribuição de frequências de velocidade, os fenômenos extremos e a turbulência.

Os critérios de projeto dos aerogeradores e dos parques eólicos estão definidos em referenciais normativos elaborados em instâncias internacionais. Neste âmbito destaca-se a 3ª edição da norma IEC 61400-1, a qual é atualmente a referência nesta matéria.

A análise de dois casos de estudo permite a aplicação das avaliações definidas pelas normas, assim como a definição de possíveis medidas a adotar nas situações em que se verifique o desrespeito dos parâmetros em relação ao estabelecido nas normas. O tratamento dos casos de estudo é feito com recurso a programas de estimativa dos diferentes parâmetros de vento, sendo os programas alvo de avaliação da sua adequabilidade ao local.

A realização do trabalho permitiu constatar que a análise qualitativa global das características de vento deve ser complementada com uma análise qualitativa setorial, com especial destaque para os setores mais energéticos. A gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores é uma solução para a mitigação dos problemas que ocorrem em alguns locais, em que se verifica o desrespeito dos parâmetros em relação ao definido nas normas. Contudo, a gestão setorial apenas se trata de uma boa solução, caso os parâmetros para o rumo dominante respeitem os limites definidos na norma, senão tal implica uma grande perda de produção.

O efeito do terreno sobre o escoamento de um local, especialmente sobre os parâmetros qualitativos, ficou também atestado na análise dos casos práticos.

Por fim, destacar que as normas sofrem alterações ao longo do tempo, à medida que a tecnologia e conhecimento nesta área se desenvolvem. Posto isto, as normas devem ser entendidas como um modo de identificação de locais críticos para a instalação de aerogeradores, cabendo a última palavra quanto à possibilidade de instalação e correto funcionamento ao fabricante do aerogerador.

Analysis of the adequacy of the wind turbine characteristics to the wind conditions of a site – site assessment

Abstract

The selection of the installation's site for a wind turbine requires two types of wind's analysis, the quantitative analysis and the qualitative analysis. This report is about the qualitative analysis, in which are characterized the wind's parameters that allow the evaluation of the installation and the good performance of the wind turbine in the site.

The project's criteria of the wind turbines and the wind farms are defined by standards. The international standard IEC 61400-1 is an important reference for the wind's qualitative analysis. In this report will be analysed the third edition of this standard.

The analysis of two case studies allows the application of the evaluations defined by the standards, allowing as well the identification of the solutions to adopt in situations in which the wind's parameters are above the limit defined by the standards. The treatment of the case studies is made with programs that estimate wind's parameters. The performance of these programs is evaluated in each case study.

As the result of this work, it can be stated that the global qualitative analysis of the wind should be complemented with the sectorial qualitative analysis, especially for the most energetic sectors. The sector management rules allow the correction of some critical situations in which the wind's parameters exceed the limits defined by the standards. However, the sector management rules are only a good solution, if the most energetic sectors respect the limits defined by the standards, else it causes a big production loss.

The effect of the terrain on the wind's parameters, especially for the qualitative parameters, was verified by the analysis of the case studies.

Finally, it is necessary to understand that the standards change with the time, following the evolution of the technology and knowledge in this area. So the standards should be interpreted as a way to identify critical sites for the wind turbine's installation. The final decision about the adequacy of the wind turbine characteristics to the wind conditions of a site comes from the wind turbine manufacturer.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível devido à colaboração e apoio facultados por um diverso conjunto de pessoas, as quais presto os meus sinceros agradecimentos.

Dirijo um agradecimento especial ao Professor Álvaro Henrique Rodrigues por todo o conhecimento, experiência e conselhos transmitidos, que muito me orientaram na realização deste trabalho.

Agradeço ao Engenheiro José Carlos Matos, responsável pela secção de energia eólica do INEGI, a possibilidade concedida de desenvolver este trabalho num ambiente rodeado de profissionais desta área.

Pretendo também dirigir um agradecimento particular ao Engenheiro Bruno Silva do INEGI por toda a disponibilidade apresentada, conhecimentos transmitidos e interesse constante demonstrado no decorrer do projeto.

Agradeço também de um modo particular ao Engenheiro Nuno Cardoso da Novenergia toda a disponibilidade, conhecimentos e apoio prestados nas diferentes etapas do projeto.

Agradeço aos meus amigos por toda a motivação, conselhos e momentos de descontração proporcionados durante o período de elaboração deste trabalho.

Por fim, um agradecimento aos “meus”, pai, mãe, irmão e restantes familiares, pelo apoio incondicional e carinho dado.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Energia Eólica.....	1
1.2	Enquadramento da dissertação.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.4	Descrição geral da tese	4
2	Avaliação de um local.....	5
2.1	Caraterização do terreno	5
2.1.1	Orografia	5
2.1.2	Obstáculos	6
2.1.3	Rugosidade.....	6
2.2	Caraterização do vento	7
2.2.1	Turbulência	8
2.2.2	Perfil vertical de velocidades	9
2.2.3	Inclinação do escoamento	10
2.2.4	Distribuição de frequências de velocidade	10
2.2.5	Ventos extremos	11
2.3	Considerações finais	13
3	Tecnologia	15
3.1	Princípio da conversão energética	15
3.2	Limites de conversão	16
3.3	Curvas caraterísticas	16
3.4	Constituição do aerogerador	18
3.4.1	Rotor.....	19
3.4.2	Cabina	19
3.4.3	Torre.....	20
3.5	Aerodinâmica das pás	20
3.5.1	Forças atuantes sobre uma pá.....	20
3.6	Considerações finais	21
4	Normas de projeto de aerogeradores e parques eólicos.....	23
4.1	Classificação de aerogeradores.....	23
4.2	Caraterização dos parâmetros de vento.....	24
4.2.1	Turbulência e esteira	25
4.2.2	Perfil vertical de velocidades	27
4.2.3	Inclinação do escoamento	27
4.2.4	Distribuição de frequências de velocidade	27
4.2.5	Ventos extremos	28
4.3	Outras condições ambientais	29
4.4	Avaliação do terreno.....	30
4.5	Avaliação da integridade estrutural de aerogeradores	32
5	Modelos e programas de simulação	33
5.1	Programa WAsP®	33
5.1.1	Limitações do WAsP.....	34

5.1.2	O parâmetro RIX	35
5.2	WAsP Engineering®	35
5.3	Windfarm Assessment Tool®	36
5.4	Considerações finais	36
6	Caso teste: Parque eólico Itália	37
6.1	Caraterização da área	37
6.2	Caraterização do regime de vento	39
6.2.1	Estações de medição	39
6.2.2	Massa volúmica do ar	39
6.2.3	Distribuição de frequências de velocidade	40
6.2.4	Rosas de ocorrências, velocidade e energia	40
6.2.5	Perfil vertical de velocidades	41
6.2.6	Intensidade de turbulência	43
6.3	Aerogeradores e configuração do parque	44
6.3.1	Especificação dos aerogeradores	44
6.3.2	Configuração do parque	45
6.4	Produção estimada e perdas de esteira	46
6.5	Parâmetros de vento nos locais de instalação dos aerogeradores	46
6.5.1	Inclinação do escoamento	46
6.5.2	Inclinação do perfil vertical de velocidades	47
6.5.3	Ventos extremos	47
6.5.4	Distribuição de frequências de velocidade	48
6.5.5	Intensidade de turbulência	49
6.6	Gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores	51
6.7	Avaliação do comportamento dos programas	54
6.7.1	Distribuição de frequências de velocidade	54
6.7.2	Perfil vertical de velocidades	55
6.7.3	Intensidade de turbulência	56
6.8	Considerações finais	56
7	Caso de teste: Parque eólico África do Sul	59
7.1	Caraterização da área	59
7.2	Caraterização do regime de vento	60
7.2.1	Estação de medição	60
7.2.2	Massa volúmica do ar	60
7.2.3	Distribuição de frequências de velocidade	61
7.2.4	Rosas de ocorrências, velocidade e energia	62
7.2.5	Perfil vertical de velocidades	62
7.2.6	Intensidade de turbulência	64
7.3	Aerogeradores e configuração do parque	65
7.3.1	Especificação dos aerogeradores	65
7.3.2	Configuração do parque	66
7.4	Produção estimada e perdas de esteira	67
7.5	Parâmetros de vento nos locais de instalação dos aerogeradores	67
7.5.1	Inclinação do escoamento	67
7.5.2	Inclinação do perfil vertical de velocidades	67
7.5.3	Ventos extremos	68

7.5.4	Distribuição de frequências de velocidade	68
7.5.5	Intensidade de turbulência	69
7.6	Gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores	72
7.7	Avaliação do comportamento dos programas	73
7.7.1	Distribuição de frequências de velocidade	74
7.7.2	Perfil vertical de velocidades	74
7.7.3	Intensidade de turbulência.....	75
7.8	Considerações finais	75
8	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro.....	77
	Referências	79
ANEXO A:	Modelo de turbulência de esteira	81
ANEXO B:	Turbulência ambiente em parques eólicos	83
ANEXO C:	Outros Resultados – Parque eólico Itália	85
ANEXO D:	Outros Resultados – Parque eólico África do Sul.....	87

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Influência do relevo no perfil vertical de velocidades (retirado de [1]).	5
Figura 2.2 – Efeitos sobre a velocidade, a potência e a turbulência do escoamento após a sua passagem por um edifício (adaptado de [7]).	6
Figura 2.3 – Efeito da vegetação no escoamento de vento (retirado de [7]).	6
Figura 2.4 – Variação da velocidade do vento num curto período de tempo (adaptado de [7]).	8
Figura 2.5 – Esquema ilustrativo do perfil vertical de velocidades (retirado de [10]).	9
Figura 2.6 – Esquema ilustrativo da inclinação do escoamento (retirado de [10]).	10
Figura 2.7 – Distribuição de frequências de velocidade do vento a partir de dados reais e respetivos ajustamentos de Weibull e Rayleigh.	11
Figura 3.1 – Esquema representativo da conversão de energia num aerogerador (retirado de [1]).	15
Figura 3.2 – Curva de potência do aerogerador Vestas V112.	17
Figura 3.3 – Curva do coeficiente de potência do aerogerador Vestas V112.	17
Figura 3.4 – Curva do coeficiente do impulso axial do aerogerador Vestas V112.	18
Figura 3.5 – Esquema dos principais componentes de um aerogerador de grandes dimensões (adaptado de [11]).	18
Figura 3.6 – Forças atuantes sobre a pá de um aerogerador (adaptado de [3]).	21
Figura 4.1 – Esquema representativo dos aerogeradores que provocam esteira no escoamento sobre determinado aerogerador (retirado de [10]).	27
Figura 4.2 – Esquema ilustrativo das distribuições de frequências de velocidade do vento.	28
Figura 4.3 – Esquema ilustrativo da avaliação da complexidade do terreno de acordo com a norma IEC 61400-1 (2005) (retirado de [10]).	30
Figura 4.4 – Ilustração da avaliação da complexidade do terreno de acordo com a adenda IEC 61400-1/A1 (2009) (retirado de [10]).	31
Figura 5.1 – Esquema representativo da metodologia do programa WAsP (adaptado de [1]).	34
Figura 5.2 – Fenómenos de recirculação do escoamento perante pendentes acentuadas (retirado de [1]).	35
Figura 6.1 – Mapa de elevações do terreno do parque Itália.	37
Figura 6.2 – RIX na área do parque Itália.	38
Figura 6.3 – Δ RIX na área do parque de Itália em relação à estação de medição B.	38
Figura 6.4 – Histograma de ocorrências de velocidade do vento e respetivo ajustamento de Weibull para os dados da estação B do parque Itália (80 m a.n.s.).	40
Figura 6.5 – Rosas de ocorrências, velocidade e energia para os dados da estação B do parque Itália (80 m a.n.s.).	41

Figura 6.6 – Dispersão dos valores de <i>shear factor</i> em função da velocidade do vento, para o parque de Itália.....	41
Figura 6.7 – Distribuição de frequências de ocorrências dos valores de <i>shear factor</i> obtidos dos dados de 80 e 60 m a.n.s. da estação B do parque Itália.	42
Figura 6.8 – Perfis verticais de velocidades obtidos a partir de dados da estação B do parque Itália.	43
Figura 6.9 – Comparação entre as curvas de intensidade de turbulência para as diferentes alturas de medição da estação B do parque Itália.	44
Figura 6.10 – Curva de potência e do coeficiente de impulso axial do modelo de aerogerador do parque Itália.....	45
Figura 6.11 – Distribuição dos aerogeradores no terreno para o parque Itália e respectivas velocidades médias de vento.....	45
Figura 6.12 – Comparação entre a distribuição de frequências de velocidade do local N12 e a distribuição definida pela norma IEC 61400-1.	48
Figura 6.13 – Curvas de intensidade de turbulência ambiente (valor representativo) para os locais N4, N11 e N12.....	50
Figura 6.14 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva para os locais N4, N11 e N12....	50
Figura 6.15 - Curvas de intensidade de turbulência efetiva global e para o rumo dominante, para os locais N4 e N11	51
Figura 6.16 – Rosa de intensidade de turbulência (à esquerda) e rosa de energia (à direita) para o local N4.....	52
Figura 6.17 – Rosa de intensidade de turbulência (à esquerda) e rosa de energia (à direita) para o local N11.....	52
Figura 6.18 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva experimentadas pelo aerogerador do local N11 com e sem gestão setorial do seu funcionamento.....	53
Figura 6.19 - Perfil vertical de velocidades medido e perfis previstos pelo WAsP e pelo WEng, para o parque Itália.	55
Figura 6.20 – Curva de intensidade de turbulência medida a 80 m a.n.s. e respectiva previsão do WAT, para o parque Itália.....	56
Figura 7.1 – Mapa de elevações do terreno do parque África do Sul.....	59
Figura 7.2 – RIX na área do parque África do Sul.	60
Figura 7.3 – Histograma de ocorrências de velocidade do vento e respectivo ajustamento de Weibull para os dados da estação (80 m a.n.s.) do parque África do Sul.....	61
Figura 7.4 – Rosas de ocorrências, velocidade e energia para os dados da estação (80 m a.n.s.) do parque África do Sul.....	62
Figura 7.5 – Dispersão dos valores de <i>shear factor</i> em função da velocidade do vento para os dados de 80 m a.n.s. da estação do parque África do Sul.....	62
Figura 7.6 – Distribuição de frequências de ocorrências dos valores de <i>shear factor</i> obtidos dos dados de 80 e 60 m a.n.s., para o parque África do Sul.	63

Figura 7.7 – Perfis verticais de velocidades obtidos a partir de dados da estação do parque África do Sul.....	64
Figura 7.8 - Comparação entre as curvas de intensidade de turbulência para diferentes alturas de medição da estação do parque África do Sul.....	65
Figura 7.9 – Curva de potência e do coeficiente de impulso axial do modelo de aerogerador do parque África do Sul.....	66
Figura 7.10 – Distribuição dos aerogeradores no terreno e respectivas velocidades médias de vento, para o parque África do Sul.....	66
Figura 7.11 – Comparação entre a distribuição de frequências de velocidade do local V6 e a distribuição definida pela norma, para o parque África do Sul.....	69
Figura 7.12 – Curvas de intensidade de turbulência ambiente (valor representativo) para os locais V6 e V10.....	70
Figura 7.13 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva para os locais V6 e V10.....	71
Figura 7.14 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva global e para os rumos dominantes para o local V6.....	71
Figura 7.15 – Rosa de intensidade de turbulência (à esquerda) e rosa de energia (à direita) para o local V6.....	72
Figura 7.16 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva experimentadas pelo aerogerador do local V6 com e sem gestão setorial do seu funcionamento.....	73
Figura 7.17 – Perfil vertical de velocidades medido e perfis previstos pelo WAsP e WEng, para o parque África do Sul.....	74
Figura 7.18 - Curva de intensidade de turbulência medida a 80 m a.n.s. e respectiva previsão do WAT, para o parque África do Sul.....	75
Figura C.1 – Distribuição de frequências de velocidade para os períodos Outono/Inverno e Primavera/Verão para os dados da estação B do parque Itália.....	85
Figura C.2 – Distribuição dos aerogeradores e respectivas circunferências de diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro do rotor dos aerogeradores, para o parque Itália.....	85
Figura D.1 – Distribuição de frequências de velocidade para os períodos Outono/Inverno e Primavera/Verão para os dados da estação do parque África do Sul.....	87
Figura D.2 – Distribuição dos aerogeradores e respectivas circunferências de diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro do rotor dos aerogeradores, para o parque África do Sul.....	87

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Escalas de rugosidade de superfícies típicas (adaptado de [6]).	7
Tabela 4.1 – Parâmetros básicos das classes de aerogeradores (adaptado de [9]).	24
Tabela 4.2 – Indicadores da complexidade do terreno de acordo com a norma IEC 61400-1 (2005) (adaptado de [9]).	30
Tabela 4.3 – Indicadores da complexidade do terreno de acordo com a adenda IEC 61400-1/A1 (2009) (adaptado de [9]).	31
Tabela 6.1 – Valores médios de temperatura e pressão a partir da estação A do parque Itália.	39
Tabela 6.2 – Parâmetros do ajustamento de Weibull e respetivo erro quadrático, para o parque Itália.	40
Tabela 6.3 – Valores médios de <i>shear factor</i> para velocidades de vento superiores a 3 m/s, para o parque Itália.	42
Tabela 6.4 – Principais características do modelo de aerogerador do parque Itália.	44
Tabela 6.5 – Estimativas de produção do parque Itália.	46
Tabela 6.6 – Valores máximos absolutos do ângulo de inclinação do escoamento e valores do ângulo de inclinação para o setor mais frequente, para o parque Itália.	47
Tabela 6.7 – Valores globais de <i>shear factor</i> (α) para os diferentes locais do parque Itália.	47
Tabela 6.8 – Valores extremos de velocidade do vento para um período de recorrência de 50 anos, para os diferentes locais do parque Itália.	48
Tabela 6.9 – Comparação das distribuições de velocidade de vento do local com a distribuição da norma IEC 61400-1 no intervalo de 0,2 a 0,4 V_{ref} , para os diferentes locais do parque Itália.	48
Tabela 6.10 - Valores médios e representativos da intensidade de turbulência a 15 m/s, na ausência de efeito de esteira, para os diferentes locais do parque Itália.	49
Tabela 6.11 – Intensidade de turbulência efetiva a 15 m/s e peso da esteira nesse valor da intensidade de turbulência, para os diferentes locais do parque Itália.	49
Tabela 6.12 – Limitações setoriais impostas ao aerogerador do local N11.	53
Tabela 6.13 – Perdas de produção devido às limitações setoriais impostas ao aerogerador do local N11.	54
Tabela 6.14 – Comparação entre os parâmetros da distribuição de Weibull observados e previstos, para o parque Itália.	54
Tabela 6.15 – Comparação entre os parâmetros da distribuição de Weibull observados na estação A com os previstos pelo WAsP para o local da estação A a partir dos dados da estação B.	55
Tabela 7.1 – Valores médios de temperatura e pressão atmosférica, para o parque África do Sul.	61

Tabela 7.2 – Parâmetros do ajustamento de Weibull e erro quadrático do ajustamento, para o parque África do Sul.	61
Tabela 7.3 – Valores médios de <i>shear factor</i> para velocidades de vento superiores a 3 m/s, para o parque África do Sul.	63
Tabela 7.4 – Principais características do modelo de aerogerador do parque África do Sul.	65
Tabela 7.5 – Estimativas de produção do parque África do Sul.	67
Tabela 7.6 – Valores máximos absolutos do ângulo de inclinação do escoamento para os locais do parque África do Sul.	67
Tabela 7.7 – Valores globais de <i>shear factor</i> (α) para os diferentes locais do parque África do Sul.	68
Tabela 7.8 – Valores extremos de velocidade do vento para um período de recorrência de 50 anos, para os locais do parque África do Sul.	68
Tabela 7.9 – Comparação das distribuições de velocidade de vento do local com a distribuição da norma IEC 61400-1 no intervalo de 0,2 a 0,4 V_{ref} , para o parque África do Sul.	68
Tabela 7.10 - Valores médios e representativos da intensidade de turbulência a 15 m/s, na ausência de efeito de esteira, para o parque África do Sul.	69
Tabela 7.11 – Valores de intensidade de turbulência efetiva a 15 m/s e peso da esteira nesse valor da intensidade de turbulência, para o parque África do Sul.	70
Tabela 7.12 – Limitação setorial imposta ao aerogerador do local V6.	72
Tabela 7.13 – Perdas de produção devido à limitação setorial imposta ao aerogerador do local V6.	73
Tabela 7.14 – Comparação entre os parâmetros da distribuição de Weibull observados e previstos pelo WASP, para o parque África do Sul.	74
Tabela C.1 – Valores do ângulo de inclinação do escoamento por sector para alguns locais do parque Itália.	86
Tabela C.2 – Valores setoriais de <i>shear factor</i> (α) para os locais N3, N13 e N15.	86

Nomenclatura

A	Fator de escala (parâmetro de Weibull)	[m/s]
C_{CT}	Parâmetro de correção da estrutura da turbulência	[-]
C_T	Coefficiente de impulso axial	[-]
d_f	Espaçamento entre aerogeradores na direção perpendicular à direção dominante do vento	[m]
d_r	Espaçamento entre aerogeradores na direção dominante do vento	[m]
D	Diâmetro do rotor	[m]
f_W	Função distribuição de frequências de Weibull	[-]
f_R	Função distribuição de frequências de Rayleigh	[-]
FR	Fator de rajada	[-]
F_G	Função distribuição de probabilidades acumuladas de Gumbel	[-]
I_{ef}	Intensidade de turbulência efetiva	[-]
$I_{méd}$	Valor médio da intensidade de turbulência	[-]
I_{ref}	Intensidade de turbulência de referência	[-]
I_{rep}	Valor representativo de intensidade de turbulência	[-]
I_{turb}	Intensidade de turbulência	[-]
k	Fator de forma (parâmetro de Weibull)	[-]
p_G	Função densidade de probabilidade de Gumbel	[-]
R	Constante dos gases perfeitos	[J/(kg.K)]
t	Tempo	[s]
u_*	Velocidade de fricção	[m/s]
V	Velocidade	[m/s]
V_{e1}	Velocidade extrema para período de recorrência de 1 ano	[m/s]
V_{e50}	Velocidade extrema para período de recorrência de 50 anos	[m/s]
V_{eixo}	Velocidade do vento à altura do eixo	[m/s]
V_{ext}	Velocidade de vento máxima	[m/s]
V_{in}	Velocidade do vento de corte inferior (do inglês <i>cut-in</i>)	[m/s]
$V_{méd}$	Velocidade do vento média	[m/s]
V_{out}	Velocidade do vento de corte superior (do inglês <i>cut-out</i>)	[m/s]
V_{ref}	Velocidade do vento de referência	[m/s]
V_n	Velocidade nominal	[m/s]

z	Altura acima do solo	[m]
z_0	Escala de rugosidade	[m]
z_{eixo}	Altura do eixo do rotor em relação ao solo	[m]

Símbolos Gregos

α	Expoente do perfil vertical de velocidades – <i>Shear Factor</i>	[-]
κ	Constante de Von Karman	[-]
Λ_1	Parâmetro de escala de turbulência longitudinal	[m]
ρ	Massa volúmica	[kg/m ³]
σ_{vel}	Desvio padrão da velocidade do vento	[m/s]
σ_1	Valor representativo da componente longitudinal do desvio padrão da velocidade do vento	[m/s]
σ_2	Valor representativo da componente lateral do desvio padrão da velocidade do vento	[m/s]
σ_3	Valor representativo da componente ascendente do desvio padrão da velocidade do vento	[m/s]
$\hat{\sigma}$	Desvio padrão da turbulência ambiente	[m/s]
$\hat{\sigma}_\sigma$	Desvio padrão dos valores dos desvios padrão da turbulência ambiente	[m/s]
$\hat{\sigma}'$	Desvio padrão da turbulência ambiente gerada no interior de grandes parques eólicos	[m/s]

Acrónimos

IEC	<i>International Electrotechnique Commission</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MIS	<i>Method of Independent Storms</i>
RIX	<i>Ruggedness Index</i>
WAsP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
WAT	<i>Windfarm Assessment Tool</i>
WEng	<i>WAsP Engineering</i>

1 Introdução

1.1 Energia Eólica

O vento é um recurso energético do qual o homem se serve para diversos fins, tais como a navegação marítima, a dessalinização, a bombagem da água e a geração de eletricidade. Antigamente os povos das regiões da Pérsia, Egipto e China recorriam ao vento para utilização em máquinas de irrigação. Mais tarde, na Europa, mais precisamente nos países mediterrânicos, é conhecida a utilização do vento para moagem de cereais, extração de óleos e elevação de águas [1].

O uso de aerogeradores para a produção de eletricidade remonta ao final do século XIX, destacando-se a construção de um aerogerador de 12 kW de potência por Charles Brush nos Estados Unidos da América [2]. Contudo, durante grande parte do século XX existiu pouco interesse no uso da energia de base eólica para produção de eletricidade, exceto para casos de carregamento de baterias de habitações com localizações remotas.

A produção de energia elétrica de base eólica teve um grande desenvolvimento com a crise petrolífera da década de 70, que alertou para a necessidade de assegurar diversidade e segurança no fornecimento energético [3]. Vários programas de pesquisa e desenvolvimento foram criados pelos governos de modo a possibilitar a evolução da tecnologia empregue nos aerogeradores, passando-se de protótipos com cerca de 100 kW, na década de 70, para aerogeradores que podem atualmente ultrapassar os 7 MW de potência, como é o caso do ENERCON E-126, que possui uma potência nominal de 7,85 MW [4].

Para satisfazer as necessidades energéticas das populações foram então criados parques eólicos, que consistem em áreas onde estão concentrados vários aerogeradores. O primeiro parque eólico foi construído em 1980, em New Hampshire, Estados Unidos da América, sendo constituído por 20 aerogeradores. Contudo, esta primeira experiência resultou num fracasso, pois os aerogeradores não resistiram às condições verificadas no local e, além disso, houve uma sobre estimativa do recurso eólico por parte dos promotores do projeto [2].

Desde esta primeira experiência falhada, vários parques foram erguidos com sucesso, podendo-se destacar, a título de exemplo, o parque eólico do Alto Minho, em Portugal, que entrou em funcionamento em 2009, com uma capacidade instalada de 240 MW [5].

O interesse crescente pela energia de base eólica levou à necessidade de procurar novos locais para a edificação de parques eólicos, locais estes que levantaram novos desafios no âmbito da adequação dos aerogeradores às características locais.

Cerca de uma década após a construção do primeiro parque eólico surge, em 1991, o primeiro parque eólico instalado em zona marítima. Trata-se de um parque erigido na zona de Vindeby,

Dinamarca, constituído por 11 aerogeradores com 450 kW de potência nominal, localizado a 3 km da costa. Durante a década de 90 foram construídos pequenos parques eólicos perto da costa, até que, em 2002, foi construído o parque eólico de Horns Rev, com uma capacidade de 160 MW, localizado a 20 km da costa oeste da Dinamarca. Grandes projetos de parques em zonas marítimas têm sido entretanto elaborados [5].

Mais recentemente, as principais motivações para o uso de aerogeradores na produção de eletricidade estão relacionadas com as reduzidas emissões de CO₂ dos aerogeradores ao longo do seu ciclo de vida, e com o potencial da energia de base eólica na mitigação das alterações climáticas, em comparação com as energias provenientes de combustíveis fósseis. Em 2007, a União Europeia estabeleceu que 20 % do total da energia utilizada em 2020 deveria provir de fonte renovável. Devido à dificuldade do uso das energias renováveis no setor dos transportes, em alguns países 30 a 40 % da energia elétrica deverá ser proveniente de fonte renovável, com a energia eólica a assegurar uma quota considerável [6].

Atualmente, a energia eólica é caracterizada por uma tecnologia madura, nomeadamente na Europa e nos Estados Unidos da América, refletida na disponibilidade dos equipamentos superior a 90% e vidas úteis superiores a 20 anos [3].

1.2 Enquadramento da dissertação

A procura de novos locais para a instalação de aerogeradores não se restringiu somente à instalação de parques eólicos em zonas marítimas, mas também ao projeto de parques eólicos em zonas terrestres com condições de escoamento mais agressivas para os aerogeradores.

Toda esta evolução no universo da energia eólica foi acompanhada pelo aparecimento de normas que regem as regras de projeto dos aerogeradores e dos parques eólicos.

A elaboração de normas nacionais e internacionais contendo regras e requisitos para o projeto de aerogeradores, começou na década de 80 do século de XX. A primeira publicação consistia num conjunto de regulamentos de certificação produzida pela *Germanischer Lloyd*, em 1986. Entretanto, outras normas nacionais foram publicadas na Holanda (NEN 6096) e Dinamarca (DS 472) em 1988 e 1992, respetivamente.

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) começou a trabalhar na primeira norma internacional em 1988, que resultou na publicação da IEC 1400-1 “*Wind Turbine Generator Systems – Part I: Safety Requirements*”, em 1994. Após esta primeira publicação surgiram mais duas edições desta norma, a 2ª em 1999 e a 3ª edição em 2005, contendo alterações decorrentes da evolução do conhecimento e da tecnologia. Nestas duas edições mais recentes a norma passou a designar-se IEC 61400-1 “*Wind Turbine Generator Systems – Part I: Design Requirements*”. A IEC 61400 – 1 descreve os requisitos essenciais ao funcionamento adequado de um aerogerador [6].

Juntamente com o aparecimento de normas assistiu-se ao aparecimento de programas de previsão dos principais parâmetros do escoamento. Estes programas têm grande importância, pois são uma ferramenta essencial na aferição da possibilidade de instalação de aerogeradores e seu correto funcionamento nos diferentes locais.

O WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), introduzido em 1987 pelo Departamento de Física Atmosférica e Energia do Vento do Laboratório Nacional de *Risø* (*Wind Energy and Atmospheric Physics Department at Risø National Laboratory*),

Dinamarca, trata-se de um programa de extrapolação vertical e horizontal de estatísticas de vento, permitindo obter estimativas de produção.

Juntamente com o WAsP destaca-se o surgimento de outras duas importantes ferramentas, o WEng (WAsP Engineering) e o WAT (*Windfarm Assessment Tool*). O WAsP *Engineering*, introduzido em 2001 pelos autores do WAsP, é um programa complementar do WAsP, cujo foco incide na avaliação da adequabilidade de locais para a instalação de aerogeradores, através da análise dos aspetos do vento que originam cargas sobre os aerogeradores. O principal objetivo do WAT (*Windfarm Assessment Tool*) é facilitar a verificação das condições definidas pela norma IEC 61400-1, nomeadamente a consideração da interação entre os vários aerogeradores de um parque.

O aumento do rigor das normas para efeitos de projeto, com o objetivo de assegurar o tempo de vida previsto dos aerogeradores, em conjunto com a procura de novos locais para a instalação de aerogeradores origina que, em alguns projetos, os parâmetros se encontrem muito próximos dos limites definidos pelas normas, ou mesmo os ultrapassem, sendo nestes casos necessária a utilização de meios complementares de análise para aferir da possibilidade de relaxamento de certos limites.

É também importante referir o papel dos fabricantes dos aerogeradores, sendo eles os principais responsáveis pelo assegurar do correto funcionamento das máquinas, especialmente nos locais onde se verifica o desrespeito das condições impostas pelas normas.

Os principais parâmetros visados na análise da adequabilidade das características dos aerogeradores às condições de vento de um local, prática comumente designada pelo termo inglês *site assessment*, são: a turbulência do escoamento, a inclinação do escoamento, o perfil vertical de velocidades, os ventos extremos e a distribuição de frequências de velocidade.

Neste sentido, e tendo em conta as limitações dos programas de simulação atualmente utilizados, nomeadamente na previsão dos parâmetros do escoamento de vento para terrenos mais complexos, pretende-se com este trabalho elaborar uma visão geral sobre os principais parâmetros do escoamento a analisar aquando do projeto de um parque eólico, apontando possíveis melhorias a implementar nestas metodologias e eventuais meios complementares de análise.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste na análise dos principais parâmetros do escoamento a avaliar aquando do projeto de um parque eólico, fazendo uma análise crítica das normas desta área.

A utilização de meios complementares de análise para situações em que os valores dos parâmetros se encontrem próximos do limite, ou o ultrapassem, será igualmente alvo de incidência, assim como a apresentação de propostas de solução para estas situações.

Pretende-se também efetuar uma avaliação do comportamento do programa WAsP e restantes ferramentas complementares na previsão dos parâmetros relacionados com o escoamento atmosférico, identificando possíveis limitações.

O efeito da complexidade do local nos parâmetros do escoamento e no comportamento dos programas merecerá também atenção.

1.4 Descrição geral da tese

Este relatório encontra-se estruturado em capítulos, sendo estes divididos em secções. Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma breve descrição dos vários capítulos.

No capítulo 2 apresentam-se os parâmetros de avaliação de um local aquando da instalação de aerogeradores. Estes parâmetros são divididos em dois grandes grupos, os parâmetros de caracterização do terreno e os parâmetros de caracterização do recurso eólico, sendo ao longo do capítulo destacadas as relações entre os parâmetros dos dois grupos.

O capítulo 3 é dedicado a uma breve apresentação da tecnologia empregue nos aerogeradores. Apresenta-se o princípio básico de conversão energética que está na base do rotor dos aerogeradores, assim como as principais curvas características e elementos constituintes de um aerogerador.

No capítulo 4 são apresentadas as normas que regem à avaliação de locais para a instalação de aerogeradores, sendo dado especial destaque a norma IEC 61400-1. Analisam-se os principais parâmetros de avaliação definidos pela norma, assim como as alterações que foram sendo efetuadas ao longo do tempo.

O capítulo 5 é destinado a fazer uma breve apresentação dos programas de previsão de parâmetros de vento utilizados no decorrer deste projeto. Apresentam-se as principais características dos programas, assim como o seu campo de utilização e respetivas limitações.

Nos capítulos 6 e 7 analisam-se dois projetos de parques eólicos, a título de casos de teste, efetuando-se para cada caso a avaliação das condições de vento do local e a análise da adequação das características dos aerogeradores definidos a essas condições de vento. A análise dos dois projetos é realizada através da aplicação das metodologias definidas nas normas, recorrendo-se para tal a programas de análise e de previsão das condições de escoamento. Apresentam-se propostas de soluções para os locais em que se verifique o desrespeito das condições definidas pela norma.

No último capítulo são apresentadas as conclusões obtidas da elaboração deste projeto e apresentam-se algumas sugestões de trabalhos futuros na área.

Por fim, no anexo A é apresentado o modelo de turbulência de esteira da norma IEC 61400-1, no anexo B apresenta-se o modelo de turbulência ambiente gerada no interior de grandes parques e no anexo C estão listados alguns eventos transientes extremos a que um aerogerador tem de resistir. Nos anexos D e E encontram-se alguns resultados complementares para os dois casos de estudo tratados.

2 Avaliação de um local

A avaliação do local para instalação de aerogeradores deve considerar o vento e a topografia locais. A topografia inclui a orografia, a rugosidade e os obstáculos existentes, sendo responsável por alterações importantes nas condições de vento.

Em seguida apresentam-se as características de vento e topográficas que devem ser alvo de análise aquando da avaliação de um local para a eventual construção de um parque eólico.

2.1 Caracterização do terreno

O efeito do terreno nas características do vento é de grande importância, provocando alterações significativas.

A classificação mais básica de terrenos divide-os em terrenos planos e não-planos. Alguns autores definem os terrenos não-planos como complexos, ou seja, áreas onde os efeitos do terreno no escoamento de vento são significativos. Um terreno plano é um terreno com pequenas irregularidades, como vegetação rasteira ou pequenos obstáculos isolados. Um terreno não-plano tem variações de relevo consideráveis, como montanhas e vales [7].

Nas próximas secções são apresentados os três efeitos principais da topografia do local no escoamento de vento: a orografia, a rugosidade e os obstáculos.

2.1.1 Orografia

A orografia condiciona as características de vento, provocando variações na sua velocidade e direção.

A presença de elementos orográficos como montanhas, penhascos e escarpas exerce uma influência adicional no escoamento, verificando-se no topo destes elementos um aumento da velocidade, enquanto na base a velocidade é menor, como se pode observar na Figura 2.1. Isto torna os cumes da montanha em locais atrativos para a instalação de aerogeradores. Porém, quando o rumo dominante do vento não é perpendicular à crista da montanha, a atratividade do local diminui [7].

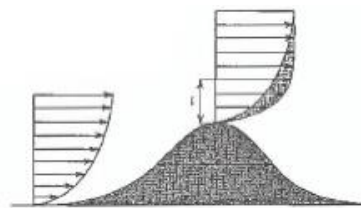


Figura 2.1 – Influência do relevo no perfil vertical de velocidades (retirado de [1]).

O efeito do relevo reflete-se também na inclinação do escoamento e no acréscimo de turbulência devido à esteira causada pela montanha, tal como se refere na secção 2.2.3.

2.1.2 Obstáculos

A presença de obstáculos, tais como edifícios, provoca uma diminuição na velocidade do vento. O efeito estende-se verticalmente até cerca de 3 vezes a altura do obstáculo, enquanto na direção do escoamento verifica-se que o efeito se faz sentir até uma distância de 30 a 40 vezes a altura do obstáculo.

A porosidade do obstáculo influencia a medida em que que a velocidade é diminuída na presença do mesmo. Como regra geral, a porosidade pode ser definida como 0 para edifícios e igual a 0,5 para árvores [8].

Na Figura 2.2 pode-se observar o efeito de um edifício isolado no vento. Por sua vez, na Figura 2.3 é possível observar o efeito da vegetação no perfil vertical de velocidades.

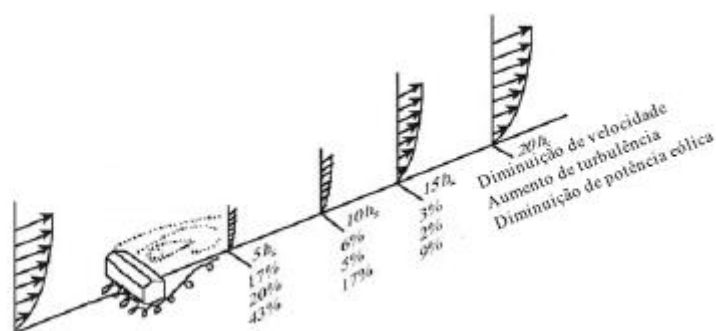


Figura 2.2 – Efeitos sobre a velocidade, a potência e a turbulência do escoamento após a sua passagem por um edifício (adaptado de [7]).



Figura 2.3 – Efeito da vegetação no escoamento de vento (retirado de [7]).

2.1.3 Rugosidade

O efeito coletivo da superfície do terreno e dos obstáculos, causadores de alterações na velocidade do vento junto do solo, é definido como rugosidade do terreno. A vegetação e casas são exemplos de elementos que contribuem para a rugosidade [9].

A rugosidade de um terreno é normalmente parametrizada por uma escala de comprimento designada por escala de rugosidade (z_0). Na Tabela 2.1 são apresentadas as escalas de rugosidade de diferentes superfícies.

Tabela 2.1 – Escalas de rugosidade de superfícies típicas (adaptado de [6]).

Tipo de terreno	Escala de rugosidade z_0 (m)
Cidades, florestas	0,7
Subúrbios, espaço rural densamente arborizado	0,3
Aldeias, espaço rural arborizado	0,1
Terreno aberto, pouca vegetação e edifícios	0,03
Planícies	0,01
Desertos planos, mar agitado	0,001

2.2 Caracterização do vento

A potência eólica varia com o cubo da velocidade do vento (2.1), daí a importância da correta caracterização do recurso eólico. A massa volúmica do ar também influencia o valor da potência eólica, porém a sua variação é mais restrita, além do facto da sua relação com a potência eólica ser linear. A caracterização do vento é necessária para a identificação de locais adequados, para a avaliação da viabilidade económica e para o projeto dos aerogeradores.

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \times \rho \times A_{rot} \times V_{vento}^3 \quad (2.1)$$

Esta caracterização do recurso eólico não é simples, dado que uma das características mais relevantes do vento é a sua variabilidade, tanto espacial como temporal. O vento pode ser considerado como uma combinação de uma velocidade média de vento com flutuações de turbulência em torno do valor médio. Existem outras escalas de variação, além da turbulência.

A nível espacial podem-se distinguir três grandes escalas: a larga escala, devido à latitude que origina maiores ou menores quantidades de insolação, constituindo as designadas regiões climáticas, a média escala devido à geografia física - a porção de terra e mar, o tamanho das massas de terra, a presença de montanhas ou zonas planas e o tipo de vegetação que afeta a absorção e reflexão de radiação solar, afetando a temperatura da superfície e humidade - e a escala local, influenciada pela topografia.

A nível temporal tem-se a larga escala, correspondente a variações inter-anuais e inter-décadas, que são de difícil previsão, as variações sazonais, as variações diárias e as variações em intervalos de tempo de poucos segundos, que são importantes no projeto do aerogerador [6].

A caracterização do recurso eólico com o intuito de aferir da possibilidade de instalação dos aerogeradores baseia-se na análise dos seguintes parâmetros:

- Turbulência do escoamento;
- Inclinação do escoamento;
- Perfil vertical de velocidades;
- Ventos extremos;

- Distribuição de frequência de velocidades.

2.2.1 Turbulência

A turbulência refere-se a variações da velocidade do vento em períodos de tempos reduzidos, na ordem de alguns segundos (Figura 2.4). A turbulência tem duas causas principais: a fricção com a superfície terrestre, devido às características topográficas, e os efeitos térmicos, que consistem em movimentações de massas de ar devido a variações na temperatura e conseqüentemente na densidade do ar, encontrando-se estes motivos fortemente relacionados. Fatores como a rugosidade da superfície, a altura acima do solo, o relevo do local (montanhas e colinas), a presença de obstáculos (cobertura do solo e edifícios) são bastante influenciadores do valor da intensidade de turbulência.

A grandes altitudes os efeitos dos processos atrás referidos enfraquecem, considerando-se então o escoamento livre dos efeitos da superfície. O escoamento é comandado pelas diferenças de pressão de grande escala sinóptica e pela rotação da Terra, sendo designado por vento geostrófico. Já a baixas altitudes, onde se fazem sentir os efeitos da superfície terrestre, dá-se a designação de camada limite. As propriedades desta camada são importantes no entendimento da turbulência experimentada pelos aerogeradores, pois estes encontram-se instalados nesta camada do escoamento. Os principais efeitos que controlam as propriedades da camada limite são a força do vento geostrófico, a rugosidade da superfície, o efeito de Coriolis¹ e os efeitos térmicos [6].

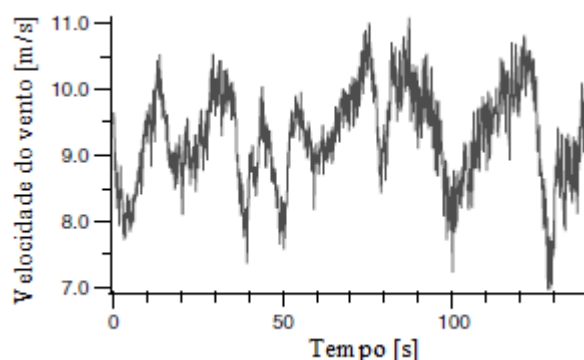


Figura 2.4 – Variação da velocidade do vento num curto período de tempo (adaptado de [7]).

Os modelos de turbulência devem incluir os efeitos da variação da velocidade e direção de vento. As três componentes da turbulência da velocidade do vento são [9]:

- Longitudinal – na direção principal da velocidade do vento.
- Lateral – horizontal e normal à direção longitudinal.
- Ascendente – normal às direções longitudinal e lateral, ou seja, inclinada da vertical pelo ângulo de inclinação média do escoamento.

¹ O efeito de *Coriolis* é uma força fictícia que surge na superfície da Terra devido ao seu movimento de rotação [3].

No universo da energia eólica define-se intensidade de turbulência como variações aleatórias da velocidade de vento para médias de intervalo de tempo de 10 minutos, sendo expressa matematicamente pela equação (2.2).

$$I_{turb} = \frac{\sigma_{vel}}{V_{méd}} \quad (2.2)$$

A definição apresentada em (2.2) é uma simplificação do conceito de turbulência definido na Mecânica de Fluidos. A turbulência da Mecânica de Fluidos refere-se às variações de velocidade segundo as três direções das componentes da turbulência, enquanto a definição utilizada na energia eólica se refere apenas à componente longitudinal da turbulência, que se adequa ao modo como as medições de vento são efetuadas.

Um aspeto importante a considerar no tratamento da turbulência num parque eólico é a turbulência induzida pelos aerogeradores vizinhos no escoamento sobre determinado aerogerador.

2.2.2 Perfil vertical de velocidades

Como referido na secção anterior, a rugosidade do terreno é um dos principais fatores influenciadores do escoamento na camada limite. Este efeito reflete-se na diminuição da velocidade do vento perto da superfície, originando uma variação da componente horizontal da velocidade ao longo da direção vertical, tal como representado na Figura 2.5. Esta variação está de acordo com a teoria da camada limite sobre uma placa plana, que refere o aumento da componente horizontal da velocidade do escoamento na direção vertical, desde o valor nulo na superfície da placa até atingir a velocidade de escoamento não perturbado a uma certa distância da placa.

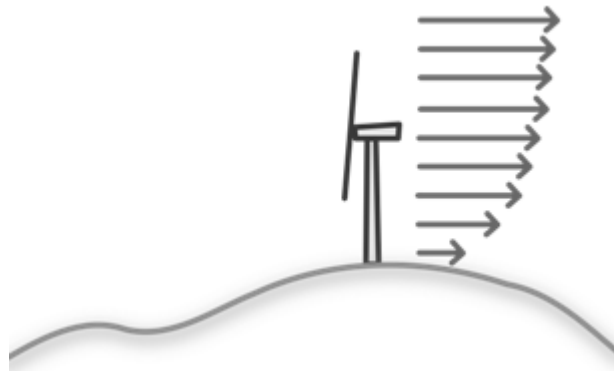


Figura 2.5 – Esquema ilustrativo do perfil vertical de velocidades (retirado de [10]).

Além da rugosidade do terreno, a forma do perfil é alterada pela orografia, sendo mais achatado no cume da montanha relativamente ao vale, assim como pelo fluxo de calor junto à superfície. Devido ao arrefecimento da superfície, à noite a turbulência é menor, fazendo com que a velocidade aumente mais rapidamente com a altura, contrariamente ao que se passa durante o dia, em que, devido ao aquecimento da superfície, ocorre um aumento da turbulência, sendo a variação da velocidade do vento com a altura mais gradual [8].

O perfil vertical de velocidades sobre terrenos planos e relativamente homogêneos é bem modelado através da lei logarítmica apresentada na equação (2.3).

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln(z/z_0) \quad (2.3)$$

Na expressão anterior, $V(z)$ representa a velocidade do vento à altura z acima da superfície do solo, κ é a constante de von Karman (aproximadamente 0,4), z_0 é a escala de rugosidade da superfície do local e u_* é designada por velocidade de fricção [8].

Uma aproximação mais simplista do perfil de velocidades é o modelo de lei de potência, cuja expressão se apresenta em (2.4), onde α é designado por *shear factor*². Trata-se de um modelo bastante utilizado para representação do perfil, mas apresenta o problema de não contabilizar a variação do expoente α no intervalo de altura onde a expressão é aplicada.

$$V(z) = V_{eixo} \times \left(\frac{z}{z_{eixo}} \right)^\alpha \quad (2.4)$$

2.2.3 Inclinação do escoamento

O declive do terreno, além de originar um aumento da turbulência do escoamento na esteira da montanha, provoca a inclinação do escoamento em relação à horizontal, tal como pode ser observado na Figura 2.6.

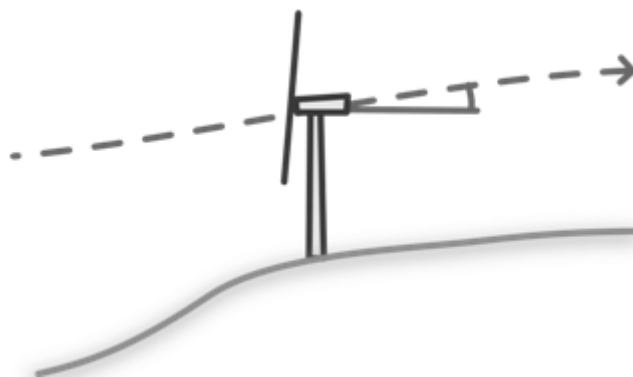


Figura 2.6 – Esquema ilustrativo da inclinação do escoamento (retirado de [10]).

2.2.4 Distribuição de frequências de velocidade

A distribuição de *Weibull* é uma das ferramentas estatísticas que permitem a representação das frequências de velocidade de vento numa forma compacta. A sua forma matemática está expressa na equação (2.5).

² *Shear factor* é um termo inglês pelo qual é comum designar-se o expoente do perfil vertical de velocidades definido pela lei de potência.

$$f_W(A, k, V) = \frac{k}{A} \left(\frac{V}{A}\right)^{(k-1)} \exp\left[-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right] \quad (2.5)$$

Os parâmetros A e k são designados por parâmetros de Weibull, sendo A o fator de escala e as suas unidades m/s, enquanto k é o fator de forma e é adimensional [1].

A distribuição de Rayleigh é um caso particular da distribuição de Weibull quando o fator de forma, k, é igual a 2, sendo a sua expressão apresentada em (2.6).

$$f_R(V_{méd}, V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{V_{méd}}\right) \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{méd}}\right)^2\right] \quad (2.6)$$

Na Figura 2.7 apresentam-se um histograma de frequências de velocidade de vento obtido a partir de dados reais e os respectivos ajustamentos, pelo método dos mínimos quadrados, das distribuições de Weibull e de Rayleigh.

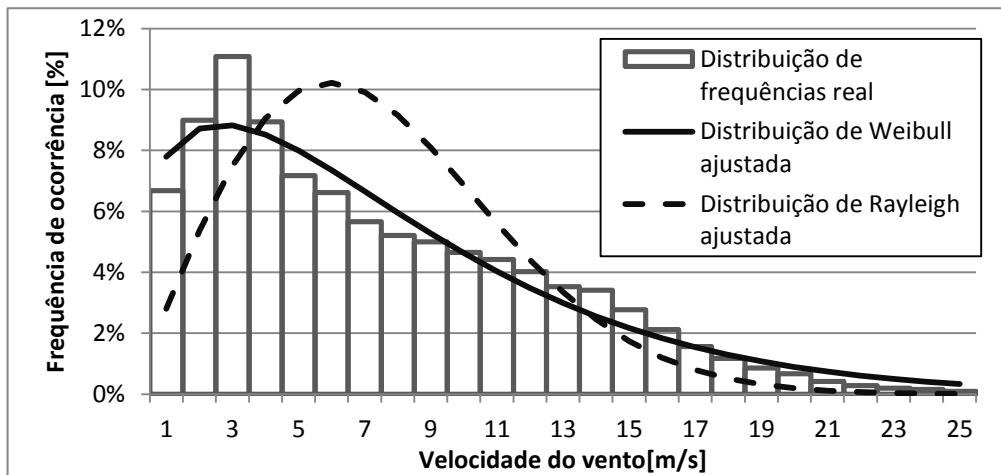


Figura 2.7 – Distribuição de frequências de velocidade do vento a partir de dados reais e respectivos ajustamentos de Weibull e Rayleigh.

2.2.5 Ventos extremos

As previsões de valores extremos de velocidade de vento são elaboradas em função de um período de recorrência. Um vento extremo pode ser definido como o valor mais alto de um conjunto de dados de velocidade do vento de um determinado período de tempo em análise.

A previsão de ventos extremos pode ser realizada através do recurso a uma de várias metodologias de previsão de eventos extremos. Duas dessas metodologias são o método de Gumbel e o método das tempestades independentes (MIS – *Method of Independent Storms*). Estas metodologias baseiam-se na seleção de ventos extremos de um determinado período de tempo, em conjunto com a utilização de um modelo estatístico adequado.

O modelo estatístico mais utilizado para a previsão de velocidades de vento extremas é a distribuição de Gumbel. Para esta distribuição são apresentadas a função densidade de

probabilidades na expressão (2.7) e a função distribuição de probabilidades acumuladas na expressão (2.8).

$$p_G(V_{ext}) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{V_{ext} - \mu}{\beta}\right) \exp\left(-\exp\left(-\frac{V_{ext} - \mu}{\beta}\right)\right) \quad (2.7)$$

$$F_G(V_{ext}) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{V_{ext} - \mu}{\beta}\right)\right) \quad (2.8)$$

Nas expressões anteriores, V_{ext} corresponde ao valor extremo de velocidade de vento para um determinado período de tempo, sendo β e μ e dados pelas expressões (2.9) e (2.10).

$$\beta = \frac{(\sigma_{ext}\sqrt{6})}{\pi} \quad (2.9)$$

$$\mu = \bar{V}_{ext} - 0,577\beta \quad (2.10)$$

Os símbolos \bar{V}_{ext} e σ_{ext} correspondem, respetivamente, ao valor médio e ao desvio padrão de um conjunto de valores extremos de velocidade de vento.

O método de Gumbel trata-se do método clássico para a previsão de velocidades de vento extremas, sendo recorrente a sua utilização com modificações para aumento da eficácia. O período mínimo recomendado da série de dados para utilização deste método é 10 anos.

A metodologia de Gumbel baseia-se na seleção de um valor extremo de velocidade por cada ano da série de dados em questão. A partir do conjunto de valores extremos anuais de velocidade obtêm-se os parâmetros β e μ . Recorrendo à função distribuição de probabilidades acumuladas (2.8), determina-se então o valor extremo de velocidade para o período de recorrência em questão, sabendo que a probabilidade de ocorrência do valor extremo de velocidade estimado para um período de recorrência de N anos será igual a $1/N$ anos [7].

O MIS é um derivado do método de Gumbel que utiliza mais do que um dado de referência por cada série anual de dados. Este método pode ser usado para séries de dados de dimensão mínima igual a 7 anos. O MIS seleciona picos individuais de velocidades de vento por aplicação de limites e filtros de tempo, para assegurar que todos os valores são originários de eventos independentes.

Os coeficientes da regressão de cada setor específico são utilizados na construção da tabela das máximas velocidades do vento verificadas na estação de medição, por setor e por ano, para o método básico de Gumbel, e por sector e por tempestade ocorrida para o MIS. Tabelas semelhantes são assim construídas para cada local de instalação de aerogeradores. Os valores máximos, anuais ou por tempestade, para um lugar onde é pretendida a instalação de um aerogerador, são extraídos para utilização na análise de Gumbel ou no MIS.

O uso dos coeficientes de regressão é apropriado desde que os dados que permitiram a obtenção dos coeficientes e os dados obtidos da regressão sejam de igual intervalo de tempo, ou seja, obtenção de valores máximos de médias de velocidade de 10 minutos a partir de dados de médias de velocidade de 10 minutos. Nestes métodos não existe a assunção de que o

máximo valor no lugar de instalação do aerogerador ocorre para o mesmo setor do local da estação de medição. A determinação do valor máximo no local de instalação do aerogerador através da utilização dos coeficientes da regressão do local específico melhora com a consideração das relações entre os locais [9].

2.3 Considerações finais

Neste capítulo apresentaram-se os principais parâmetros qualitativos de avaliação do escoamento atmosférico de um local, destacando-se a sua forte dependência das características do terreno.

Para a caracterização dos parâmetros é necessário possuir dados de vento com qualidade, representatividade e extensão, o que nem sempre está disponível. A previsão de ventos extremos é difícil, pela reduzida extensão das séries de dados normalmente disponíveis.

No próximo capítulo apresenta-se a tecnologia utilizada para aproveitamento da energia contida no escoamento atmosférico e o modo como os parâmetros qualitativos do vento influenciam o seu funcionamento.

3 Tecnologia

3.1 Princípio da conversão energética

O princípio de funcionamento do rotor de um aerogerador baseia-se no aproveitamento de parte da energia cinética associada ao movimento de uma dada massa ar. O processo de conversão, esquematizado na Figura 3.1, pode ser caracterizado, de modo simplificado, nas diferentes etapas:

- Inicialmente ocorre uma conversão de energia cinética em pressão, acompanhada de uma diminuição gradual da velocidade imposta pela presença da turbina;
- Na passagem pelo rotor dá-se uma queda brusca da pressão, de tal forma que à saída o seu valor é mais baixo que a pressão do meio circundante;
- A jusante do rotor a pressão cresce gradualmente até atingir de novo o valor da pressão atmosférica, enquanto a velocidade diminui segundo um processo de conversão idêntico ao que ocorre a montante da turbina.

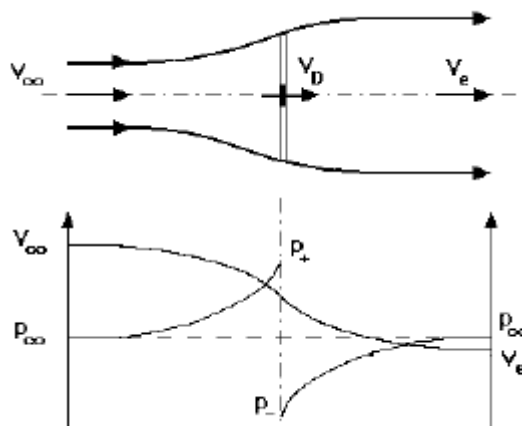


Figura 3.1 – Esquema representativo da conversão de energia num aerogerador (retirado de [1]).

Entre dois pontos afastados, um a montante e outro a jusante do rotor, os valores da pressão estática são iguais, verificando-se uma diminuição da energia cinética [1].

Na realidade o processo é algo mais complexo, mas este modelo permite ter uma ideia do balanço energético que caracteriza a conversão.

3.2 Limites de conversão

O aerogerador converte em energia mecânica apenas parte da energia cinética do escoamento, pois o aproveitamento de toda a energia cinética corresponderia ao anulamento da velocidade após a passagem pelo rotor, ou seja, à paragem do escoamento, deixando de haver transporte de energia.

A fração de energia cinética do vento aproveitada pelo aerogerador é caracterizada pelo coeficiente de potência – C_p . Trata-se de um coeficiente adimensional e a sua expressão característica é apresentada em (3.1).

$$C_p = \frac{P_{convertida}}{P_{eólica}} = \frac{P_{convertida}}{\frac{1}{2} \times \rho \times A_{rot} \times V_{vento}^3} \quad (3.1)$$

A aplicação de conceitos de Mecânica dos Fluidos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o valor do coeficiente de potência. O valor desse máximo é 59,3% (mais precisamente 16/27), sendo designado por Limite de Betz [3].

Os rotores atualmente utilizados para a produção comercial de eletricidade apresentam coeficientes de potência máximos compreendidos entre 0,4 e 0,5 [1].

3.3 Curvas características

As turbinas dos aerogeradores são projetadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade do vento. Esta potência é designada por potência nominal e a velocidade do vento a que esta velocidade é atingida é designada por velocidade nominal do vento. As especificações exatas da característica do aerogerador dependem do regime de ventos no local de instalação.

Devido à lei de variação cúbica da potência com a velocidade do vento, para velocidades abaixo de um certo valor não interessa extrair energia. Este valor mínimo é designado de velocidade de corte inferior (V_{in}), do inglês *cut-in*. Resultado ainda da relação cúbica da potência com a velocidade do vento, para valores superiores à velocidade do vento nominal, não é económico aumentar a potência da máquina, pois isso obrigaria a robustecer a construção e apenas se tiraria partido durante poucas horas por ano. Assim, a turbina é regulada para funcionar a potência constante, provocando-se artificialmente uma diminuição no rendimento da conversão.

Quando a velocidade do vento se torna perigosamente elevada, a turbina é desligada por razões de segurança. Este valor máximo é designado de velocidade de corte superior (V_{out}), do inglês *cut-out* [3].

Na Figura 3.2, é apresentado um exemplo da curva de potência de um aerogerador. Trata-se da máquina Vestas V112 de 3075 kW de potência nominal, tendo a curva sido obtida através dos dados fornecidos na ficha técnica da mesma.

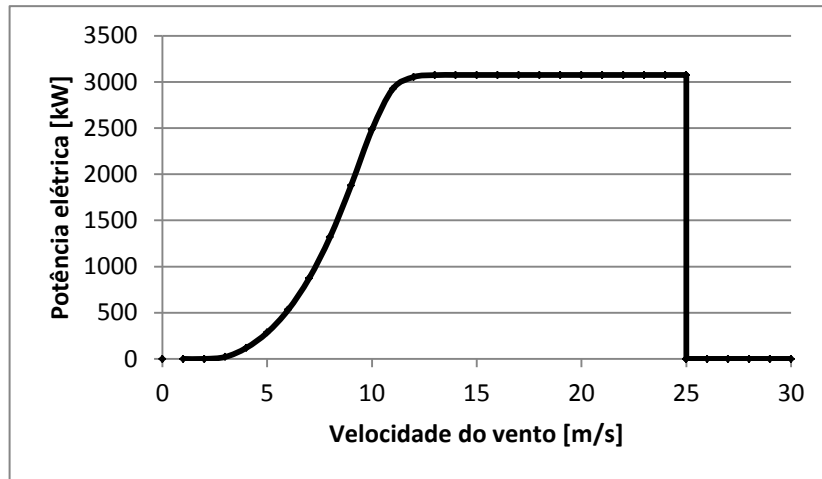


Figura 3.2 – Curva de potência do aerogerador Vestas V112.

Na Figura 3.3 é apresentada a curva do coeficiente de potência do mesmo aerogerador.

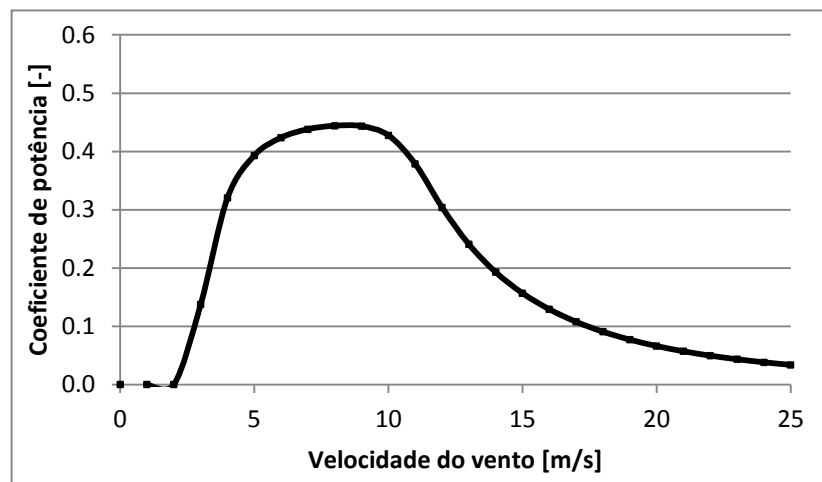


Figura 3.3 – Curva do coeficiente de potência do aerogerador Vestas V112.

Em resultado da queda de pressão na passagem pelo rotor, o aerogerador fica sujeito a uma força na direção do eixo de rotor, comumente designada de impulso axial (T). Esta força é normalmente caracterizada por um coeficiente adimensional, o coeficiente de impulso axial (C_T), cuja expressão de cálculo se apresenta em (3.2).

$$C_T = \frac{\text{Impulso Axial}}{\text{Força Dinâmica}} = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (3.2)$$

Na Figura 3.4 é apresentada, para o mesmo aerogerador, a curva do coeficiente de impulso axial.

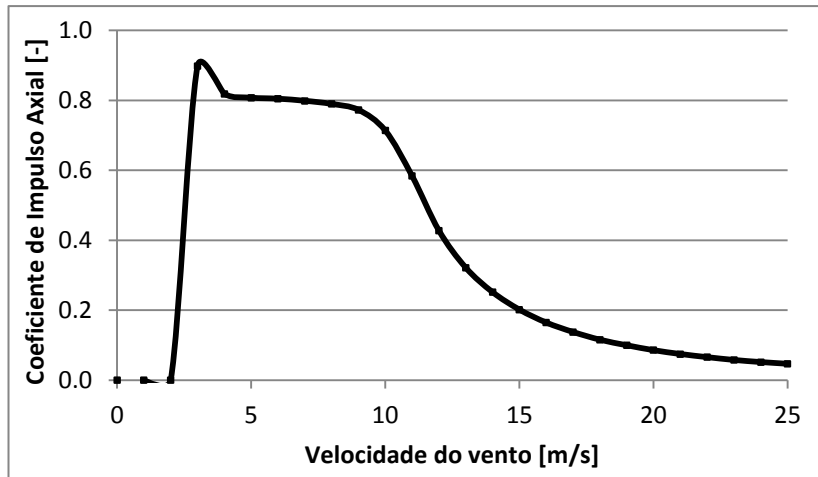


Figura 3.4 – Curva do coeficiente do impulso axial do aerogerador Vestas V112.

As três curvas aqui apresentadas foram elaboradas para uma determinada massa volúmica do ar, sendo importante referir que as mesmas variam com o valor dessa massa volúmica.

3.4 Constituição do aerogerador

O aerogerador pode ser dividido em três partes principais: rotor, cabina e torre. Os principais componentes de um aerogerador podem ser observados na Figura 3.5.

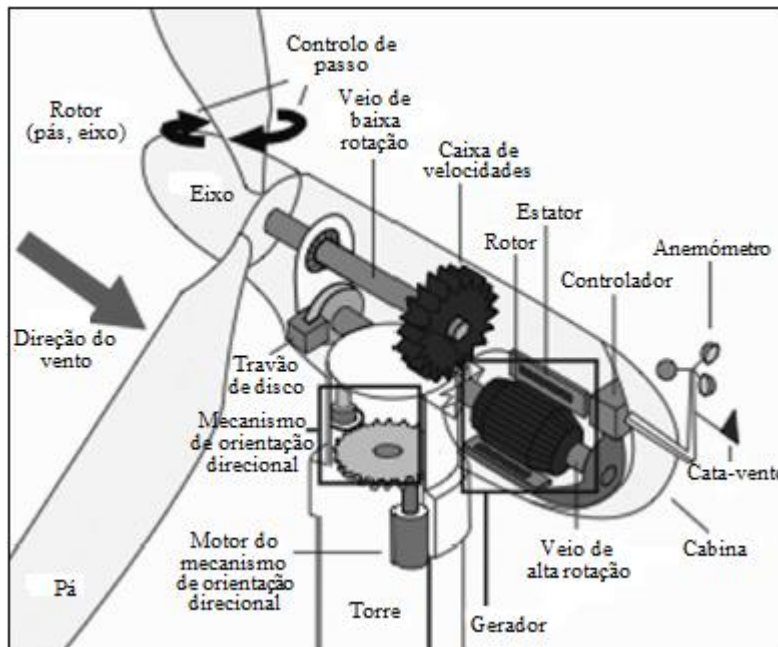


Figura 3.5 – Esquema dos principais componentes de um aerogerador de grandes dimensões (adaptado de [11]).

3.4.1 Rotor

Os aerogeradores são classificados quanto à orientação do eixo do rotor em relação ao solo em aerogeradores de eixo horizontal e aerogeradores de eixo vertical. Aqui neste texto dar-se-á maior ênfase aos aerogeradores de eixo horizontal, que são os mais comercializados.

Em relação à superfície de ataque do vento o rotor pode ser colocado a montante ou a jusante da torre. A opção de colocação a montante generalizou-se devido ao facto do vento incidente não ser perturbado pela torre.

O número de pás é outro fator determinante do aerogerador, sendo que para sua compreensão é necessário o entendimento do conceito de solidez das pás do rotor. A solidez é definida como sendo a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas mesmas. Se o diâmetro e a solidez forem mantidos constantes, o rendimento aumenta com o número de pás, devido à diminuição das chamadas perdas de extremidade.

O acréscimo na energia capturada ao vento está estimado em 3 a 5% quando se passa de duas para três pás, mas esta percentagem vai-se tornando progressivamente menor à medida que se aumenta o número de pás. Como resultado, a grande maioria dos aerogeradores em operação apresentam rotores com três pás.

A vida útil do rotor está relacionada com os esforços a que fica sujeito e com as condições ambientais em que se insere. A escolha do material para construção das pás do rotor é então fundamental, sendo que atualmente a escolha faz-se entre a madeira, os compostos sintéticos e o aço.

Os compostos sintéticos constituem os materiais mais usados nas pás dos aerogeradores, nomeadamente, plásticos reforçados com fibra de vidro. Estes materiais caracterizam-se por serem baratos, robustos, resistentes à fadiga e, principalmente, por serem facilmente moldáveis, o que é uma vantagem importante na fase de fabrico. As fibras de carbono apresentam melhores propriedades mecânicas, porém o seu preço elevado é um obstáculo à sua difusão [3].

3.4.2 Cabina

Na cabina, comumente referida pelo termo francês *nacelle*, estão alojados diversos equipamentos, tais como o veio principal, o travão de disco, o gerador e o mecanismo de orientação.

O veio principal de baixa rotação transfere o binário do rotor para a caixa multiplicadora. A caixa é normalmente o elemento escolhido para adaptar a frequência do rotor à frequência do gerador, para os geradores assíncronos. O gerador converte a energia mecânica disponível no veio de alta rotação em energia elétrica.

A função de alinhamento entre o rotor e a direção do vento, para extração da máxima energia possível, é assegurada por um mecanismo de orientação direcional. Este mecanismo é constituído por motores que, em face da informação recebida de um sensor de direção do vento, rodam a cabina e o rotor, para que estes fiquem adequadamente posicionados.

Na parte superior da cabina estão montados um anemómetro e um sensor de direção. Os dados de velocidade do vento são utilizados para efetuar o controlo do aerogerador, nomeadamente a entrada em funcionamento a partir da velocidade de corte inferior e a

paragem para velocidades de vento superiores a velocidade de corte superior. A informação de direção do vento é usada no controlo do mecanismo de orientação direcional [3].

3.4.3 Torre

A torre é responsável pelo suporte da cabina e pela elevação do rotor até uma altura em que a velocidade do vento é maior e menos perturbada pelo efeito da superfície do terreno.

As torres modernas ultrapassam a centena de metros de altura acima do solo, pelo que a estrutura tem de ser dimensionada para suportar cargas significativas, bem como para resistir a uma exposição de condições atmosféricas ao longo da sua vida útil, estimada em cerca de vinte anos.

O tipo de torres mais comuns são as tubulares, sendo as mesmas feitas em aço ou betão. Estas torres são seguras para o pessoal da manutenção, que pode usar uma escada ou elevador interior para aceder a cabina [3].

3.5 Aerodinâmica das pás

Os aerogeradores podem ser classificados de acordo a interação das pás com o vento. Esta interação das pás com o vento pode ser por arrasto ou sustentação, ou por uma combinação dos dois.

Nos dispositivos de interação aerodinâmica por arrasto, o vento “empurra” a pá forçando o rotor a girar em torno do eixo. Estes dispositivos apresentam a limitação da velocidade das pás não poder exceder a velocidade do vento e requerem muito material para as pás, o que torna a comercialização destes dispositivos limitada. O anemómetro de copos é um exemplo de dispositivo que utiliza este princípio.

Nos dispositivos de interação aerodinâmica por sustentação, as pás podem mover-se a velocidades superiores à do vento, sendo estes dispositivos mais eficientes em termos aerodinâmicos e na quantidade de material necessária para as pás. A razão de velocidades de ponta é a velocidade da ponta da pá a dividida pela velocidade do vento. No ponto de máxima eficiência do rotor, a razão de velocidades da ponta é cerca de 7 para os dispositivos de sustentação e 0,3 para os dispositivos de arrasto [11].

3.5.1 Forças atuantes sobre uma pá

A geometria das pás do rotor é fundamental no funcionamento do aerogerador. A secção transversal da pá do aerogerador tem a forma de um perfil alar, sendo determinante na quantidade de energia extraída a cada velocidade do vento.

Na Figura 3.6 representam-se as forças atuantes sobre um perfil alar devido ao escoamento. Para compreensão das forças envolvidas é necessário apresentar algumas grandezas, nomeadamente vetores de velocidade e ângulos, envolvidas neste fenómeno.

O vetor da velocidade aparente do vento (W) resulta da conjugação de duas componentes: a velocidade do vento real (U_p) e a velocidade tangencial da pá (U_t).

O ângulo do escoamento (ϕ) é o resultado da soma de dois ângulos:

- Ângulo de ataque (α) – ângulo entre a linha de corda, linha que une os bordos de entrada e saída do perfil alar, e o vetor de velocidade aparente do vento;

- Ângulo de passo (β) – ângulo entre o plano de rotação da pá e a linha de corda.

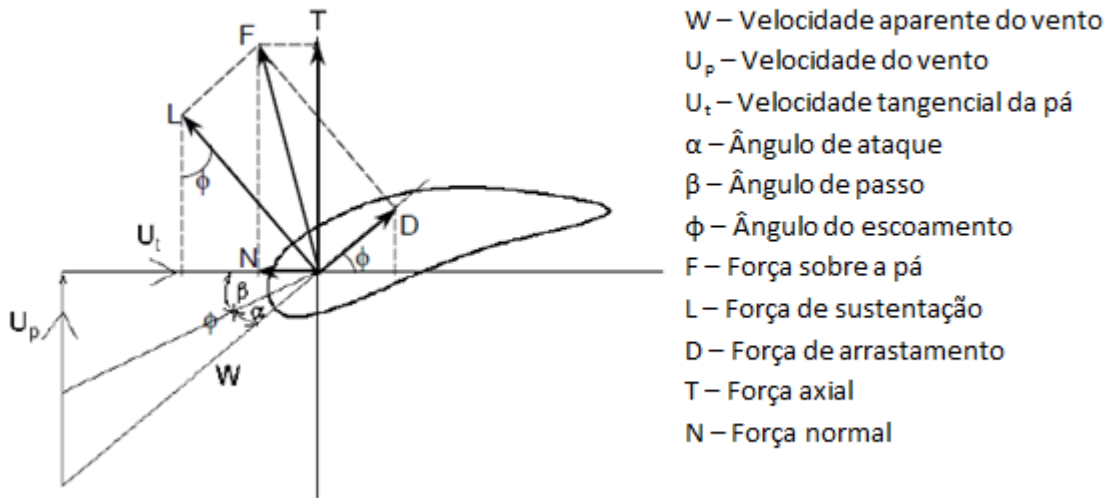


Figura 3.6 – Forças atuantes sobre a pá de um aerogerador (adaptado de [3]).

Na Figura 3.6 assiste-se à decomposição do vetor força (F) por dois modos distintos. Num caso efetua-se a decomposição do vetor na direção da velocidade aparente, força de arrasto (D), e na direção perpendicular à velocidade relativa, força de sustentação (L). O outro modo consiste na decomposição do vetor na direção do plano de rotação e na direção perpendicular, obtendo-se respetivamente a força normal (N) que contribui para o movimento da pá e a força axial (T) que contribui para o binário aplicado sobre o gerador [3].

3.6 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se a tecnologia de conversão da energia do vento, destacando as suas principais características e elementos constituintes.

Esta tecnologia passou por uma grande evolução desde da década de 70, altura em que surgiu um interesse renovado pela energia de base eólica. Atualmente está-se em presença de uma tecnologia madura, refletida em tempos de vida úteis superiores a 20 anos, sendo que para tal contribuiu muito o aumento do conhecimento e entendimento dos fenómenos do escoamento atmosférico e os seus efeitos sobre os aerogeradores.

No próximo capítulo são apresentadas as normas que descrevem os requisitos de projeto de um aerogerador e de um parque, na ótica da adequação da tecnologia às condições de vento de um local.

4 Normas de projeto de aerogeradores e parques eólicos

A regulamentação do projeto de parques eólicos e aerogeradores foi numa fase inicial alvo de normas nacionais, tal como referido anteriormente. Após o surgimento da norma internacional IEC 61400-1 “*Wind Turbine Generator Systems – Part I: Design Requirements*”, esta tornou-se a referência relativamente aos requisitos de projeto.

Porém, é de destacar que o nível de detalhe dos requisitos de projeto fornecidos em *Germanischer Lloyd’s Guidelines for the Certification of Wind Turbines*, comumente designadas por regras GL, vão além do definido na norma IEC 61400-1, sendo por isso que as regras GL são necessárias em partes da documentação de projeto requerida para certificação.

A IEC 61400 – 1 descreve os requisitos essenciais ao funcionamento adequado de um aerogerador, referindo-se aos vários subsistemas dos aerogeradores: mecanismos de controlo e proteção, sistemas elétricos internos e estruturas de suporte. O uso desta norma requer a utilização conjunta de outras normas IEC e ISO (*International Organization for Standardization*), não sendo a mesma adequada para instalações em zonas marítimas. Os principais elementos constituintes da IEC 61400 – 1 são:

- Requisitos técnicos para garantir a segurança da estrutura e dos sistemas de controlo, mecânicos e elétricos.
- Requisitos de projeto, construção, instalação, operação e manutenção.
- Métodos de projeto.
- Definição das classes³ de segurança e garantias de qualidade.

Nas próximas secções serão apresentados os aspetos mais importantes relativos à caracterização da tecnologia, das condições externas e das condições específicas do local.

4.1 Classificação de aerogeradores

As classes e subclasses padrão de aerogeradores são definidas, respetivamente, em função da velocidade do vento, V_{ref} ³, e da intensidade de turbulência, I_{ref} ⁴, como se pode observar na Tabela 4.1, sendo o intuito desta classificação a caracterização de diferentes locais tipo.

³ Um aerogerador pertencente a uma classe com uma velocidade de referência V_{ref} , é projetado para resistir a climas em que o valor extremo previsto da média de 10 minutos de velocidade de vento à altura do eixo do rotor, para um período de recorrência de 50 anos, é inferior ou igual a V_{ref} .

⁴ I_{ref} é o valor esperado da intensidade de turbulência a 15 m/s. I_{ref} é definido como o valor médio e não como o valor representativo, como acontecia na 2ª edição da IEC 61400-1.

A classe S de aerogeradores é usada para condições de vento especiais ou quando se pretende assegurar valores limites diferentes dos presentes na Tabela 4.1. Os valores de projeto devem ser especificados na documentação do projeto e devem refletir pelo menos as condições mais severas antecipadas para o local de instalação do aerogerador.

Tabela 4.1 – Parâmetros básicos das classes de aerogeradores (adaptado de [9]).

Classe de aerogeradores		I	II	III	S
V_{ref}	[m/s]	50	42,5	37,5	Valores especificados pelo fabricante
A	I_{ref} [-]	0,16			
B	I_{ref} [-]	0,14			
C	I_{ref} [-]	0,12			

O tempo de vida para os aerogeradores das classes I até III é no mínimo 20 anos [9].

A documentação do projeto do aerogerador deve incluir os parâmetros ambientais, elétricos e do solo usados no projeto. Os parâmetros ambientais são divididos em condições de vento e outras condições ambientais, enquanto as condições elétricas referem-se às condições da rede de energia elétrica. Já as propriedades do solo são importantes no projeto das fundações do aerogerador.

4.2 Caracterização dos parâmetros de vento

O regime de vento para cargas e considerações de segurança é dividido em condições de vento normais, cuja ocorrência é frequente durante o período de operação normal do aerogerador, e extremas, que são definidas como tendo períodos de recorrência de 1 ou 50 anos.

No projeto deve ser incluída a combinação das situações mais críticas com os diferentes modos de operação dos aerogeradores [9].

A norma define um conjunto de dados de vento que têm de ser estimados para a avaliação do local onde se pretende efetuar a instalação do aerogerador, sendo aqui os mesmos enunciados:

- Valores extremos de velocidade do vento baseados em médias de amostras de 10 minutos à altura do eixo do rotor para um período de recorrência de 50 anos;
- Função densidade de probabilidades da velocidade do vento, $p(V_{eixo})$, no intervalo de V_{in} a V_{out} ;
- Desvio padrão da turbulência ambiente ($\hat{\sigma}$) – definido como o valor médio do desvio padrão da componente longitudinal – e desvio padrão dos valores de desvio padrão da turbulência ambiente ($\hat{\sigma}_\sigma$), para V_{eixo} entre V_{in} e V_{out} e para V_{eixo} igual à V_{ref} ;
- Inclinação do escoamento;
- Perfil vertical de velocidades;
- Massa volúmica do ar.

Todos os parâmetros atrás enunciados, exceto a massa volúmica do ar, são avaliados com base em médias de amostras de dados de vento de 10 minutos. Os dados devem ser analisados para intervalos de velocidade não superiores a 2 m/s e intervalos de direção não superiores a 30°.

Os parâmetros locais de vento devem ser medidos no intervalo de $0,2 V_{ref}$ a $0,4 V_{ref}$ e extrapolados, ou calculados a partir de medições feitas no local e registos de longo termo de estações meteorológicas.

O período de monitorização deve permitir obter, no mínimo, dados referentes a um período de 6 meses. Quando as variações sazonais provocam alterações relevantes nas condições de vento, o período de monitorização deve ter a duração suficiente para permitir refletir esses efeitos [9].

O valor da massa volúmica vai influenciar as cargas originadas sobre os aerogeradores, sendo por isso importante a sua correta caracterização.

4.2.1 Turbulência e esteira

As flutuações de velocidade do vento em torno de um valor médio têm um impacto significativo nas cargas originadas sobre o aerogerador. A avaliação do efeito destas variações é realizada através da definição da curva de intensidade de turbulência em função da velocidade do vento.

No universo da energia eólica define-se intensidade de turbulência, como referido na secção 2.2.1, como variações aleatórias da velocidade de vento para médias de intervalo de tempo de 10 minutos, sendo expressa matematicamente pela equação (4.1).

$$I_{turb} = \frac{\sigma_{vel}}{V_{eixo}} \quad (4.1)$$

Da 2ª para 3ª edição norma IEC 61400-1, ocorreu uma alteração quanto à definição do valor da intensidade de turbulência de referência referido na tabela das classes padrão de aerogeradores. Enquanto na 2ª edição é apresentado o valor representativo da intensidade de turbulência, na 3ª edição o valor expresso é o valor médio. A distinção entre o valor representativo da intensidade de turbulência (I_{rep}) e o valor médio da intensidade de turbulência ($I_{méd}$) reside no numerador a utilizar na expressão (4.1). Enquanto para a primeira se utiliza o valor representativo do desvio padrão (σ_1), para a segunda utiliza-se o valor médio do desvio padrão ($\hat{\sigma}$). O valor representativo do desvio padrão da turbulência deve ser dado pelo valor correspondente ao quantil 90% dos valores de desvio de padrão de turbulência ambiente verificados para velocidades do vento à altura do eixo (4.2).

$$\sigma_1 = \hat{\sigma} + 1,28\hat{\sigma} \quad (4.2)$$

Este valor representativo do desvio padrão deve ser comparado com o valor correspondente definido pela norma IEC 61400-1, cuja expressão de cálculo se encontra em (4.3). O valor de I_{ref} é obtido da tabela das classes padrão de aerogeradores, tendo em conta a classificação do aerogerador em questão.

$$\sigma_1 = I_{ref}(0,75V_{eixo} + b) \quad (4.3)$$

O termo b , cujo valor é 5,6 de acordo com edição 3 da norma IEC 61400-1, deve-se ao facto, já referido anteriormente, do valor da intensidade de turbulência de referência, I_{ref} , definido nas classes padrão de aerogeradores, se referir ao valor médio da intensidade de turbulência e não ao valor representativo, sendo então necessária a adição do termo para se obter o valor representativo do desvio padrão [9].

A configuração do parque eólico é fundamental para o correto funcionamento dos aerogeradores, devido ao efeito de esteira que se gera após a passagem pelos rotores de aerogeradores vizinhos. O efeito de esteira tem duas consequências principais: por um lado leva à uma diminuição da perda de produção e por outro lado provoca um incremento da turbulência experimentada pelos aerogeradores.

A norma IEC 61400 – 1 recorre à definição da intensidade de turbulência efetiva, I_{ef} , para incluir a turbulência acrescentada pelos efeitos de esteira à turbulência ambiente. A intensidade de turbulência efetiva pode ser definida como a intensidade de turbulência que causa o mesmo o efeito que o conjunto da turbulência proveniente de todas as direções.

$$I_{ef} = \frac{1}{V_{eixo}} \times \max\{\hat{\sigma}_T\} \quad (4.4)$$

O $\hat{\sigma}_T$ presente na expressão (4.4) trata-se do desvio padrão da velocidade do vento causado pelo efeito conjunto da turbulência ambiente e da turbulência devido ao efeito de esteira dos aerogeradores vizinhos. A componente da turbulência devido ao efeito de esteira é influenciada pelo distanciamento entre os aerogeradores e pelos coeficientes de impulso axial (C_T) das máquinas. A norma define como espaçamento mínimo, para validade dos modelos fornecidos, o valor de 3 vezes o diâmetro do rotor.

A intensidade de turbulência efetiva é calculada como uma função da velocidade de vento e deve ser comparado com os valores fornecidos pela norma no intervalo de $60\% V_n^5$ até V_{out} .

A 3ª edição da norma IEC 61400-1 de 2005 foi a primeira a apresentar um modo de incluir o efeito de esteira na intensidade de turbulência. No anexo A é apresentado a descrição do modelo.

O estudo Risø-R-1188 (EN) [12] refere que um aerogerador apenas está sujeito ao efeito da esteira dos aerogeradores vizinhos se estes estiverem a uma distância inferior a 10 vezes o valor dos diâmetros dos seus rotores. É referido ainda que os efeitos de esteira de aerogeradores “escondidos” atrás de outros aerogeradores não necessitam de ser considerados [12]. Na Figura 4.1 pode ser visualizado o atrás exposto.

⁵ V_n é a velocidade mínima a que se atinge a potência nominal do aerogerador.

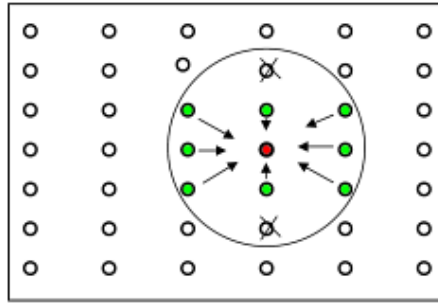


Figura 4.1 – Esquema representativo dos aerogeradores que provocam esteira no escoamento sobre determinado aerogerador (retirado de [10]).

Relativamente ao ângulo de exposição à esteira⁶, o estudo Risø-R-1188 (EN) conclui que é suficiente considerar uma distribuição uniforme da turbulência e um ângulo de exposição à esteira de 21,6°, em vez de modelos com variação do ângulo de exposição à esteira.

No anexo B apresentam-se algumas considerações acerca da turbulência ambiente no interior de grandes parques eólicos.

4.2.2 Perfil vertical de velocidades

O perfil vertical de velocidades de vento, $V(z)$, define a velocidade média do vento como uma função da altura, z , acima do solo. De acordo com a norma, o perfil vertical de velocidades do vento é dado pelo modelo da lei de potência, sendo a sua expressão representada em (4.5).

$$V(z) = V_{eixo} \times \left(\frac{z}{z_{eixo}} \right)^\alpha \quad (4.5)$$

O perfil de velocidades assumido é usado para determinar o *shear factor* (α) médio ao longo da área varrida pelo rotor. O *shear factor* médio local deve situar-se no intervalo de 0 a 0,2. Na ausência de dados a sua determinação será efetuada com base na topografia do local.

4.2.3 Inclinação do escoamento

O ângulo de inclinação do escoamento médio em relação a um plano horizontal deve estar compreendido no intervalo de -8° a 8°. A norma IEC 61400-1 recomenda a verificação deste requisito para todos os setores, assim como refere que deve ser assumido que o ângulo de inclinação não varia com a altura [9].

4.2.4 Distribuição de frequências de velocidade

A distribuição das velocidades do vento é importante para o aerogerador porque determina a frequência de ocorrência de casos individuais de cargas para situações normais de projeto. A norma IEC 61400-1 define que a distribuição de frequências da velocidade do vento verificada no local de instalação do aerogerador deve ser inferior à distribuição assumida para

⁶ Ângulo de exposição esteira pode ser definido, de um modo simplista, como o cone onde os efeitos sobre o escoamento, após passagem pelo rotor do aerogerador, se fazem sentir.

efeitos de cálculo à fadiga na gama de velocidades compreendidas entre $0,2 V_{ref}$ e $0,4 V_{ref}$, tal como pode ser observado na Figura 4.2.

A distribuição assumida para efeito de cálculos à fadiga é a distribuição de Rayleigh, já apresentada na secção 2.2.4. $V_{méd}$ é dada pela expressão (4.6), de acordo com a norma IEC 61400-1, o que permite verificar que a distribuição difere consoante a classe do aerogerador.

$$V_{méd} = 0,2V_{ref} \quad (4.6)$$

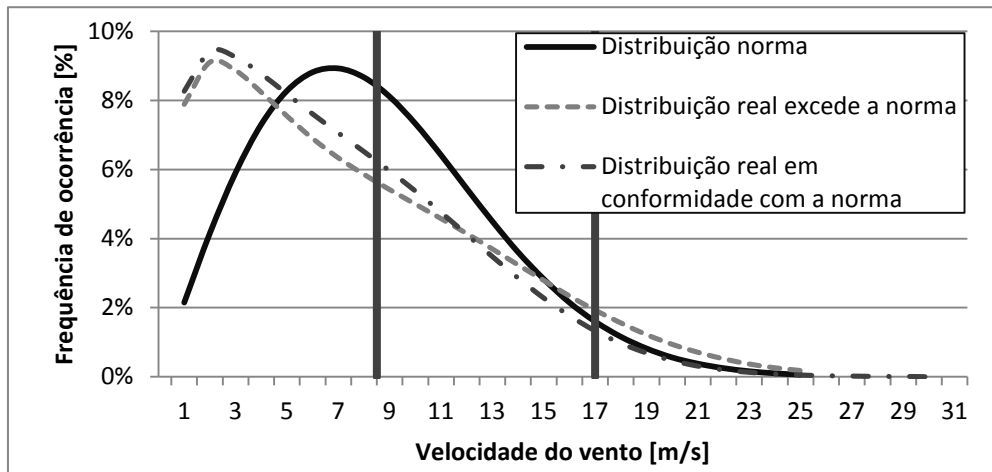


Figura 4.2 – Esquema ilustrativo das distribuições de frequências de velocidade do vento.

4.2.5 Ventos extremos

A capacidade de estimar o regime de ventos extremos para longos períodos em locais particulares é de grande importância no projeto do parque eólico. O projeto dos aerogeradores tem de garantir que os mesmos resistem a eventos de vento extremo, incluindo valores extremos de velocidade de vento, assim como transientes de variações extremas dos valores de velocidade e direção do vento.

As condições extremas de velocidade de vento devem ser verificadas com os aerogeradores nos diversos modos de operação, sendo estas condições extremas caracterizadas por um período de recorrência.

A verificação dos valores extremos de velocidade do vento inclui os valores extremos de velocidades médias, assim como as rajadas. A norma IEC 61400-1 recomenda a verificação do valor extremo da velocidade média em intervalos de 10 minutos para um período de recorrência de 50 anos, sendo que este valor deve ser inferior a V_{ref} definido nas classes padrão de aerogeradores. Uma verificação alternativa é a da máxima rajada, que pode ser definida como a velocidade média para um intervalo de tempo de 3 segundos, para um período de recorrência de 50 anos.

A norma apresenta um modelo para cálculo dos valores extremos de velocidade do vento a diferentes alturas para um período de recorrência de 50 anos. O modelo está definido na expressão (4.7).

$$V_{e50}(z) = 1,4 V_{ref} \left(\frac{z}{z_{eixo}} \right)^{0,11} \quad (4.7)$$

Define ainda um modelo para cálculo dos valores extremos de velocidade do vento a diferentes alturas para um período de recorrência de 1 ano, expresso em (4.8).

$$V_{e1}(z) = 0,8V_{e50}(z) \quad (4.8)$$

Os perfis verticais de velocidade do vento obtidos dos modelos anteriores devem ser comparados com os perfis obtidos pela expressão geral (4.5), definindo V_{eixo} como a velocidade extrema estimada para o local e α como *shear factor* do local.

Relativamente a ventos extremos é necessário ainda considerar o fator de rajada (FR), que pode ser definido como o quociente da velocidade máxima de uma amostra de 10 minutos sobre a velocidade média da mesma amostra, tal como se representa na equação (4.9).

$$FR = \frac{V_{máx[10\ min]}}{V_{méd[10\ min]}} \quad (4.9)$$

A norma IEC 61400-1 define um conjunto de eventos transientes a que os aerogeradores devem resistir, dos quais se efetua aqui uma descrição sumária:

- Evolução de rajada extrema: caracteriza-se por uma diminuição na velocidade, a que se segue sequencialmente um aumento e diminuição abruptos, com posterior retorno ao valor de velocidade anterior à ocorrência do transiente. A amplitude e duração da rajada variam com o período de retorno.
- Mudança de direção extrema: trata-se de uma variação sustentada na direção do vento, seguindo a forma da curva cosseno. A amplitude e duração da mudança variam com o período de retorno.
- Rajada coerente extrema com mudança de direção: consiste numa variação sustentada, conjunta e simultânea na velocidade e direção do vento seguindo a forma da curva cosseno.
- Inclinação extrema do perfil de velocidades: trata-se de uma variação no gradiente vertical e horizontal de velocidades do vento ao longo do rotor do aerogerador. O gradiente primeiro aumenta e depois regressa ao nível inicial, seguindo a forma da curva do cosseno. As inclinações extremas verticais e horizontais não são aplicadas simultaneamente.

4.3 Outras condições ambientais

Para além do vento, existem outras condições ambientais que podem afetar a integridade estrutural e segurança dos aerogeradores por ações térmicas, fotoquímicas, corrosivas, mecânicas, elétricas, entre outras. É necessário ter também em atenção que combinações de condições climáticas podem aumentar os seus efeitos.

Condições ambientais, tais como a temperatura, a humidade, a massa volúmica do ar, radiação solar, a salinidade, entre outras, devem ser tidas em consideração, e as suas ações resultantes devem constar na documentação do projeto.

As condições climáticas devem ser definidas em termos de valores representativos ou como valores limites de condições variáveis. A probabilidade da ocorrência simultânea de condições climáticas deve ser considerada na elaboração do projeto [9].

4.4 Avaliação do terreno

A avaliação topográfica do local permite aferir da complexidade do terreno a partir de uma série de regras baseadas em planos ajustados em zonas definidas em função da altura do eixo do aerogerador. Tanto a inclinação dos planos como o máximo desvio entre os planos e o terreno têm de estar dentro de limites especificados. Os parâmetros de classificação da complexidade do terreno estão definidos na norma IEC 61400-1 de 2005, tendo sido posteriormente revistos e alterados pela adenda IEC 61400-1/A1 de 2009 [10]. Em seguida são apresentados os dois modos de classificação, evidenciando-se as principais alterações.

De acordo com a norma IEC 61400-1 (2005), o terreno é avaliado em três áreas circulares (Figura 4.3), definidas em função da altura do eixo do aerogerador (z_{eixo}), tendo cada uma delas de respeitar as condições definidas na Tabela 4.2. O declive do plano ajustado refere-se ao declive do plano que melhor ajusta as variações topográficas n uma distância específica ao aerogerador e que passa através da base da torre do aerogerador. A variação de terreno corresponde à distância, na vertical, entre qualquer ponto da superfície e o plano ajustado. A área do plano ajustado para determinar a máxima variação do terreno é um disco com raio de 1,3 vezes a altura do eixo do aerogerador.

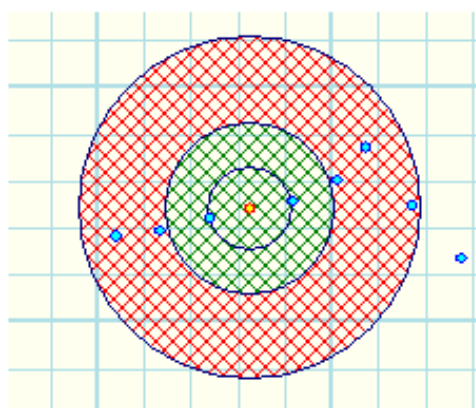


Figura 4.3 – Esquema ilustrativo da avaliação da complexidade do terreno de acordo com a norma IEC 61400-1 (2005) (retirado de [10]).

Tabela 4.2 – Indicadores da complexidade do terreno de acordo com a norma IEC 61400-1 (2005) (adaptado de [9]).

Raio da área circular em torno do aerogerador	Máximo declive do plano ajustado	Máxima variação do terreno
$5 z_{eixo}$	10°	$0,3 z_{eixo}$
$10 z_{eixo}$		$0,6 z_{eixo}$
$20 z_{eixo}$		$1,2 z_{eixo}$

As principais alterações, introduzidas pela adenda IEC 61400-1/A1 de 2009, foram a divisão das duas maiores áreas circulares em sectores de 30° e o ajustamento dos planos começou a ser feito para cada uma dessas secções de terreno, como pode ser observado na Figura 4.4.

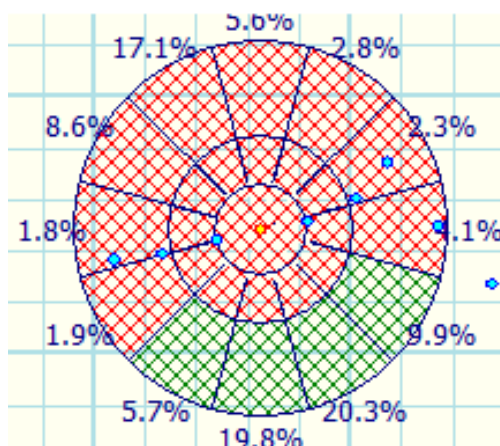


Figura 4.4 – Ilustração da avaliação da complexidade do terreno de acordo com a adenda IEC 61400-1/A1 (2009) (retirado de [10]).

Além disso passou-se a avaliar a distribuição de energia para cada setor, sendo o local caracterizado como complexo caso pelo menos 15% da energia contida no vento provenha de setores que não cumprem os requisitos definidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Indicadores da complexidade do terreno de acordo com a adenda IEC 61400-1/A1 (2009) (adaptado de [9]).

Raio da área circular em torno do aerogerador	Setor	Máximo declive de um plano ajustado	Máxima variação do terreno
5 z_{eixo}	360°	10°	0,3 z_{eixo}
10 z_{eixo}	30°		0,6 z_{eixo}
20 z_{eixo}	30°		1,2 z_{eixo}

A norma refere que quando o terreno é classificado como complexo, a estimativa da componente longitudinal da turbulência deve ser aumentada de modo a incluir o efeito da distorção do escoamento. Um modo de traduzir o efeito da complexidade do terreno é através da definição de um parâmetro de correção da estrutura da turbulência (C_{CT}), calculado de acordo com a expressão (4.10). Os valores de intensidade de turbulência serão multiplicados por este fator adicional.

$$C_{CT} = \frac{\sqrt{1 + (\hat{\sigma}_2/\hat{\sigma}_1)^2 + (\hat{\sigma}_3/\hat{\sigma}_1)^2}}{1,375} \quad (4.10)$$

Na ausência de dados das componentes da turbulência e caso o terreno seja considerado complexo, a edição de 2005 recomenda o uso do valor de C_{CT} igual 1,15.

A adenda de 2009 recorre, para o caso de ausência de dados das componentes da turbulência, a um índice de complexidade do terreno (i_c). Este índice é definido como:

- Zero, quando menos de 5% da energia provem de setores complexos;
- Um, quando mais de 15% da energia provem de setores complexos;
- Variando linearmente entre zero e um quando a energia proveniente de setores complexos varia entre 5 e 15%.

A partir do índice de complexidade de terreno obtém-se então o parâmetro de correção da estrutura da turbulência através da expressão (4.11).

$$C_{CT} = 1 + 0,15i_c \quad (4.11)$$

Um outro fator de grande importância na análise do terreno é a inclinação das encostas. A norma IEC 61400-1 define como valor limite 14°.

4.5 Avaliação da integridade estrutural de aerogeradores

A norma define que a avaliação da integridade estrutural do aerogerador pode ser efetuada de dois modos diferentes:

- Avaliação por referência a dados de vento – avaliação da integridade estrutural através da demonstração que as condições de vento verificadas nos locais não são mais severas do que as assumidas aquando do projeto do aerogerador.
- Avaliação por análise das cargas – avaliação da integridade estrutural através da demonstração que as cargas assumidas no projeto são mais severas que as verificadas no local. Devem ser salvaguardadas as respetivas margens de segurança e os cálculos devem levar em consideração as variações das condições do vento. Na ausência de dados sobre as componentes da turbulência e tratando-se de um terreno complexo, deve ser assumido que os desvios padrão das diferentes componentes da turbulência são iguais.

As avaliações definidas na norma permitem a identificação de locais críticos para a instalação de aerogeradores, cabendo aos promotores do parque em conjunto com os fabricantes dos aerogeradores decidir acerca da viabilidade da instalação dos aerogeradores.

No próximo capítulo apresentam-se os modelos de simulação do escoamento atmosférico que permitem avaliar os parâmetros definidos pela norma.

5 Modelos e programas de simulação

A caracterização do recurso é difícil, mas indispensável, como visto nos capítulos anteriores. O ideal seria a instalação de uma estação de medição em cada local onde se pretende efetuar a instalação de um aerogerador, porém tal seria extremamente dispendioso. Na realidade instala-se um número reduzido de estações de medição de velocidade e direção de vento, sendo posteriormente os resultados extrapolados no plano horizontal e no plano vertical.

Para a modelação do escoamento atmosférico existe uma diversidade de modelos que, em seguida se enumeram: os modelos meteorológicos, os modelos de mesoscala, modelos CFD (*Computer Fluid Dynamics*) e os modelos linearizados.

As ferramentas de simulação requerem dados de vento recolhidos localmente em estações de medição corretamente instrumentadas e ao longo de um período de tempo representativo para a estimativa do clima de ventos local.

No tratamento dos casos de estudo deste relatório recorreu-se a modelos linearizados, sendo nas próximas secções apresentadas as principais características dos programas de simulação utilizados.

5.1 Programa WAsP[®]

O WAsP, introduzido em 1987 pelo Departamento de Física Atmosférica e Energia do Vento do Laboratório Nacional *Risø*, Dinamarca, é um programa de extrapolação vertical e horizontal de estatísticas de vento. Neste trabalho recorrer-se-á à versão 10.1 do WAsP. A sua metodologia consiste em 5 blocos principais:

- Análise de dados de vento em bruto, recorrendo para tal a uma de duas aplicações fornecidas com o WAsP, o WAsP *Climate Analyst* ou o mais antigo *Observed Wind Climate Wizard*;
- Geração do atlas de vento ou do regime de vento generalizado;
- Estimativa do clima de vento ou do regime de vento local;
- Estimativa do potencial energético, sendo para tal necessário a definição da curva de potência do aerogerador;
- Cálculo da produção do parque eólico a partir das curvas de potência e dos coeficientes de impulso axial e da configuração dos aerogeradores no parque.

Os dados de entrada do WAsP são o atlas de vento do local e mapas com as características topográficas do local.

O uso do programa pode ser sumarizado em três fases: análise, aplicação e estimativa da produção do parque eólico. Na Figura 5.1 representam-se esquematicamente as três fases.

Na fase de análise parte-se de séries de dados de velocidade e direção do vento, obtidas através de estações de medição, para estimar o clima de ventos observado. A análise conjunta do clima de ventos observado com a descrição do local da estação de medição permite obter o clima de vento generalizado.

A fase de aplicação inicia-se com a previsão do clima de ventos local a partir do clima de ventos generalizado e da descrição do local. A curva de potência do aerogerador permite, em conjunto com o regime de ventos local, a previsão da produção anual do aerogerador.

Na fase de produção do parque eólico, obtém-se a produção bruta e as perdas de esteira através do regime de ventos local e das características dos aerogeradores, sendo que para as perdas de esteira é necessário conhecer a distribuição dos aerogeradores no parque. Como resultado da diferença entre a produção bruta de energia e as perdas de esteira obtém-se a produção líquida [13].

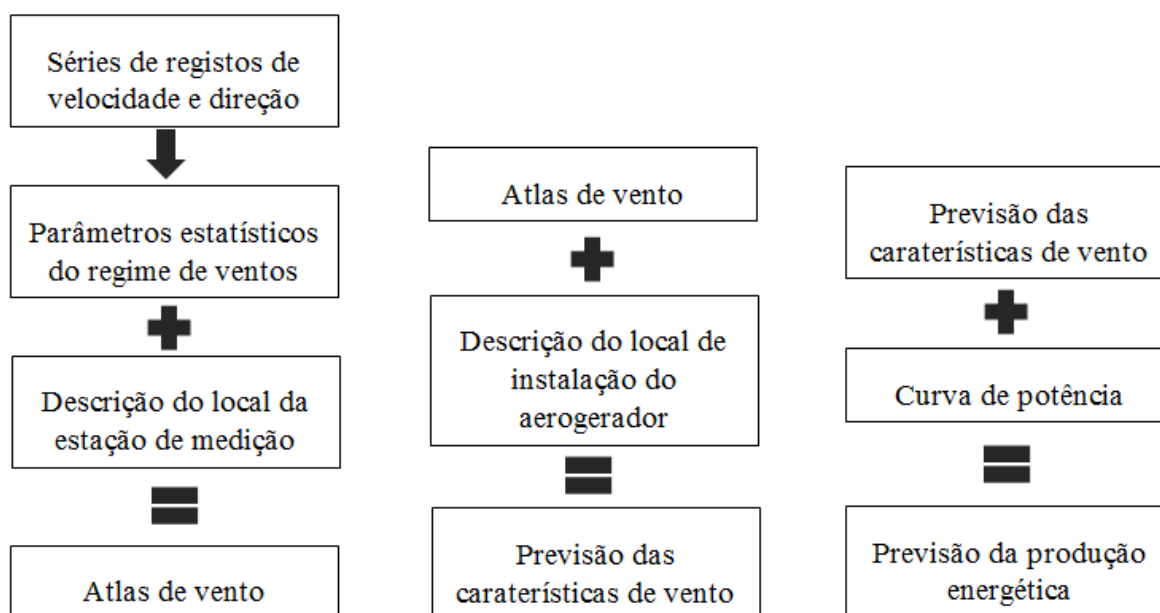


Figura 5.1 – Esquema representativo da metodologia do programa WASP (adaptado de [1]).

5.1.1 Limitações do WASP

As previsões obtidas com o WASP são satisfatórias caso se verifiquem as seguintes condições:

- A estação meteorológica e o local onde se pretende prever as características de vento estão sujeitos ao mesmo regime meteorológico, ou seja, ao mesmo regime de ventos generalizado;
- As condições de estabilidade estão próximas do regime neutro;
- O terreno em torno dos locais é suficientemente suave para que não ocorra descolamento do escoamento.

Esta última condição é fundamental para a capacidade do WASP em reproduzir as características do vento em terreno complexo [1].

Na presença de pendentes acentuadas, inclinações superiores a 30 %, aumenta a probabilidade de ocorrência do descolamento do escoamento, sendo o modelo linearizado do WAsP incapaz de prever a recirculação, podendo sobre ou subestimar os efeitos de aceleração do escoamento, o recurso eólico e a produção. Na Figura 5.2 é possível observar os fenômenos de recirculação.

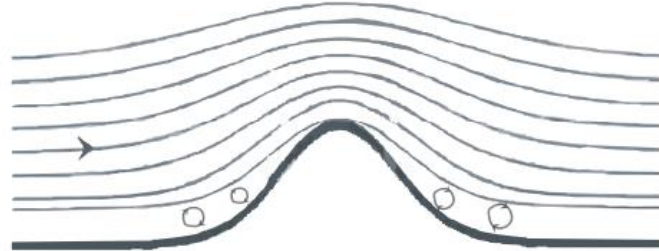


Figura 5.2 – Fenômenos de recirculação do escoamento perante pendentes acentuadas (retirado de [1]).

5.1.2 O parâmetro RIX

O programa WAsP utiliza o parâmetro RIX (*Ruggedness Index*) que permite avaliar a complexidade do terreno. Este parâmetro é definido como a percentagem do terreno dentro de uma certa distância a um sítio específico que é mais inclinada do que um valor limite, usualmente 30%. O índice foi proposto como uma medida grosseira para estimar a extensão dos fenômenos de separação do escoamento, ou seja a extensão em que o terreno não cumpre os requisitos do modelo linearizado do escoamento.

Se o RIX possuir um valor próximo de zero, o terreno encontra-se dentro dos limites de aplicação do WAsP. Quando o valor do RIX se afasta de zero significa que porções do terreno são mais inclinadas do que o valor limite e o fenómeno da separação do escoamento pode ocorrer, deixando o terreno de cumprir os requisitos para aplicação do WAsP.

É também importante referir que a diferença entre o RIX do local da estação de medição e o RIX do local de instalação do aerogerador (Δ RIX) pode induzir erros significativos na avaliação das condições de vento. Nos casos em que o local da estação de medição apresenta um valor de RIX superior ao local de instalação ocorre normalmente uma subestimativa dos valores de velocidade do vento. Já nos casos opostos verifica-se uma sobre estimativa dos valores de velocidade do vento. Em termos de análise da complexidade do terreno, o valor de Δ RIX é mais importante do que o valor absoluto de RIX [13].

5.2 WAsP Engineering®

O WEng (*WAsP Engineering*), introduzido em 2001 pelos autores do WAsP, é um programa complementar do WAsP cujo foco incide na avaliação da adequabilidade de locais para a instalação de aerogeradores, através da análise dos aspetos do vento que originam cargas sobre os aerogeradores. Trata-se de uma ferramenta de previsão de ventos extremos, inclinação de perfis verticais de velocidade, ângulos de inclinação de escoamento e turbulência sobre terrenos complexos [14].

5.3 Windfarm Assessment Tool[®]

O principal objetivo do WAT (*Windfarm Assessment Tool*) é facilitar a verificação das condições definidas pela norma IEC 61400-1, nomeadamente a consideração da interação entre os vários aerogeradores de um parque. As entradas do WAT são ficheiros provenientes do WAsP, do WEng e de outras ferramentas fornecidas com o WAsP e caracteriza-se pela interface tabelar e gráfica com que apresenta os resultados obtidos para os locais em estudo.

5.4 Considerações finais

Os programas de simulação do escoamento atmosférico são ferramentas de grande utilidade na previsão das condições de vento para os diferentes locais de instalação de aerogeradores. Porém, é necessário adotar uma posição crítica em relação aos resultados obtidos dos programas, assim como assegurar que as condições fundamentais ao seu funcionamento são respeitadas. Dentro das condições fundamentais destacam-se a qualidade das medições, representatividade e extensão, e as características do terreno.

6 Caso teste: Parque eólico Itália

O caso teste de Itália trata do projeto de um parque eólico com uma capacidade prevista de 43,7 MW, distribuída por 19 aerogeradores de capacidade nominal de 2,35 MW.

O local do projeto caracteriza-se pela presença de vegetação densa, possuindo árvores que alcançam os 18 metros, assim como, por um relevo relativamente acidentado.

6.1 Caracterização da área

A área do projeto do parque eólico I situa-se na província de Catanzaro, região de Calabria, no sul de Itália.

A altitude média na área do projeto é 1011 metros a.n.m. (acima do nível do mar), sendo o local de instalação a cota mais baixa de 846 metros e a mais alta de 1120 metros. Na Figura 6.1 representa-se a altitude do terreno, com a localização dos 19 aerogeradores e as duas estações de medição (A e B).

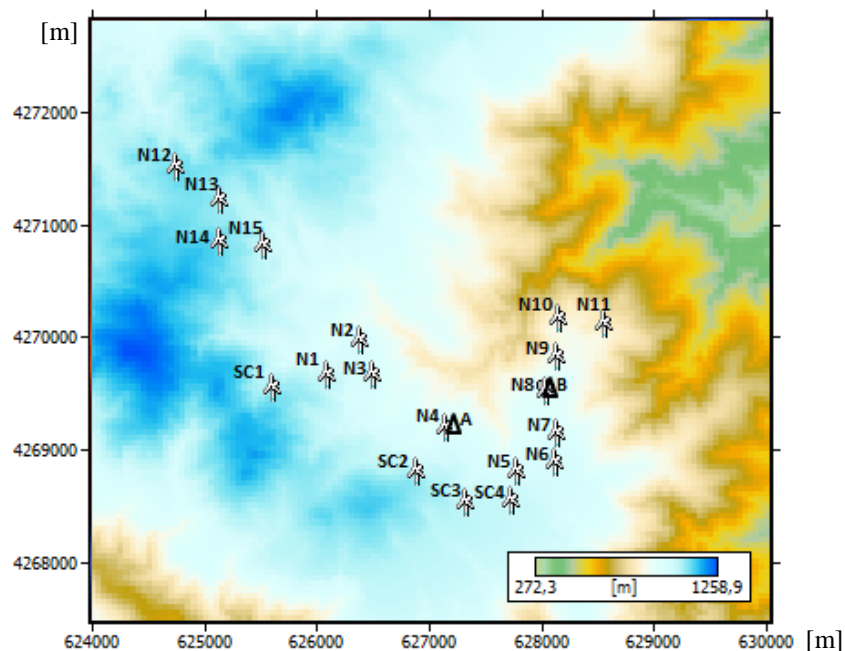


Figura 6.1 – Mapa de elevações do terreno do parque Itália.

Na Figura 6.2 representa-se o RIX na área do projeto. Verifica-se que, para certos locais do terreno, o RIX afasta-se bastante de zero, o que significa que se trata de um terreno complexo.

Neste terreno é provável a ocorrência do descolamento do escoamento em algumas zonas, surgindo em consequência fenômenos de recirculação do escoamento.

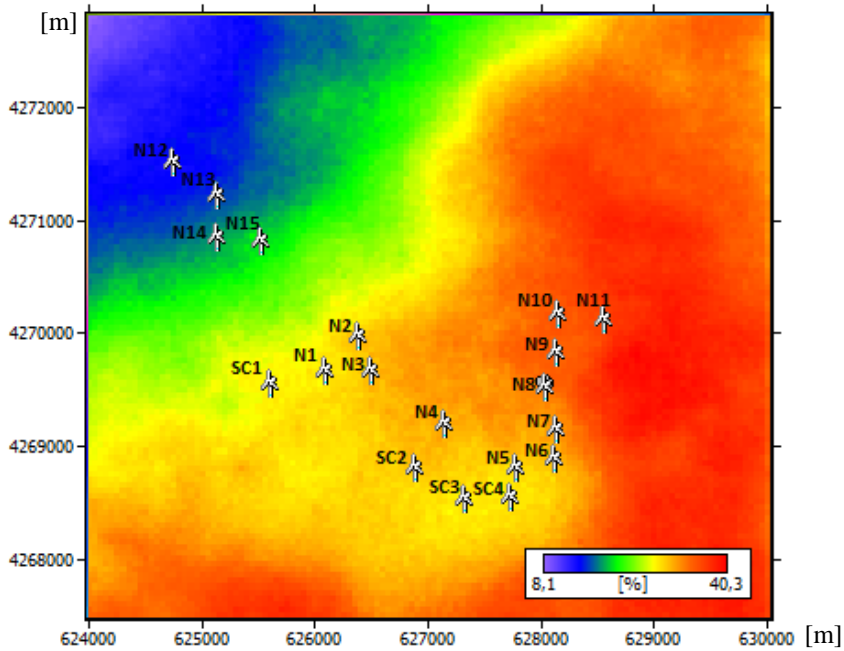


Figura 6.2 – RIX na área do parque Itália.

Na Figura 6.3 apresenta-se o Δ RIX em relação à estação de medição B. O intervalo de variação do Δ RIX é largo, o que atesta a complexidade do terreno, já verificada através dos mapas anteriores.

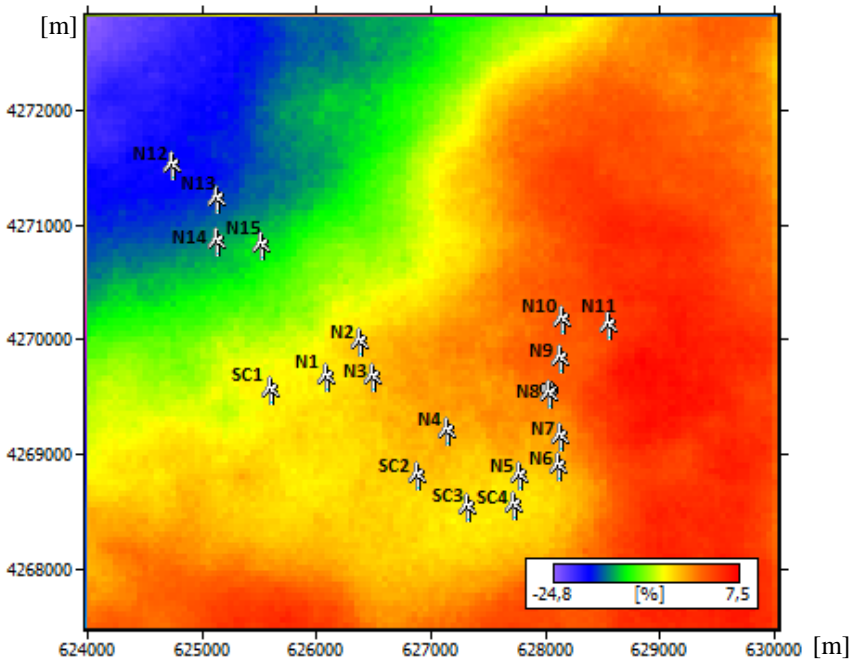


Figura 6.3 – Δ RIX na área do parque de Itália em relação à estação de medição B.

A caracterização das condições de vento para este local é difícil devido à complexidade do terreno. Neste caso, a utilização do WAsP requer precaução, pois o modelo linearizado de escoamento do WAsP é incapaz de prever fenómenos de recirculação do escoamento, muito prováveis neste tipo de terreno.

6.2 Caracterização do regime de vento

6.2.1 Estações de medição

A caracterização do regime de ventos foi obtida a partir de medições realizadas em duas estações de medição, designadas por estação A e estação B.

A recolha de dados de velocidade e direção foi realizada a uma frequência de 0,5 Hz, sendo após tratamento estatístico armazenados os valores médios, máximos, mínimos e de desvio padrão de cada amostra de 10 minutos.

Estação A

A estação A regista velocidade a 60, 58 e 40 metros acima do nível do solo (a.n.s.) e medições de direção a 58 e 40 metros a.n.s., registando também temperatura, humidade e pressão atmosférica. A estação está localizada numa área de vegetação densa, onde as árvores alcançam os 18 metros.

A série de dados em análise corresponde ao período de maio de 2009 a agosto de 2012.

Estação B

A estação B regista velocidade a 80, 60 e 40 metros a.n.s. e direção a 78 e 58 metros a.n.s.. Regista também temperatura. A estação está localizada numa área de vegetação densa, onde as árvores alcançam os 18 metros.

A série de dados em análise corresponde ao período de setembro de 2011 a agosto de 2012.

6.2.2 Massa volúmica do ar

O valor da massa volúmica do ar pode ser obtido a partir dos valores médios de pressão (p) e temperatura (T) obtidos da estação A e que estão representados na Tabela 6.1. O uso de dados da estação A deve-se ao facto de só esta possuir medições de temperatura e pressão atmosférica.

Tabela 6.1 – Valores médios de temperatura e pressão a partir da estação A do parque Itália.

Temperatura média [°C]	Pressão média [Pa]
13,9	90037,2

Pela equação dos gases perfeitos pode-se determinar o valor médio da massa volúmica (ρ) do ar para o local da estação.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (6.1)$$

Na expressão (6.1), R é a constante dos gases perfeitos, sendo o seu valor igual a $287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$. O valor médio obtido da massa volúmica do ar é $1,09 \text{ kg}/\text{m}^3$.

6.2.3 Distribuição de frequências de velocidade

Na Figura 6.4 são representados o histograma de ocorrências de velocidade e o respetivo ajustamento de Weibull para a estação B (80 m a.n.s.), pois esta apresenta uma altura máxima de registos superior.

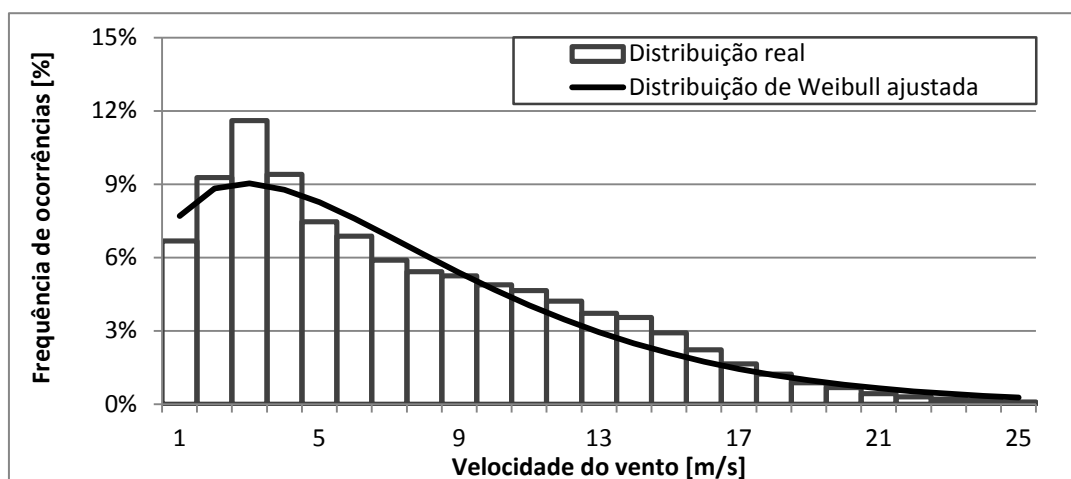


Figura 6.4 – Histograma de ocorrências de velocidade do vento e respetivo ajustamento de Weibull para os dados da estação B do parque Itália (80 m a.n.s.).

Na Tabela 6.2 apresentam-se os parâmetros do ajustamento e o respetivo erro quadrático.

Tabela 6.2 – Parâmetros do ajustamento de Weibull e respetivo erro quadrático, para o parque Itália.

Fator de escala – A [m/s]	Fator de forma – k [-]	Erro quadrático do ajustamento [%]
8,12	1,33	3,8

O ajustamento de Weibull obtido apresenta alguns problemas, nomeadamente a subestimativa do pico de frequências e das frequências na gama de 10 a 17 m/s, e a sobre estimativa das frequências na gama de 5 a 8 m/s.

Na Figura C.1 dos anexos apresenta-se a comparação entre a distribuição de frequência de ocorrências para os períodos Outono/Inverno e Primavera/Verão. A sazonalidade não apresenta para este local um efeito relevante, quando analisada para os dois períodos em questão.

6.2.4 Rosas de ocorrências, velocidade e energia

Na Figura 6.5 é possível observar a distribuição setorial das ocorrências, velocidade e energia do vento.

A análise das diferentes rosas permite identificar o setor WNW como o setor mais energético do vento, graças a uma clara predominância de ocorrências nesse setor e às maiores

velocidades médias nele registadas. O setor NE caracteriza-se também por velocidades médias interessantes, mas as ocorrências de vento desse rumo são muito escassas.

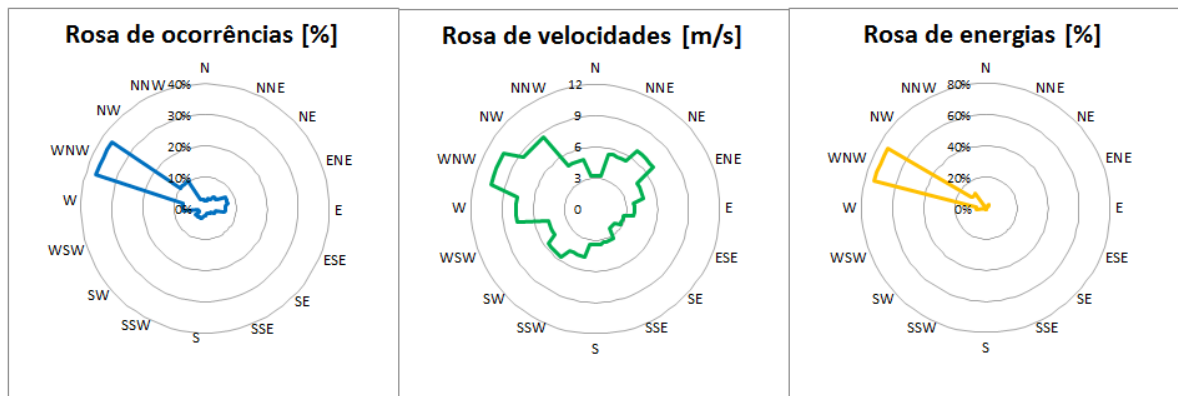


Figura 6.5 – Rosas de ocorrências, velocidade e energia para os dados da estação B do parque Itália (80 m a.n.s.).

6.2.5 Perfil vertical de velocidades

Todos os dados utilizados nas análises do perfil vertical de velocidades foram obtidos a partir da estação B, pois a mesma apresenta uma altura máxima de medição superior.

Na Figura 6.6 observa-se dispersão dos valores de *shear factor*, obtidos a partir das medições a 80 e 60 metros a.n.s., em função da velocidade do vento, registada a 80 metros a.n.s.. Constata-se que para velocidades reduzidas há uma grande dispersão de valores, verificando-se, inclusive, uma ocorrência considerável de valores negativos. Porém, não é na gama das baixas velocidades que as solicitações cíclicas originadas pelo *shear factor* são problemáticas para a integridade estrutural dos aerogeradores.

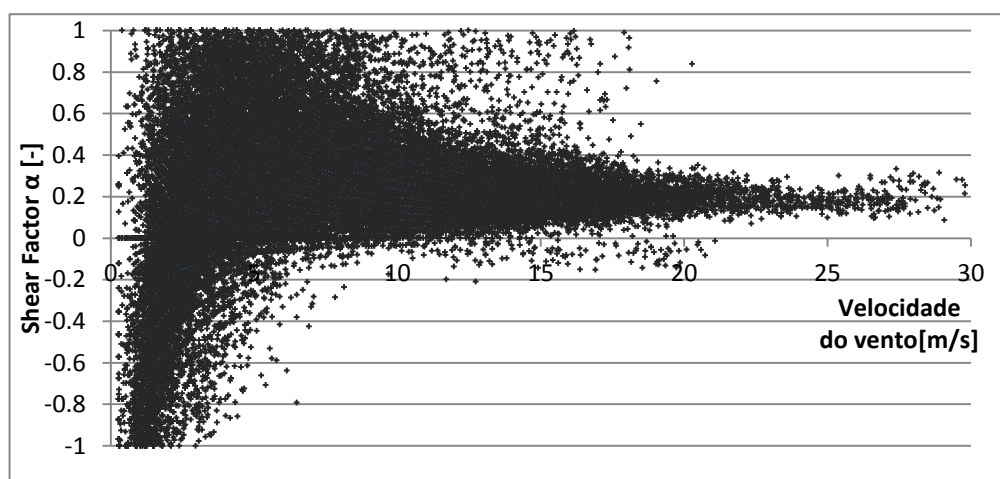


Figura 6.6 – Dispersão dos valores de *shear factor* em função da velocidade do vento, para o parque de Itália.

Na Figura 6.7 apresenta-se a distribuição de frequências de ocorrências dos valores de *shear factor*, considerando apenas os dados de velocidade superiores a 3 m/s. Verifica-se uma

ocorrência considerável de valores de *shear factor* superior ao limite de 0,2 definido pela norma.

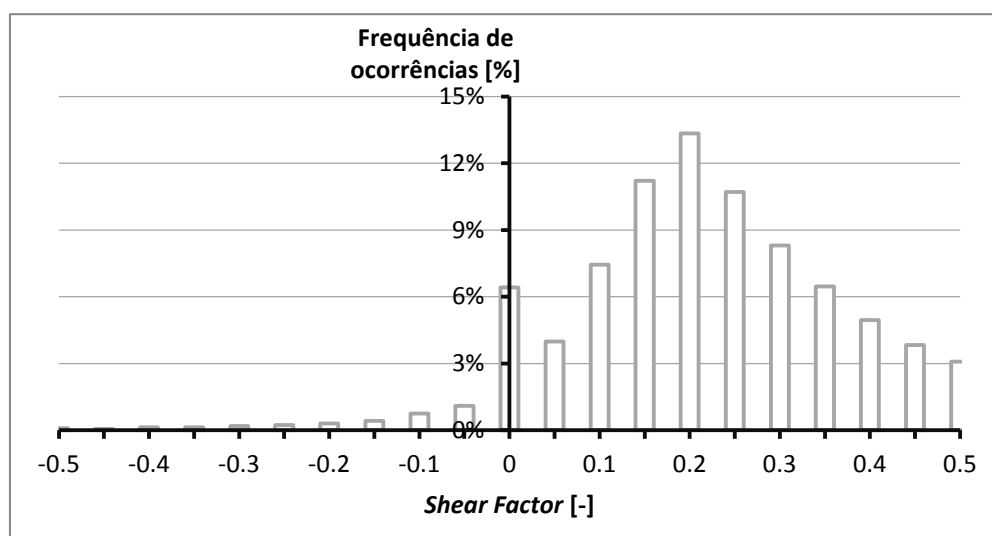


Figura 6.7 – Distribuição de frequências de ocorrências dos valores de *shear factor* obtidos dos dados de 80 e 60 m a.n.s. da estação B do parque Itália.

Na Tabela 6.3 estão representados os três valores médios de *shear factor* globais obtidos com base nos dados de diferentes alturas, assim como o valor médio de *shear factor* para o rumo dominante (WNW). A determinação dos valores médios foi realizada considerando apenas os valores correspondentes a velocidades de vento superiores a 3 m/s, velocidade típica de corte inferior dos aerogeradores.

Tabela 6.3 – Valores médios de *shear factor* para velocidades de vento superiores a 3 m/s, para o parque Itália.

Dados de vento	<i>Shear Factor</i> Global [-]	<i>Shear Factor</i> WNW [-]
ITAL681 Alturas: 80_60	0,295	0,255
ITAL681 Alturas: 80_40	0,316	0,275
ITAL681 Alturas: 60_40	0,357	0,290

A Figura 6.8 apresenta os perfis verticais de velocidade globais obtidos a partir dos conjuntos de dados obtidos a diferentes alturas e o perfil vertical de velocidades obtido para o rumo dominante a partir do conjunto de dados de 80 e 60 metros de altura.

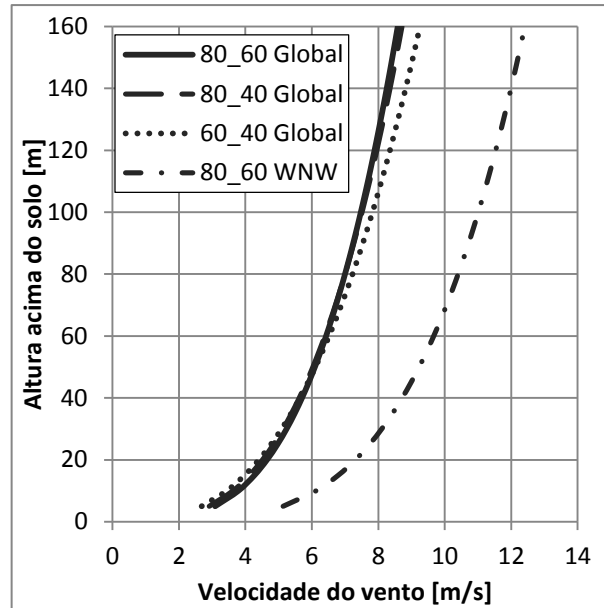


Figura 6.8 – Perfis verticais de velocidades obtidos a partir de dados da estação B do parque Itália.

A partir da análise da Tabela 6.3 e da Figura 6.8, verifica-se que o *shear factor* determinado com base em dados de alturas inferiores é superior ao correspondente determinado com base em dados de alturas superiores. Esta situação pode ser explicada pelo facto de a área possuir vegetação densa, onde as árvores tipicamente alcançam os 18 metros, sendo as medições efetuadas a alturas inferiores fortemente influenciadas pela presença da vegetação.

Relativamente à comparação do perfil vertical global com o perfil vertical do rumo dominante (WNW), constata-se que, neste caso, a inclinação do perfil para o rumo dominante ($\alpha = 0,255$) é inferior à do perfil global ($\alpha = 0,295$). O distanciamento horizontal dos dois perfis deve-se à diferença de velocidades médias do rumo dominante em relação ao valor global, tal como é possível observar na rosa de velocidades representada na Figura 6.5.

6.2.6 Intensidade de turbulência

Na Figura 6.9 apresentam-se as curvas de intensidade de turbulência obtidas a partir dos dados de diferentes alturas da estação B.

A análise das curvas permite verificar que os valores de intensidade de turbulência calculados a partir de dados de alturas superiores são inferiores aos correspondentes calculados a partir de dados de alturas inferiores. Tal pode ser justificado pelo facto de, para alturas superiores, o valor da velocidade do vento ser superior, o que, tendo em conta a fórmula da intensidade de turbulência, equação (4.1), provoca um aumento do denominador da expressão e, em consequência, uma diminuição do valor da intensidade de turbulência. Outra justificação está relacionada com o facto de, para menores alturas, o efeito da vegetação densa ser mais significativo sobre o escoamento, originando valores maiores de desvio padrão da velocidade, ou seja, um aumento do numerador da expressão de cálculo da intensidade de turbulência.

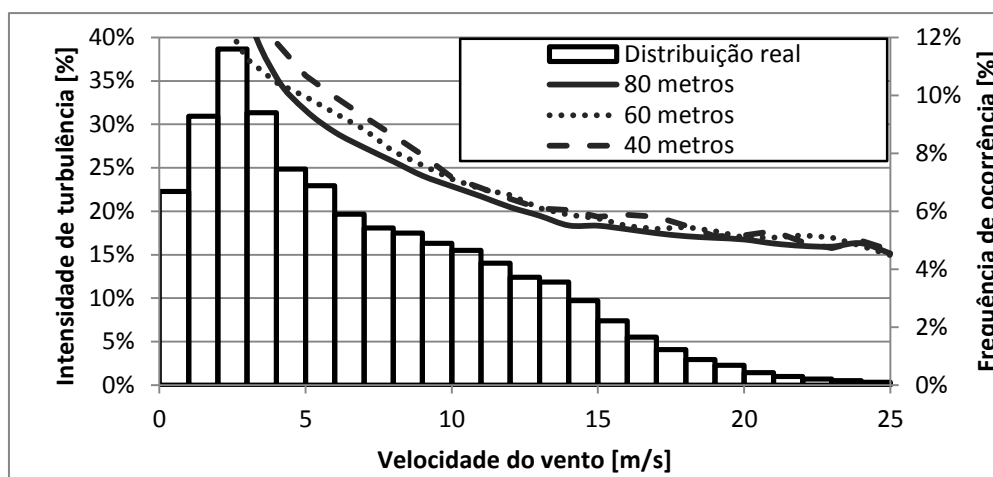


Figura 6.9 – Comparação entre as curvas de intensidade de turbulência para as diferentes alturas de medição da estação B do parque Itália.

6.3 Aerogeradores e configuração do parque

6.3.1 Especificação dos aerogeradores

A análise da produção e da adequabilidade das características dos aerogeradores ao regime de vento do local foi efetuada considerando o parque equipado com aerogeradores cujas dimensões e características são representativas da gama de aerogeradores em consideração para o projeto do parque Itália.

Na Tabela 6.4 apresentam-se as principais características do modelo de aerogerador considerado.

Tabela 6.4 – Principais características do modelo de aerogerador do parque Itália.

Potência Nominal [kW]	2350
Altura do eixo do rotor [m]	104
Diâmetro do rotor [m]	92
Classificação IEC 61400 – 1	II _A
$V_{in} - V_{out}$ [m/s]	2 – 25
V_n [m/s]	15

Na Figura 6.10 estão apresentadas a curva de potência e a curva do coeficiente de impulso axial para o modelo de aerogerador. As curvas foram obtidas para uma massa volúmica do ar de $1,09 \text{ kg/m}^3$.

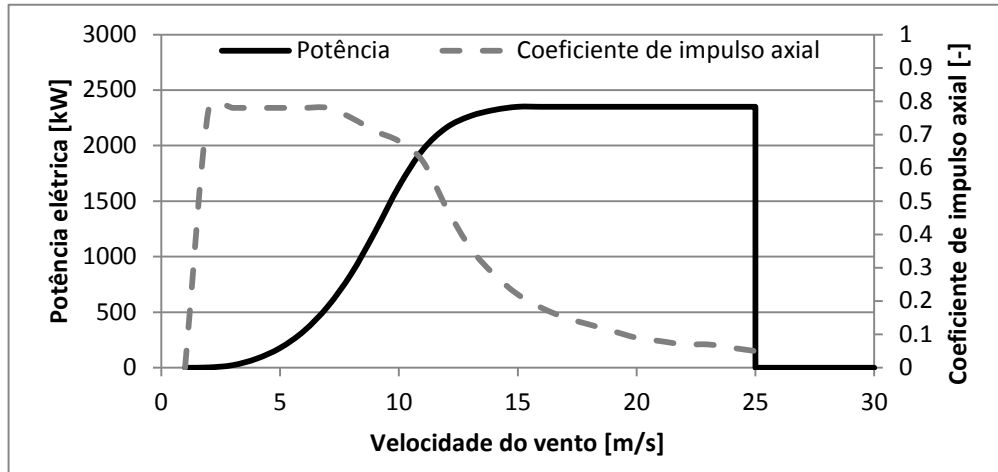


Figura 6.10 – Curva de potência e do coeficiente de impulso axial do modelo de aerogerador do parque Itália.

6.3.2 Configuração do parque

Na Figura 6.11 está representada a disposição dos aerogeradores no terreno. Em torno de cada aerogerador está definida uma circunferência de diâmetro igual a 3 vezes o diâmetro do rotor do aerogerador. Tendo em conta que o espaçamento mínimo entre aerogeradores, para validade dos modelos de esteira definidos na norma IEC 61400-1, é uma distância igual a 3 diâmetros do rotor, a validade dos modelos fica assegurada caso não se verifiquem interseções de circunferências. Neste caso verifica-se que, em praticamente todos os locais, são respeitadas as distâncias mínimas, com uma pequena chamada de atenção para os aerogeradores N5 e SC4, em que se verifica um ligeiro incumprimento.

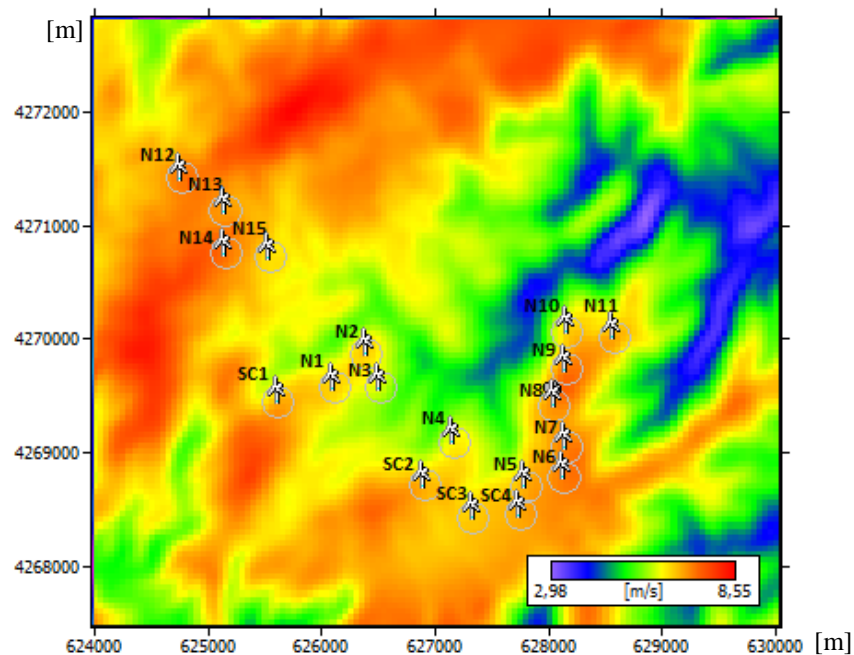


Figura 6.11 – Distribuição dos aerogeradores no terreno para o parque Itália e respectivas velocidades médias de vento.

A configuração do parque representada na Figura 6.11 sobre um mapa de velocidades, obtido a partir dos dados da estação B, permite verificar que os aerogeradores se encontram distribuídos pelos locais de maior velocidade. Existem, contudo, algumas zonas onde, apesar da velocidade prevista ser superior à de alguns locais de instalação, não se verifica a presença de aerogeradores, sendo que, tal se deve ao facto de não ser só a velocidade a determinar o local de instalação de um aerogerador. A velocidade é um parâmetro muito importante, porém parâmetros qualitativos de vento, complexidade do terreno, questões legais, entre vários outras, desempenham também um papel importante na seleção do local.

Na Figura C.2 dos anexos volta-se a apresentar a disposição dos aerogeradores no terreno com circunferências em torno de cada aerogerador, neste caso de diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro do rotor. A norma define que os efeitos da esteira de um aerogerador se fazem sentir até uma distância de 10 vezes o diâmetro do rotor, pelo que os aerogeradores cujas circunferências se intersejam provocam alterações no escoamento e interferência mútua.

6.4 Produção estimada e perdas de esteira

Na Tabela 6.5 são apresentadas a produção bruta, as perdas de esteira, a produção líquida e o fator de carga em horas equivalentes de produção a plena carga para o parque eólico.

Tabela 6.5 – Estimativas de produção do parque Itália.

Número de aerogeradores	19
Potência Instalada [MW]	43,7
Produção Anual Bruta [GWh/ano]	131,592
Perdas de esteira [%]	4,41
Produção Anual Líquida [GWh/ano]	125,79
Fator de carga (produção líquida) [h]	2878

A produção líquida apresentada na Tabela 6.5 refere-se à produção bruta descontada, somente, das perdas de esteira. Normalmente a produção líquida trata-se da produção bruta descontada das várias perdas, tais como as perdas de indisponibilidade, as perdas elétricas, as perdas controlo, entre outras, porém o WAsP apenas fornece as perdas de esteira.

6.5 Parâmetros de vento nos locais de instalação dos aerogeradores

6.5.1 Inclinação do escoamento

Na Tabela 6.6 apresentam-se as estimativas dos ângulos máximos de inclinação do escoamento, para os diferentes locais de instalação dos aerogeradores, obtidas com WEng. Os valores sombreados correspondem aos valores que desrespeitam o intervalo definido pela norma IEC 61400-1, de -8° a 8° , sendo para estes locais apresentado o valor do ângulo de inclinação do escoamento para o setor mais frequente.

Tabela 6.6 – Valores máximos absolutos do ângulo de inclinação do escoamento e valores do ângulo de inclinação para o setor mais frequente, para o parque Itália.

Aerogerador	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	SC1	SC2	SC3	SC4
Máx. Incl. [°]	6,7	7,8	9,2	10,1	6,2	5,1	7,3	6,4	7,5	8,7	10,1	2,2	3,4	6,5	6,5	8,9	7,6	2,9	3,1
Incl. Setor [°]	-	-	-7,4	0,1	-	-	-	-	-	-8,7	-5,7	-	-	-	-	-3	-	-	-

É possível constatar que para alguns locais o ângulo de inclinação do escoamento ultrapassa o intervalo definido pela norma. Contudo, verifica-se que para o setor mais frequente, à exceção do N10, todos os locais respeitam o intervalo definido pela norma.

Na Tabela C.1 dos anexos são apresentadas as estimativas dos ângulos de inclinação do escoamento por setor para os locais onde o valor máximo ultrapassa o intervalo definido pela norma. É também representada a respetiva frequência de ocorrência de vento por setor.

6.5.2 Inclinação do perfil vertical de velocidades

Na Tabela 6.7 representam-se os valores médios globais de *shear factor*, estimados pelo WEng, para os diferentes locais de instalação dos aerogeradores.

Tabela 6.7 – Valores globais de *shear factor* (α) para os diferentes locais do parque Itália.

Aerogerador	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	SC1	SC2	SC3	SC4
α [-]	0,13	0,08	0,14	0,13	0,13	0,09	0,09	0,07	0,07	0,08	0,09	0,11	0,15	0,1	0,16	0,15	0,11	0,15	0,12

Verifica-se que o valor médio global de *shear factor* respeita o intervalo definido pela norma para todos os locais. Contudo, alguns locais apresentam, para determinados setores, valores de *shear factor* que não respeitam a norma, porém em nenhum dos casos se trata do setor mais energético.

Na Tabela C.2 apresentam-se os valores de *shear factor* por setor para alguns locais onde se verificou o incumprimento do definido pela norma em determinados setores.

6.5.3 Ventos extremos

A previsão de ventos extremos, tal como referido anteriormente, necessita de séries de dados de longo termo. A série de dados mais longa que se possui para o local é a obtida da estação A, que tem a duração de 3 anos e 4 meses, período inferior ao recomendado pelas metodologias de previsão de ventos extremos. Porém, o WEng permite a previsão de ventos extremos para séries de dados a partir de 2 anos.

Na Tabela 6.8 estão representados os valores extremos de velocidade de vento previstos para um período de recorrência de 50 anos para os locais de instalação de aerogeradores, usando o WEng.

Tabela 6.8 – Valores extremos de velocidade do vento para um período de recorrência de 50 anos, para os diferentes locais do parque Itália.

Aerogerador	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	SC1	SC2	SC3	SC4
V_{e50} [m/s]	37	39,9	37,3	36,3	35	40,7	43	43,3	42,2	39,6	36	38,7	38,6	39,7	36,2	37,7	35,9	34	35,2

Para os locais N7 e N8, o valor extremo de velocidade previsto para um período de recorrência de 50 anos ultrapassa ligeiramente os 42,5 m/s, velocidade de referência correspondente à classe II dos aerogeradores. Porém, como já referido, a validade de tais previsões é reduzida, pois o período de tempo da série não respeita o mínimo recomendado.

6.5.4 Distribuição de frequências de velocidade

Na Tabela 6.9 identificam-se os locais onde as distribuições de velocidade de vento respeitam a definida pela norma IEC 61400-1, no intervalo de $0,2 V_{ref}$ a $0,4 V_{ref}$, como “Ok” e caso contrário como “Não”.

Para um aerogerador classe II, a distribuição definida segundo a norma é a distribuição de Rayleigh com velocidade média igual a 8,5 m/s.

Tabela 6.9 – Comparação das distribuições de velocidade de vento do local com a distribuição da norma IEC 61400-1 no intervalo de $0,2 V_{ref}$ a $0,4 V_{ref}$, para os diferentes locais do parque Itália.

Aerogerador	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	SC1	SC2	SC3	SC4
Dist. Vel.	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Não	Não	Não	Não	Ok	Ok	Não	Não	Não	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

As distribuições de velocidade do vento desrespeitam a definida pela norma, na gama de interesse, para os locais N6, N7, N8, N9, N12, N13 e N14. O facto de existir um misto entre locais que não respeitam a condição e locais que respeitam é um reflexo da complexidade do terreno, que é responsável pela diversidade de distribuições de velocidade verificadas.

Na Figura 6.12 apresentam-se, a título de exemplo, a distribuição prevista para o local N12 e a distribuição definida pela norma para a classe II. A escolha do local N12 deve-se, simplesmente, ao facto de neste sítio não se verificar o cumprimento do definido na norma.

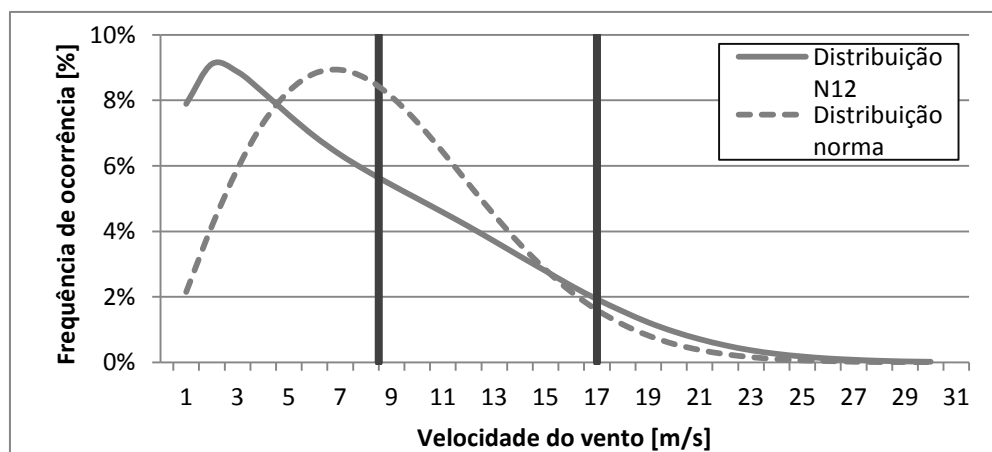


Figura 6.12 – Comparação entre a distribuição de frequências de velocidade do local N12 e a distribuição definida pela norma IEC 61400-1.

A distribuição prevista não respeita a definida pela norma na parte final do intervalo de interesse. Ainda assim, tanto em amplitude como em extensão, a zona da curva em que o critério não é cumprido é limitada.

Uma solução, para as situações em que a distribuição da norma não é respeitada, passa pela comunicação com o fabricante do aerogerador, para saber qual a distribuição assumida para efeitos de cálculo à fadiga no projeto do aerogerador e, posteriormente, verificar se a distribuição dos locais em questão respeitam essa distribuição.

6.5.5 Intensidade de turbulência

Nesta secção são efetuadas duas análises relativamente à turbulência, uma não considerando o efeito da esteira dos aerogeradores vizinhos e outra considerando esse efeito.

Na Tabela 6.10 apresentam-se os valores médios e representativos de intensidade de turbulência a 15 m/s para os diferentes locais, na ausência do efeito de esteira.

Tabela 6.10 - Valores médios e representativos da intensidade de turbulência a 15 m/s, na ausência de efeito de esteira, para os diferentes locais do parque Itália.

Aerogerador	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	SC1	SC2	SC3	SC4
$I_{méd}$ (%)	14,3	13,8	16,1	16,1	14,5	13,2	13,3	12,4	12,1	14,4	14,3	11,1	11,8	11,2	13,7	14,0	13,5	15,4	14,4
I_{rep} (%)	16,3	16,3	18,8	18,5	17,0	15,8	16,1	15,3	15,1	17,5	17,7	13,4	14,0	13,2	15,4	16,0	16,2	18,3	17,0

Na ausência de consideração do efeito de esteira dos aerogeradores vizinhos, os locais N3 e N4 apresentam valores médios de intensidade de turbulência para a velocidade de 15 m/s que não respeitam o valor limite da sub-classe A dos aerogeradores. Quando a avaliação é feita para o valor representativo da intensidade de turbulência, o local SC3 junta-se aos dois anteriores, como locais onde a intensidade de turbulência excede o limite definido pela norma.

Na Tabela 6.11 representam-se os valores de intensidade de turbulência efetiva a 15 m/s, ou seja, o valor representativo da intensidade de turbulência com consideração do efeito de esteira. A linha denominada esteira representa o peso da componente de intensidade de turbulência devido à esteira no valor total da intensidade de turbulência efetiva.

Tabela 6.11 – Intensidade de turbulência efetiva a 15 m/s e peso da esteira nesse valor da intensidade de turbulência, para os diferentes locais do parque Itália.

Aerogerador	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14	N15	SC1	SC2	SC3	SC4
I_{ef} (%)	16,5	16,4	19,6	19,8	18,3	16,9	17,8	16,0	15,9	17,6	20,9	13,5	15,1	15,1	16,8	16,1	16,4	19,5	18,7
Esteira (%)	1,2	0,6	4,1	6,6	7,1	6,5	9,6	4,4	5,0	0,6	15,3	0,7	7,3	12,6	8,3	0,6	1,2	6,2	9,1

A consideração do efeito de esteira provoca o aumento da intensidade de turbulência para todos os locais. N3, N4, N5, N11, SC3 e SC4 apresentam valores de intensidade de turbulência efetiva para a velocidade de 15 m/s superiores ao limite definido pela subclasse A.

A avaliação da intensidade de turbulência não se restringe à verificação do seu valor para a velocidade de 15 m/s. Tal como referido anteriormente, a avaliação da intensidade de turbulência deve ser efetuada na gama de $0,6 V_n$ a V_{out} . Para o aerogerador utilizado neste caso teste, o intervalo de verificação é de 9 a 25 m/s.

Na Figura 6.13 apresentam-se as curvas de intensidade de turbulência ambiente (valores representativos) para os locais N4, N11 e N12, sendo que a opção por estes três locais deveu-se às características particulares de cada um. A intensidade de turbulência ambiente para o local N4 excede o limite definido pela subclasse A, enquanto para o local N11 se encontra próxima desse limite. O local N12 caracteriza-se por uma baixa intensidade de turbulência ambiente, respeitando inclusive o limite definido pela subclasse B na gama de interesse.

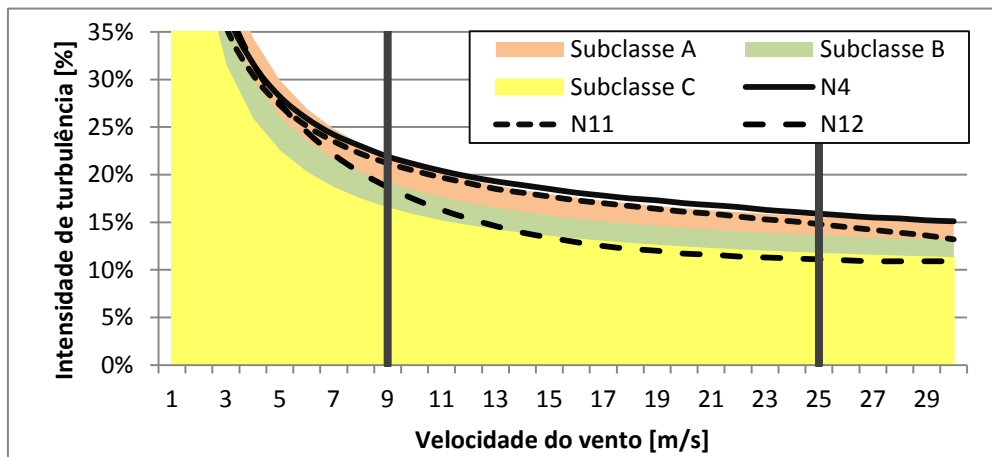


Figura 6.13 – Curvas de intensidade de turbulência ambiente (valor representativo) para os locais N4, N11 e N12.

Na Figura 6.14 apresentam-se, para os mesmos locais, as curvas de intensidade de turbulência efetiva. Com a consideração da esteira, assiste-se a um deslocamento das curvas de intensidade de turbulência para cima, correspondente a um aumento dos valores de intensidade de turbulência. O maior deslocamento ocorre para o local N11, que passa a ser o local com maior turbulência, sendo que no local N4 o efeito da esteira também provoca um aumento considerável dos valores de intensidade de turbulência. O local N12 é pouco influenciado pelo efeito da esteira dos aerogeradores vizinhos.

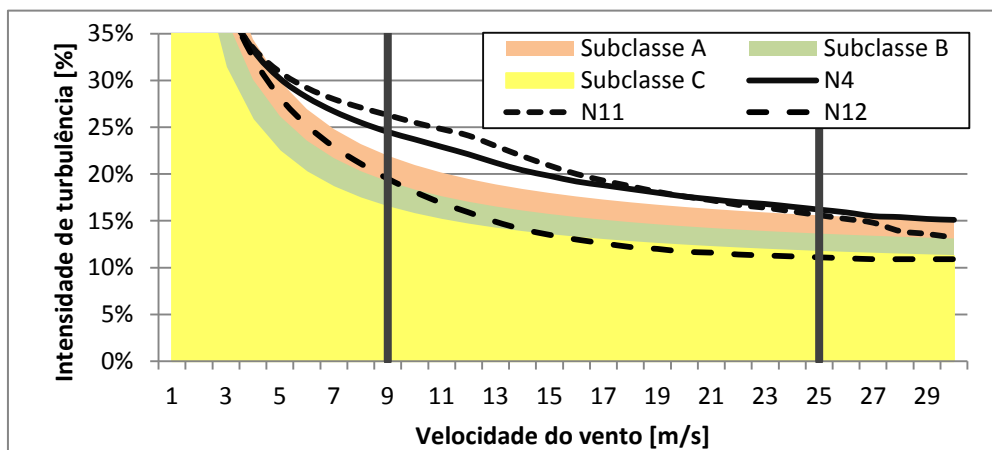


Figura 6.14 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva para os locais N4, N11 e N12.

A avaliação da curva de intensidade de turbulência efetiva para os três locais permite verificar que o local N12 respeita os valores definidos pela norma. Já os lugares N4 e N11 ultrapassam os limites definidos pela subclasse A, sendo de esperar problemas relacionados com a excessiva turbulência ocorrida nestes locais.

Na Figura 6.15 apresenta-se a comparação entre a curva de intensidade de turbulência efetiva global com a correspondente para o rumo mais energético, para os locais N4 e N11. Verifica-se que a curva para o setor mais energético é praticamente coincidente com a curva global, caso do local N4, ou até ligeiramente superior à global, caso do lugar N11. Neste tipo de local a aplicação da gestão setorial do funcionamento do aerogerador, como tentativa de mitigar o excesso de intensidade de turbulência, poderá ter como consequência uma perda de produção considerável.

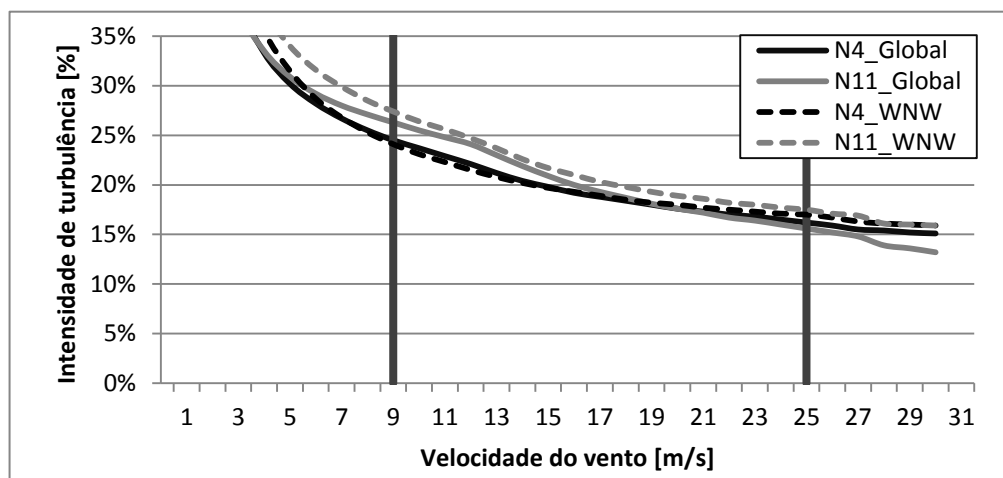


Figura 6.15 - Curvas de intensidade de turbulência efetiva global e para o rumo dominante, para os locais N4 e N11

6.6 Gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores

A gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores é uma solução para a mitigação da turbulência excessiva verificada para determinados aerogeradores. As limitações setoriais consistem na paragem de produção dos aerogeradores, quando o vento provém de um azimute que se encontra num setor definido e com um valor de velocidade pertencente a uma gama definida. Esta paragem de produção, que pode permitir a diminuição da turbulência experimentada por determinados aerogeradores, terá como consequência negativa a perda de produção derivada da paragem do aerogerador.

Além da possível diminuição da turbulência experimentada pelo aerogerador, devido à sua paragem aquando da verificação das condições mais agressivas sobre este, é de destacar também o efeito da diminuição das perdas de esteira dos aerogeradores vizinhos durante essa paragem.

Neste trabalho a limitação de funcionamento corresponde à paragem de funcionamento do aerogerador, porém também é possível, em vez da paragem total, impor uma limitação de potência ao funcionamento do aerogerador.

Na Figura 6.16 apresenta-se a rosa de intensidade de turbulência e de energia para o local N4.

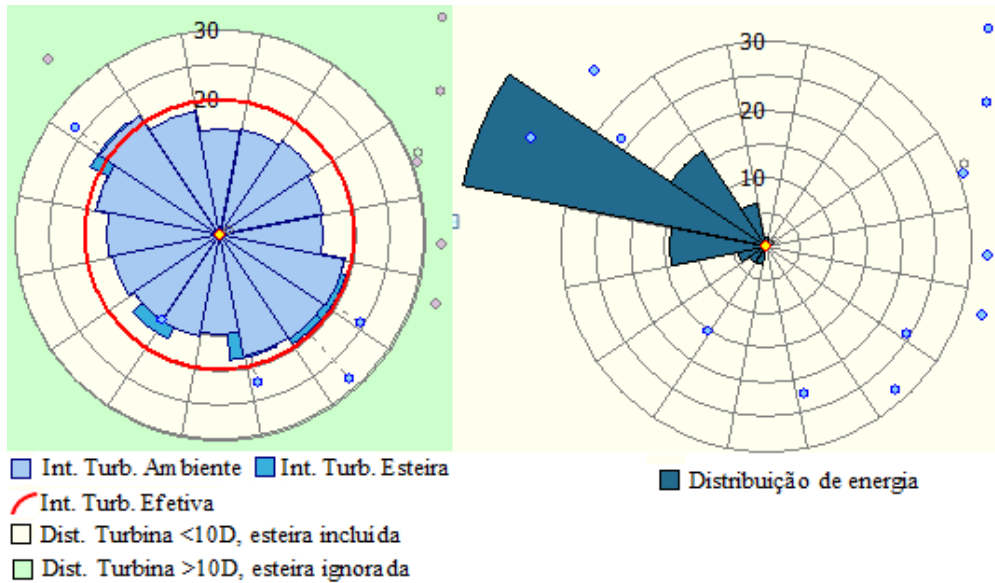


Figura 6.16 – Rosa de intensidade de turbulência (à esquerda) e rosa de energia (à direita) para o local N4.

Verifica-se que os setores para os quais os valores de intensidade de turbulência são maiores coincidem com os setores mais energéticos, pelo que a limitação setorial do funcionamento do aerogerador, neste caso, acarreta uma elevada perda de produção.

Na Figura 6.17 representam-se as rosas de intensidade de turbulência e de energia para o local N11.

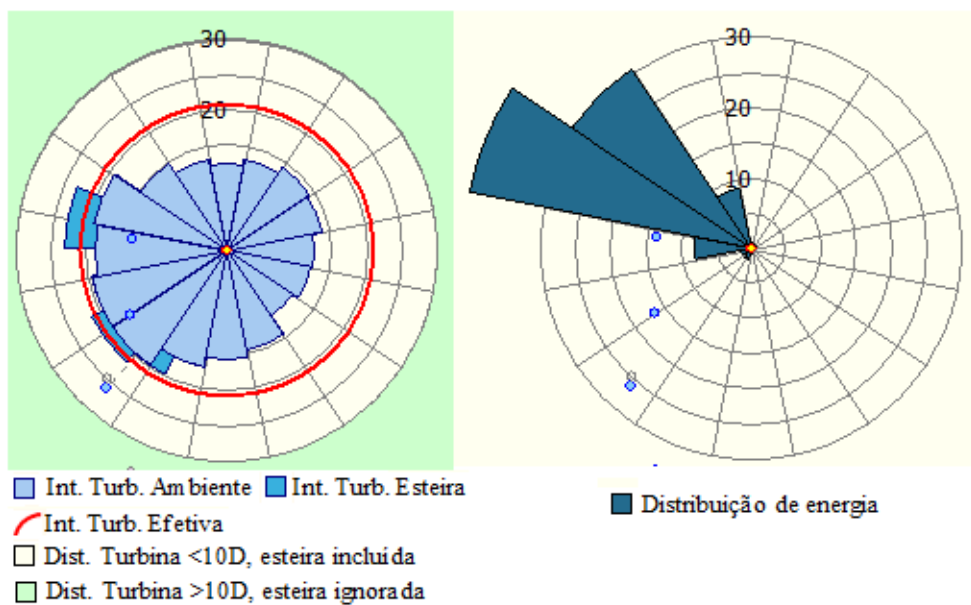


Figura 6.17 – Rosa de intensidade de turbulência (à esquerda) e rosa de energia (à direita) para o local N11.

É possível observar que a esteira provocada pelos aerogeradores vizinhos, N9 e N10, provoca um acréscimo na intensidade de turbulência considerável relativamente à ambiente.

Na Tabela 6.12 apresentam-se as limitações setoriais impostas ao funcionamento do aerogerador do local N11. Trata-se de parâmetros seletivos para um determinado intervalo de direções e/ou intervalo de velocidades.

Tabela 6.12 – Limitações setoriais impostas ao aerogerador do local N11.

Limitação setorial	Intervalo do setor [°]	Gama de velocidade [m/s]
I	270 – 292	8 – 25
II	221 – 243	8 – 15

Na Figura 6.18 apresenta-se a curva de intensidade de turbulência efetiva experimentada pelo aerogerador no local N11 após a aplicação das limitações setoriais, em comparação com a mesma curva na ausência de gestão setorial.

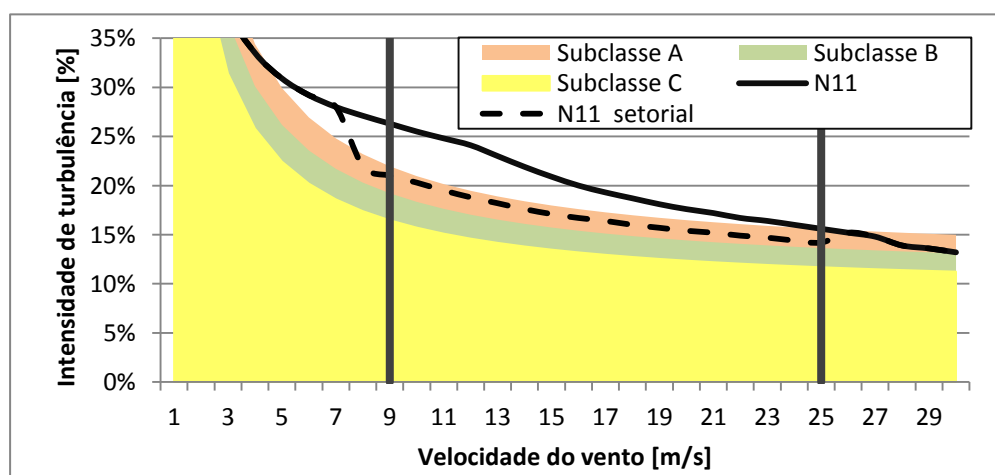


Figura 6.18 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva experimentadas pelo aerogerador do local N11 com e sem gestão setorial do seu funcionamento.

Verifica-se que a limitação setorial do funcionamento imposta ao aerogerador permitiu que a curva de intensidade de turbulência efetiva passasse a respeitar o limite definido pela classe A na gama de velocidades de interesse.

Na Tabela 6.13 apresenta-se a comparação entre as produções anuais líquidas do aerogerador do local N11 para o caso de funcionamento sem limitação e para o caso de funcionamento com a limitação setorial.

Tabela 6.13 – Perdas de produção devido às limitações setoriais impostas ao aerogerador do local N11.

Produção Anual Líquida [GWh]	6,912
Produção Anual Líquida com limitação setorial [GWh]	5,52
Perda devido à limitação setorial [%]	21,2

A perda de produção devido à limitação do funcionamento do aerogerador é elevada, pois um dos setores para o qual foi imposta uma limitação coincide, em parte, com o setor mais energético do local. Porém, é necessário ter em atenção que se trata da limitação do funcionamento de um aerogerador num conjunto de 19.

Um outro aspeto a considerar seria a diminuição das perdas de esteira nos aerogeradores vizinhos, devido à paragem do aerogerador, que teria como reflexo um aumento da produção destes. Porém, tal não faz parte do âmbito do trabalho.

6.7 Avaliação do comportamento dos programas

Nesta secção efetua-se a avaliação da capacidade de previsão de alguns parâmetros pelo WAsP e WEng, para atestar da validade dos resultados obtidos anteriormente.

A avaliação é efetuada com base na comparação de parâmetros obtidos de dados da estação de medição a uma determinada altura, com a previsão efetuada pelo programa dos mesmos parâmetros para o local da estação e à mesma altura.

Os parâmetros em comparação são a distribuição de frequências de velocidade, a inclinação do perfil vertical de velocidades e a curva de intensidade de turbulência. As comparações são efetuadas para a estação B à altura de 80 metros a.n.s..

6.7.1 Distribuição de frequências de velocidade

Na Tabela 6.14 comparam-se os valores de parâmetros da distribuição de Weibull observados dos dados da estação de medição B, com os valores previstos pelo WAsP para o mesmo local e à mesma altura.

Tabela 6.14 – Comparação entre os parâmetros da distribuição de Weibull observados e previstos, para o parque Itália.

Distribuição de Weibull	Observado	Previsão WAsP	Erro de previsão [%]
Fator de escala – A [m/s]	7,6	7,6	0
Fator de forma – k [-]	1,44	1,43	-0,7
Velocidade média [m/s]	6,89	6,93	0,6

O modelo do WAsP apresenta um bom desempenho na previsão dos parâmetros da distribuição de Weibull para o local da estação de medição.

Na Tabela 6.15 apresentam-se os valores da distribuição de Weibull observados na estação A à altura de 60 metros a.n.s e a sua comparação com os correspondentes valores previstos pelo WAsP para o mesmo local, à altura de 60 metros a.n.s., a partir dos dados da estação B à altura de 80 metros a.n.s..

Tabela 6.15 – Comparação entre os parâmetros da distribuição de Weibull observados na estação A com os previstos pelo WAsP para o local da estação A a partir dos dados da estação B.

Distribuição de Weibull	Observado	Previsão WAsP	Erro de previsão [%]
Fator de escala – A [m/s]	6,6	6,2	-6,1
Fator de forma – k [-]	1,65	1,46	-11,5
Velocidade média [m/s]	5,8	5,62	-3,1

O desempenho do programa neste tipo de previsão é inferior ao desempenho de auto previsão, verificando-se uma subestimativa dos parâmetros. Este pior desempenho era de algum modo esperado, devido à complexidade do terreno e à dificuldade conhecida do modelo linearizado do WAsP em prever alguns fenómenos do escoamento que ocorrem neste tipo de terrenos.

6.7.2 Perfil vertical de velocidades

Na Figura 6.19 é possível observar o perfil vertical de velocidades obtido a partir de análise direta dos dados da estação B, o previsto pelo WAsP e o previsto pelo WEng.

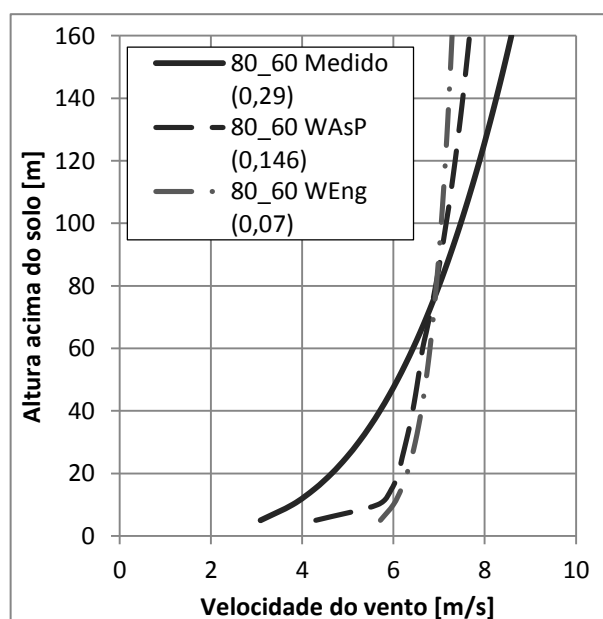


Figura 6.19 - Perfil vertical de velocidades medido e perfis previstos pelo WAsP e pelo WEng, para o parque Itália.

Os perfis previstos pelo WAsP e pelo WEng subestimam o valor de *shear factor* em relação ao valor obtido a partir da análise dos dados da estação B às alturas de 80 e 60 metros a.n.s.

As diferenças encontradas demonstram mais uma vez as limitações destes modelos linearizados em prever as características do escoamento em terreno complexo. As medições para este terreno são fortemente influenciadas pela vegetação.

6.7.3 Intensidade de turbulência

Na Figura 6.20 comparam-se as curvas de intensidade de turbulência (valores representativos) obtidas a partir dos dados da estação B à altura de 80 metros a.n.s. com a respetiva previsão do WAT, para o local da estação e à mesma altura.

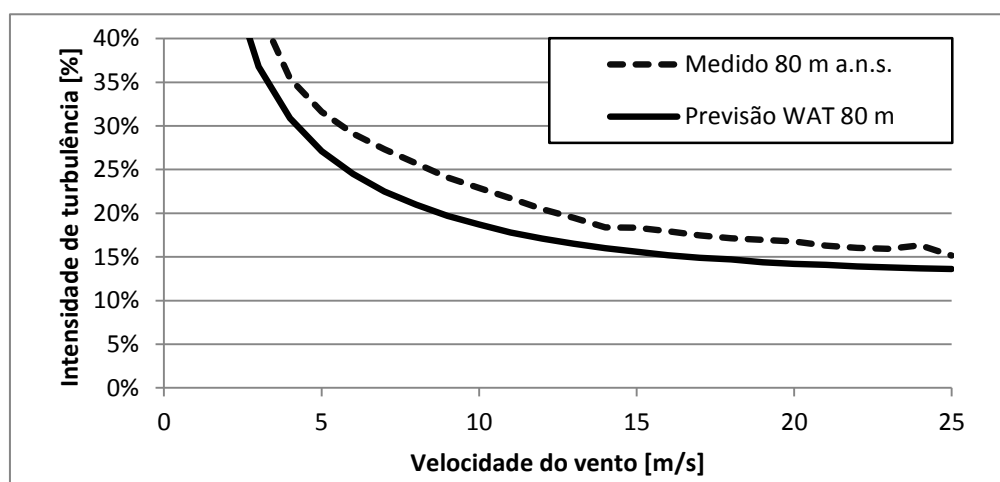


Figura 6.20 – Curva de intensidade de turbulência medida a 80 m a.n.s. e respetiva previsão do WAT, para o parque Itália.

A previsão do WAT subestima os valores de intensidade de turbulência quando comparados com os valores obtidos da análise direta dos dados da estação. Esta verificação torna o problema da turbulência ainda mais grave, pois é provável que as curvas previstas para os diferentes locais estejam abaixo das reais.

Uma solução para despistagem dos casos onde a turbulência é mais severa, poderia passar pela colocação de estações de medição nesses locais, de preferência com alturas de medição que não fossem influenciadas pela vegetação densa do local. É preciso, contudo, ter em atenção os custos envolvidos neste tipo de operação e analisar a relevância da mesma.

6.8 Considerações finais

O parque eólico de Itália apresenta um terreno complexo, o que faz com que os parâmetros qualitativos de vento se encontrem próximos dos limites definidos pela norma, ou mesmo o ultrapassem, para determinados locais. A complexidade reflete-se também na variação dos valores dos parâmetros para os diferentes locais.

A utilização de modelos linearizados de simulação do escoamento, como o WAsP, neste local tem de ser efetuada com precaução, pois o mesmo apresenta limitações no tratamento de fenómenos de escoamento que se verificam nestes locais.

Em projetos deste tipo, um maior investimento em campanhas de medição, assim como, a utilização de outros tipos de modelos de simulação, pode permitir uma maior elucidação acerca da adequabilidade da instalação de determinados aerogeradores.

7 Caso de teste: Parque eólico África do Sul

O caso II trata do projeto de um parque eólico com uma capacidade prevista de 30 MW, distribuída por 10 aerogeradores de capacidade nominal de 3 MW.

O local do projeto caracteriza-se por um terreno plano de reduzida rugosidade.

7.1 Caracterização da área

A área do projeto do parque eólico II situa-se na província de Western Cape, sudoeste da África do Sul.

Na Figura 7.1 está representado o mapa de elevações do terreno, com a localização dos 10 aerogeradores e da estação de medição. Pode-se observar a baixa variação de alturas do terreno.

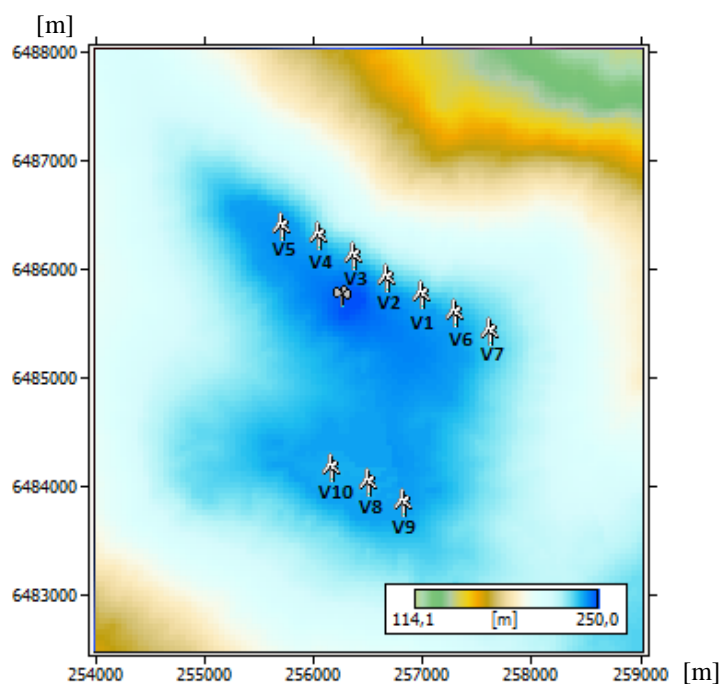


Figura 7.1 – Mapa de elevações do terreno do parque África do Sul.

Na Figura 7.2 representa-se o RIX na área do projeto. Verifica-se que o RIX é nulo, o que significa que o terreno não é complexo. A ocorrência do descolamento do escoamento, assim como de fenómenos de recirculação, não é provável para este local.

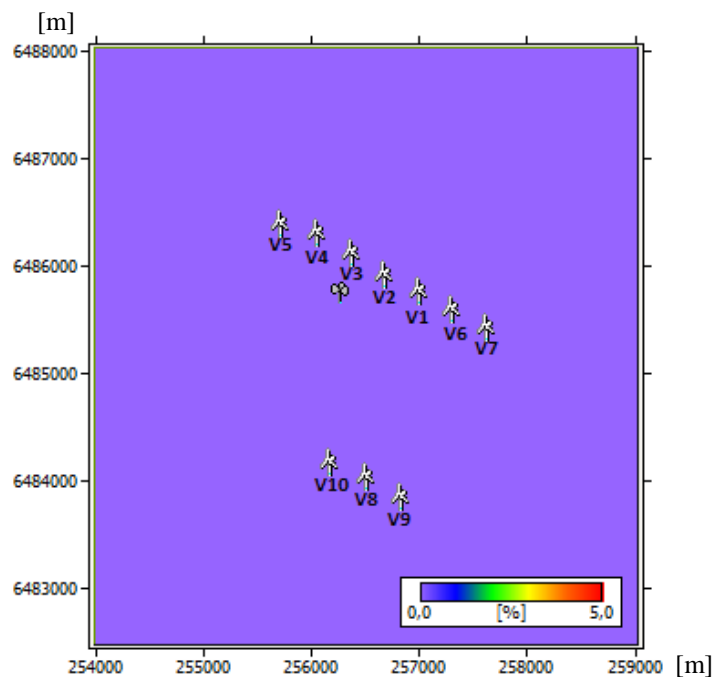


Figura 7.2 – RIX na área do parque África do Sul.

A influência do terreno nas características de vento para este local não deve provocar grandes variações entre o regime observado na estação e os regimes verificados nos locais de instalação dos aerogeradores. Este terreno respeita as condições fundamentais ao correto funcionamento do WAsP.

7.2 Caracterização do regime de vento

7.2.1 Estação de medição

A caracterização do regime de ventos foi obtida a partir de medições realizadas numa única estação de medição.

A estação regista velocidade de vento a 80, 60, 40 e 20 metros a.n.s., assim como direção a 77 e 57 metros a.n.s.. Regista ainda temperatura, humidade e pressão. Os dados de velocidade e direção são armazenados em valores médios, máximos e desvios padrão para cada amostra de 10 minutos.

A série de dados em análise corresponde ao período de janeiro de 2011 a dezembro de 2012.

7.2.2 Massa volúmica do ar

O valor da massa volúmica do ar pode ser obtido a partir dos valores médios de pressão (p) e temperatura (T) obtidos da estação e que estão representados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Valores médios de temperatura e pressão atmosférica, para o parque África do Sul.

Temperatura média [°C]	Pressão média [Pa]
19,3	98670,5

O valor médio da massa volúmica do ar obtido é 1,176 kg/m³.

7.2.3 Distribuição de frequências de velocidade

Na Figura 7.3 são representados o histograma de ocorrências de velocidade e o respetivo ajustamento de Weibull para os dados da estação (80 m a.n.s.).

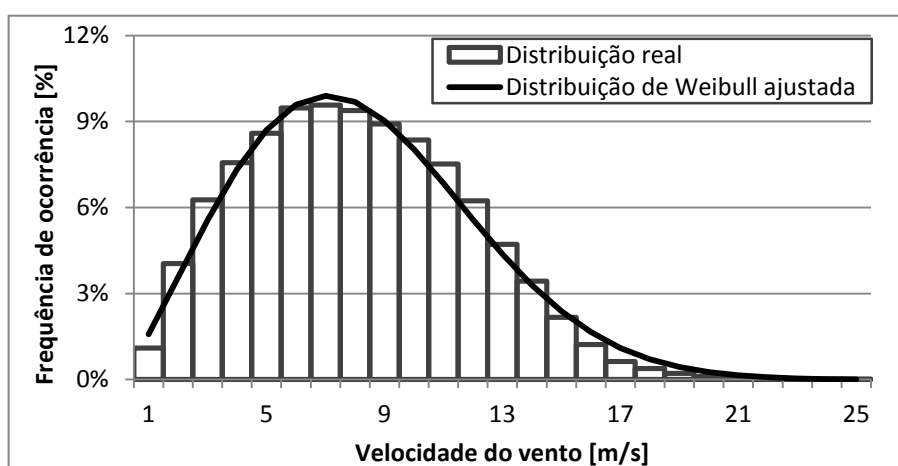


Figura 7.3 – Histograma de ocorrências de velocidade do vento e respetivo ajustamento de Weibull para os dados da estação (80 m a.n.s.) do parque África do Sul.

Na Tabela 7.2 são apresentados os parâmetros do ajustamento e o respetivo erro quadrático.

Tabela 7.2 – Parâmetros do ajustamento de Weibull e erro quadrático do ajustamento, para o parque África do Sul.

Fator de escala – A [m/s]	Fator de forma – k [-]	Erro quadrático do ajustamento [%]
9,30	2,21	1,7

O reduzido erro quadrático do ajustamento atesta a qualidade do ajustamento de Weibull nesta situação.

Na Figura D.1 dos anexos apresenta-se a comparação entre a distribuição de frequência de ocorrências para os períodos Outono/Inverno e Primavera/Verão. O período Primavera/Verão apresenta um pico de frequência de ocorrências de 11% em torno das velocidades 7 e 8 m/s, enquanto o período Outono/Inverno apresenta um patamar de frequência de ocorrências em torno dos 8% na gama de velocidades entre 5 e 11 m/s.

7.2.4 Rosas de ocorrências, velocidade e energia

Na Figura 7.4 é possível observar a distribuição setorial das ocorrências, velocidade e energia do vento.

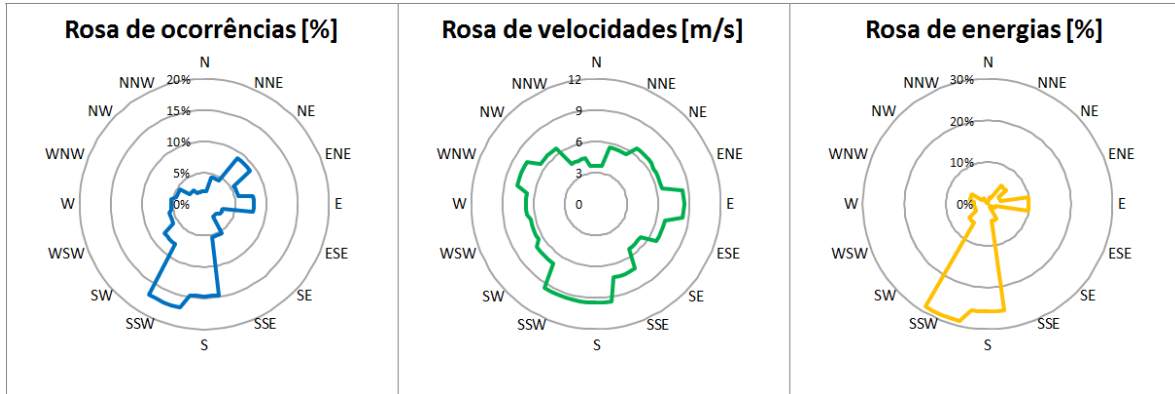


Figura 7.4 – Rosas de ocorrências, velocidade e energia para os dados da estação (80 m a.n.s.) do parque África do Sul.

A análise das rosas permite identificar os setores S e SSW como os rumos mais energéticos. Destaque também para o setor E que representa 10% da energia disponível no vento.

7.2.5 Perfil vertical de velocidades

Na Figura 7.5 observa-se dispersão dos valores de *shear factor* em função da velocidade do vento. Tal como referido no caso anterior, constata-se que, para velocidades reduzidas, há uma grande dispersão de valores, verificando-se inclusive uma ocorrência considerável de valores negativos.

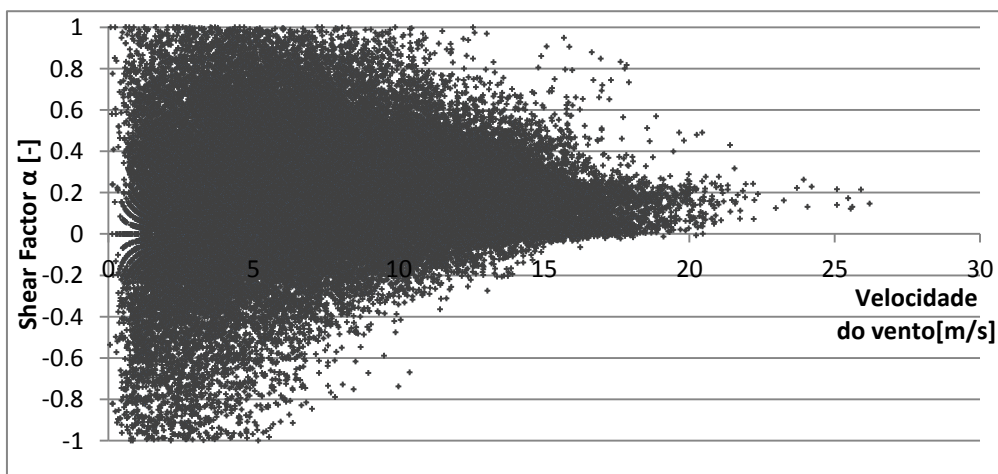


Figura 7.5 – Dispersão dos valores de *shear factor* em função da velocidade do vento para os dados de 80 m a.n.s. da estação do parque África do Sul.

Na Figura 7.6 apresenta-se a distribuição de frequências de ocorrências dos valores de *shear factor* considerando valores de velocidade superiores a 3 m/s.

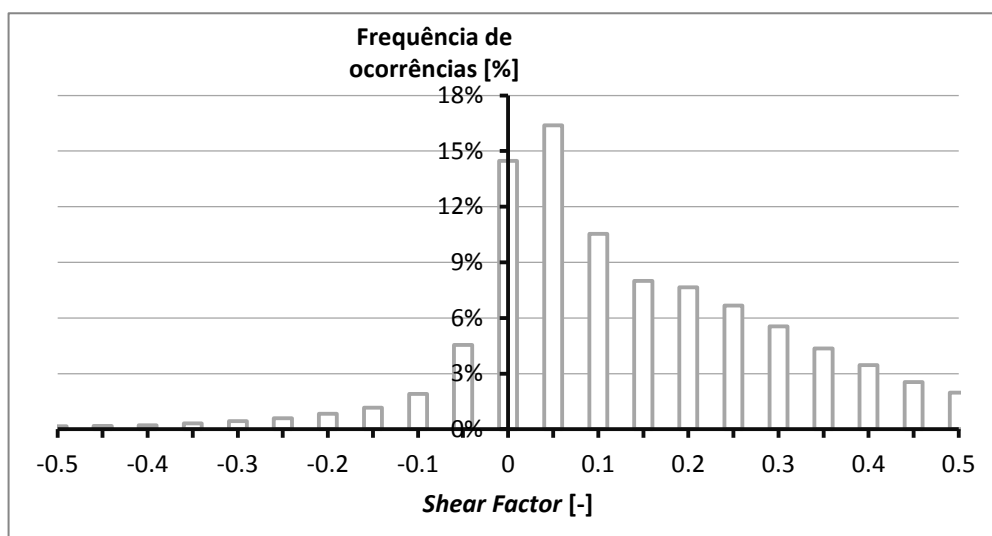


Figura 7.6 – Distribuição de frequências de ocorrências dos valores de *shear factor* obtidos dos dados de 80 e 60 m a.n.s., para o parque África do Sul.

Tal como para o caso de estudo anterior, a determinação do valor médio do *shear factor* foi realizada considerando apenas os valores correspondentes a velocidades de vento superiores a 3 m/s. Foram determinados três valores médios de *shear factor*, um utilizando os dados de 80 e 60 metros de altura, outro usando os dados de 80 e 40 metros e, por fim, com os dados de 60 e 40 metros.

Na Tabela 7.3 estão representados os três valores médios de *shear factor* globais, assim como os valores médios de *shear factor* para os rumos dominantes (SSW e S)

Tabela 7.3 – Valores médios de *shear factor* para velocidades de vento superiores a 3 m/s, para o parque África do Sul.

Dados de vento	<i>Shear Factor</i> Global [-]	<i>Shear Factor</i> S [-]	<i>Shear Factor</i> SSW [-]
Alturas: 80_60	0,158	0,187	0,077
Alturas: 80_40	0,152	0,180	0,078
Alturas: 60_40	0,141	0,175	0,079

A Figura 7.7 apresenta os perfis verticais de velocidade globais obtidos a partir dos conjuntos de valores medidos a diferentes alturas, e compara-os com os perfis verticais de velocidades obtidos para os rumos dominantes, a partir do conjunto de dados de 80 e 60 metros de altura.

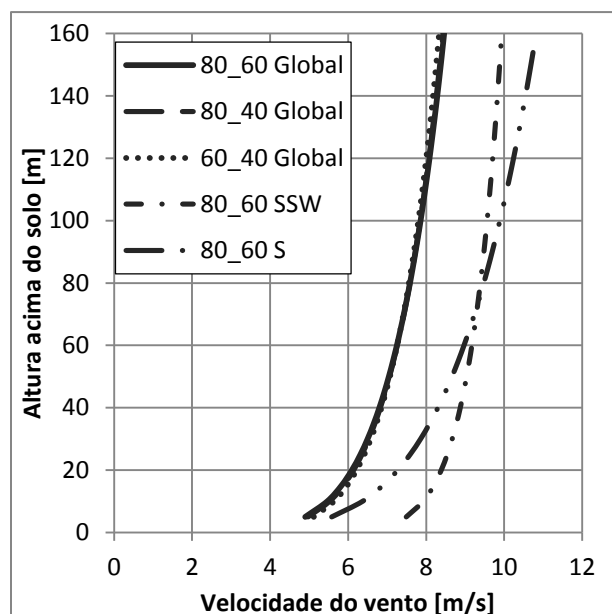


Figura 7.7 – Perfis verticais de velocidades obtidos a partir de dados da estação do parque África do Sul.

A partir da análise da Tabela 7.3 e da Figura 7.7, verifica-se que os valores globais de *shear factor* são bastantes próximos. Esta situação pode ser explicada pelo facto do local da estação ser uma área de vegetação rasteira, pelo que o efeito da superfície do terreno não se faz sentir nas medições efetuadas a alturas mais baixas.

Relativamente aos perfis verticais de velocidade dos rumos mais energéticos (SSW e S), verifica-se que estes possuem valores distintos entre si, sendo que para o rumo S o valor é superior ao global, enquanto para o rumo SSW o valor é inferior. Esta diferença pode ser explicada por características do terreno nas proximidades da estação de medição que, apesar de a vegetação ser rasteira, influenciem a inclinação do perfil vertical de velocidades de diferente modo consoante o rumo de onde o vento provém.

O distanciamento horizontal dos dois perfis correspondentes aos rumos mais energéticos em relação ao perfil global, deve-se à diferença entre a velocidade média para os rumos dominantes e a velocidade média global, tal como é possível observar na rosa de velocidades representada na Figura 7.4.

7.2.6 Intensidade de turbulência

Na Figura 7.8 apresentam-se as curvas de intensidade de turbulência obtidas a partir dos dados de diferentes alturas da estação.

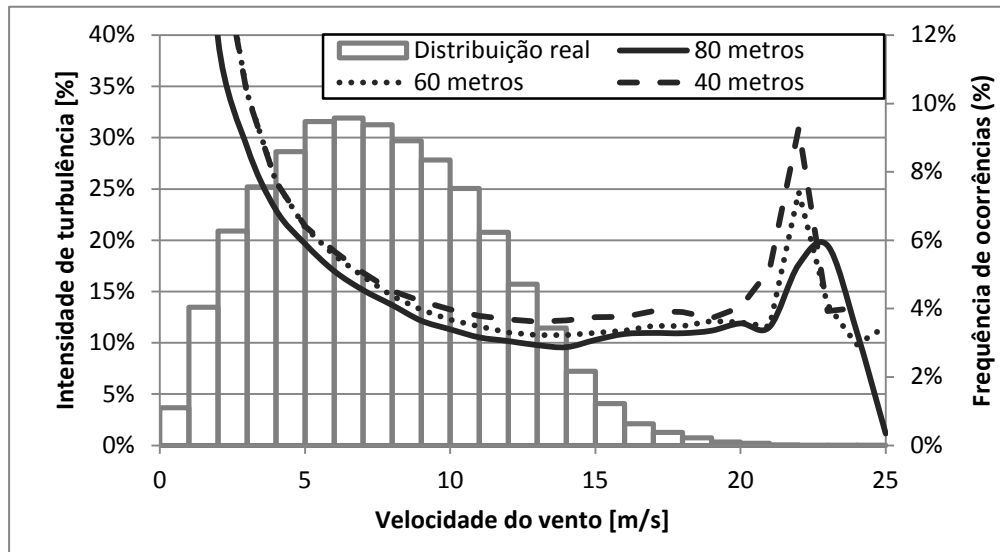


Figura 7.8 - Comparação entre as curvas de intensidade de turbulência para diferentes alturas de medição da estação do parque África do Sul.

A análise das curvas permite verificar que os valores de intensidade de turbulência calculados a partir de dados de alturas superiores são inferiores aos correspondentes calculados a partir de medições a alturas menores, tal como verificado no caso anterior.

É possível observar que para valores de velocidade superiores a 20 m/s as curvas apresentam um comportamento estranho, sendo que tal se deve à baixa frequência de ocorrências de valores de velocidade nessa gama, como verificado no histograma de ocorrências.

7.3 Aerogeradores e configuração do parque

7.3.1 Especificação dos aerogeradores

A análise da produção e da adequabilidade das características dos aerogeradores ao regime de vento do local foi neste caso efetuada considerando o parque equipado com aerogeradores cujas dimensões e características são representativas da gama de aerogeradores em consideração para o projeto.

Na Tabela 7.4 apresentam-se as principais características do modelo de aerogerador.

Tabela 7.4 – Principais características do modelo de aerogerador do parque África do Sul.

Potência Nominal [kW]	3075
Altura do eixo do rotor [m]	94
Diâmetro do rotor [m]	112
Classificação IEC 61400 – 1	II _A
$V_{in} - V_{out}$ [m/s]	3 – 25
V_n [m/s]	14

Na Figura 7.9 estão apresentadas a curva de potência e a curva do coeficiente de impulso axial para o modelo de aerogerador. As curvas foram obtidas para uma massa volúmica do ar igual a $1,176 \text{ kg/m}^3$.

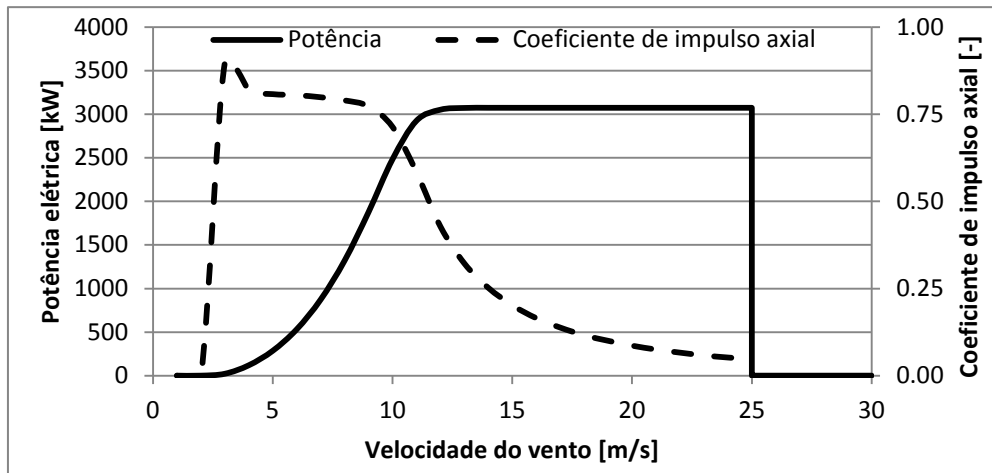


Figura 7.9 – Curva de potência e do coeficiente de impulso axial do modelo de aerogerador do parque África do Sul.

7.3.2 Configuração do parque

Na Figura 7.10 está representada a disposição dos aerogeradores no terreno. Em torno de cada aerogerador está definida uma circunferência de diâmetro igual a 3 vezes o diâmetro do rotor do aerogerador. Dado que não se verificam interseções de circunferências, está assegurada a validade dos modelos definidos na norma.

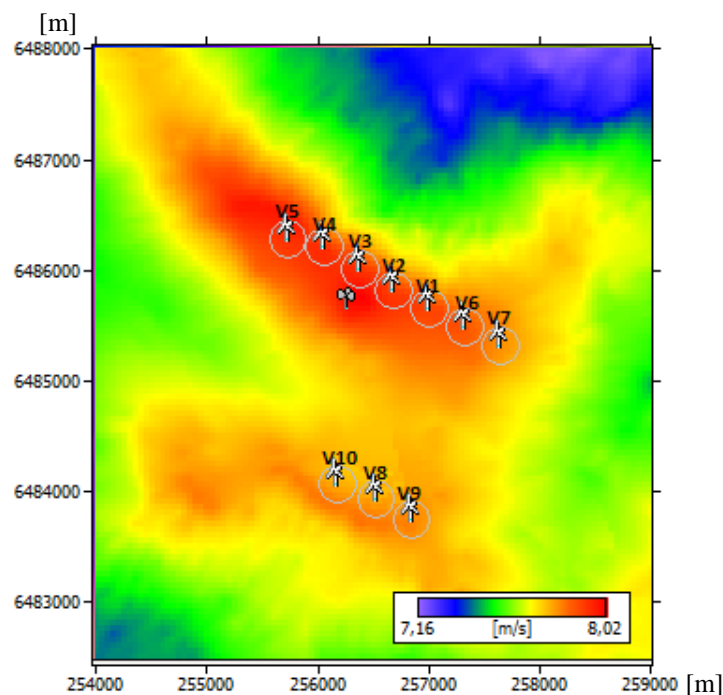


Figura 7.10 – Distribuição dos aerogeradores no terreno e respetivas velocidades médias de vento, para o parque África do Sul.

A observação do mapa permite verificar que os aerogeradores estão distribuídos pelos locais de maior velocidade média.

Na Figura D.2 volta-se a apresentar a disposição dos aerogeradores no terreno com circunferências em torno de cada aerogerador, neste caso de diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro do rotor aerogerador.

7.4 Produção estimada e perdas de esteira

Na Tabela 7.5 são apresentadas a produção bruta, as perdas de esteira, a produção líquida e o fator de carga. A produção líquida refere-se à produção bruta descontada, somente, das perdas de esteira.

Tabela 7.5 – Estimativas de produção do parque África do Sul.

Número de aerogeradores	10
Potência Instalada [MW]	30,75
Produção Anual Bruta [GWh/ano]	123,982
Perdas de esteira [%]	3,72
Produção Anual Líquida [GWh/ano]	119,374
Fator de carga (produção líquida) [h]	3882

7.5 Parâmetros de vento nos locais de instalação dos aerogeradores

7.5.1 Inclinação do escoamento

Na Tabela 7.6 apresentam-se os valores estimados de ângulos máximos de inclinação do escoamento para os diferentes locais de instalação dos aerogeradores. Os valores apresentados referem-se a valores absolutos.

Tabela 7.6 – Valores máximos absolutos do ângulo de inclinação do escoamento para os locais do parque África do Sul.

Aerogerador	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Máx. Incl. [°]	1,5	2,0	2,4	2,1	1,0	1,2	1,3	0,2	0,5	0,2

O valor máximo previsto de inclinação de escoamento, 2,4° para o local V3, está muito abaixo do limite definido pela norma IEC 61400-1, que é 8° (valor absoluto). Relativamente a este parâmetro não é expectável a ocorrência de problemas no funcionamento dos aerogeradores.

7.5.2 Inclinação do perfil vertical de velocidades

Na Tabela 7.7 representam-se os valores globais de *shear factor* para os diferentes locais de instalação dos aerogeradores.

Tabela 7.7 – Valores globais de *shear factor* (α) para os diferentes locais do parque África do Sul.

Aerogerador	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
α [-]	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,11	0,12

Verifica-se que o valor global de *shear factor* respeita o intervalo definido pela norma IEC 61400 – 1 (0 a 0,2) para todos os locais. Os valores de *shear factor* por setor estão também dentro do intervalo definido pela norma para todos os locais.

7.5.3 Ventos extremos

A previsão de ventos extremos, tal como referido anteriormente, necessita de séries de dados de longo período de tempo. A série de dados mais longa que se possui para o local tem a duração de 2 anos, período de tempo inferior ao recomendado pelas metodologias de previsão de ventos extremos. Porém o WEng permite a previsão de ventos extremos para séries de dados a partir de 2 anos.

Na Tabela 7.8 estão representados os valores extremos de velocidade de vento para um período de recorrência de 50 anos para os locais de instalação do aerogerador previstos pelo WEng.

Tabela 7.8 – Valores extremos de velocidade do vento para um período de recorrência de 50 anos, para os locais do parque África do Sul.

Aerogerador	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
V_{e50} [m/s]	34,6	34,3	34,8	35,0	35,1	35,4	35,2	34,6	34,7	34,6

Em todos os locais é respeitada a velocidade limite correspondente à classe II dos aerogeradores, 42,5 m/s. Porém, como já referido, a validade de tais previsões é reduzida, pois o período de tempo da série é inferior ao mínimo recomendado.

7.5.4 Distribuição de frequências de velocidade

Na Tabela 7.9 caracterizam-se os locais onde as distribuições de velocidade de vento respeitam a distribuição definida pela norma IEC 61400-1, no intervalo de $0,2 V_{ref}$ a $0,4 V_{ref}$, como “Ok” e caso contrário como “Não”.

Tabela 7.9 – Comparação das distribuições de velocidade de vento do local com a distribuição da norma IEC 61400-1 no intervalo de $0,2 V_{ref}$ a $0,4 V_{ref}$, para o parque África do Sul.

Aerogerador	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
Dist. Vel.	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não

As distribuições de velocidade do vento desrespeitam a distribuição definida pela norma, na gama de interesse, para todos os locais. Para este terreno, a partir do momento que um dos locais não cumpre a condição definida pela norma, é normal que também todos os outros

locais não a respeitem, pois o facto de se tratar de uma área de reduzida complexidade torna expectável que todos os locais apresentam distribuições de velocidade similares entre si.

Na Figura 7.11 apresentam-se a distribuição prevista para o local V6 e a distribuição definida pela norma para a classe II de aerogeradores.

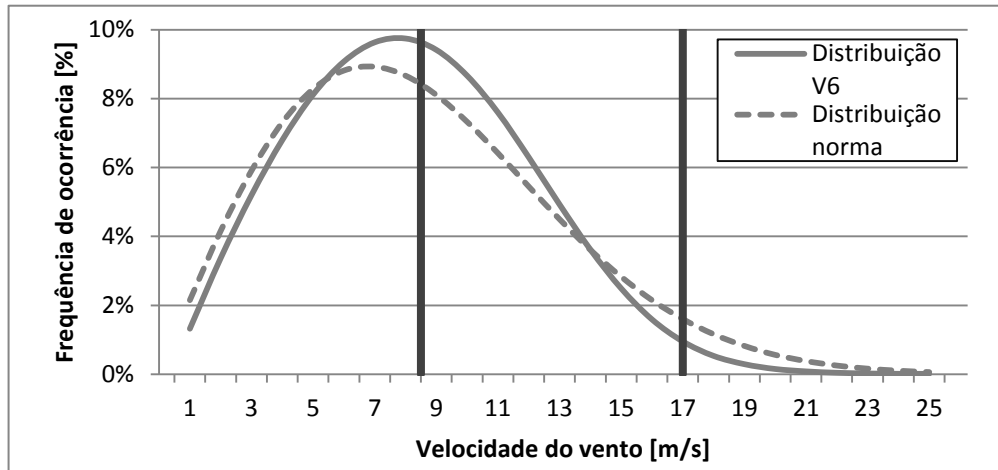


Figura 7.11 – Comparação entre a distribuição de frequências de velocidade do local V6 e a distribuição definida pela norma, para o parque África do Sul.

A distribuição prevista para o local não respeita a definida pela norma em grande parte do intervalo de interesse, excetuando na parte final.

Uma solução para esta situação passa pela comunicação com o fabricante do aerogerador, para saber qual a distribuição assumida para efeitos de cálculo à fadiga e, posteriormente, verificar se a distribuição dos vários locais respeita essa distribuição, tal como já referido no caso anterior.

7.5.5 Intensidade de turbulência

Nesta secção são efetuadas duas análises relativamente à turbulência, uma não considerando o efeito da esteira dos aerogeradores vizinhos e outra considerando esse efeito.

Na Tabela 7.10 apresentam-se os valores médios e representativos de intensidade de turbulência a 15 m/s para os diferentes locais, na ausência do efeito de esteira.

Tabela 7.10 - Valores médios e representativos da intensidade de turbulência a 15 m/s, na ausência de efeito de esteira, para o parque África do Sul.

Aerogerador	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
I_{méd} (%)	13,5	13,4	13,3	13,3	13,3	13,4	13,6	13,7	13,6	13,8
I_{rep} (%)	14,9	14,9	14,7	14,8	14,8	14,8	15,0	15,1	15,0	15,2

Na Tabela 7.11 representam-se os valores de intensidade de turbulência efetiva a 15 m/s, ou seja, o valor representativo da intensidade de turbulência com consideração do efeito de

esteira. A linha denominada esteira representa o peso da componente de intensidade de turbulência devido à esteira no valor total da intensidade de turbulência efetiva.

Tabela 7.11 – Valores de intensidade de turbulência efetiva a 15 m/s e peso da esteira nesse valor da intensidade de turbulência, para o parque África do Sul.

Aerogerador	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10
I_{ef} (%)	16,8	16,6	16,5	17,1	17,6	17,4	17,2	16,9	16,3	16,2
Esteira (%)	11,3	10,2	10,9	13,5	15,9	14,9	12,8	10,7	8,0	6,2

Na ausência de consideração do efeito de esteira dos aerogeradores vizinhos, todos os locais apresentam valores, sejam médios ou representativos, de intensidade de turbulência para a velocidade de 15 m/s que respeitam o valor limite da subclasse A dos aerogeradores.

A consideração do efeito de esteira provoca o aumento da intensidade de turbulência para todos os locais. Contudo, todos os locais apresentam valores de intensidade de turbulência efetiva para a velocidade de 15 m/s inferiores ao limite definido pela subclasse A dos aerogeradores.

O intervalo de verificação da curva de intensidade de turbulência para o modelo de aerogerador deste projeto é de 8,4 a 25 m/s.

Na Figura 7.12 apresentam-se as curvas de intensidade de turbulência ambiente (valores representativos) para os locais V6 e V10. A intensidade de turbulência ambiente respeita o limite definido pela subclasse B dos aerogeradores para os dois locais no intervalo de velocidades de interesse. A opção pela análise do local V6 deveu-se ao facto de este ser um dos locais onde o peso da esteira na intensidade de turbulência efetiva é maior, enquanto a escolha do local V10 é devido exatamente ao oposto, ou seja, trata-se do local onde o peso da esteira é menor.

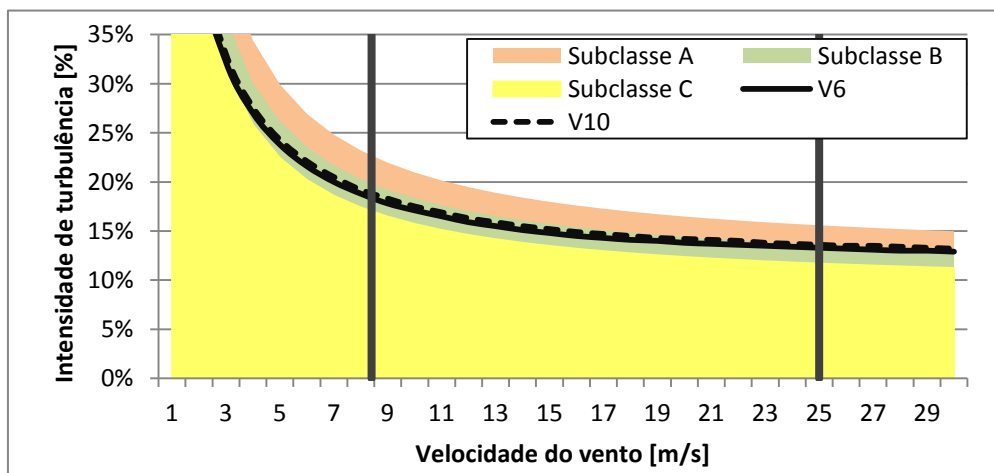


Figura 7.12 – Curvas de intensidade de turbulência ambiente (valor representativo) para os locais V6 e V10.

Na Figura 7.13 apresentam-se, para os mesmos locais, as curvas de intensidade de turbulência efetiva. Com a consideração da esteira, assiste-se a um deslocamento das curvas de intensidade de turbulência para cima, correspondente a um aumento dos valores de intensidade de turbulência. No local V6, a curva de intensidade de turbulência efetiva desrespeita o limite definido pela subclasse A dos aerogeradores na parte inicial da gama de velocidades de interesse. O local V10 é menos influenciado pelo efeito da esteira dos aerogeradores vizinhos e a sua curva de intensidade de turbulência efetiva respeita o limite definido pela subclasse A no intervalo de interesse.

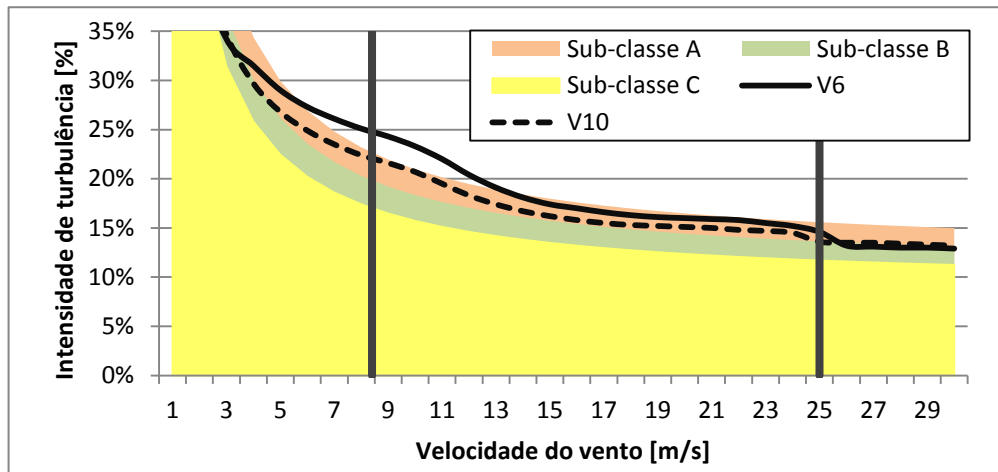


Figura 7.13 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva para os locais V6 e V10.

Na Figura 7.14 apresenta-se a comparação entre a curva de intensidade de turbulência efetiva global com as correspondentes para os rumos mais energéticos para o local V6. Verifica-se que apesar da curva global desrespeitar o limite definido pela subclasse A dos aerogeradores, as curvas correspondentes aos setores mais energéticos respeitam esse limite, cumprindo até as condições definidas pela subclasse B. Num local como este a aplicação a gestão setorial do funcionamento do aerogerador pode permitir a eliminação do efeito da esteira à custa de uma baixa perda de produção.

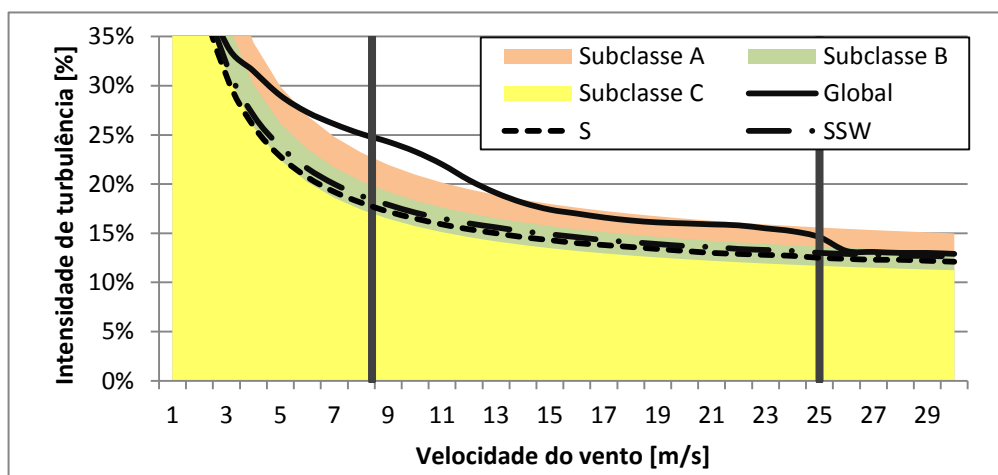


Figura 7.14 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva global e para os rumos dominantes para o local V6.

7.6 Gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores

Na Figura 7.15 apresenta-se a rosa de intensidade de turbulência e a rosa de energia para o local V6.

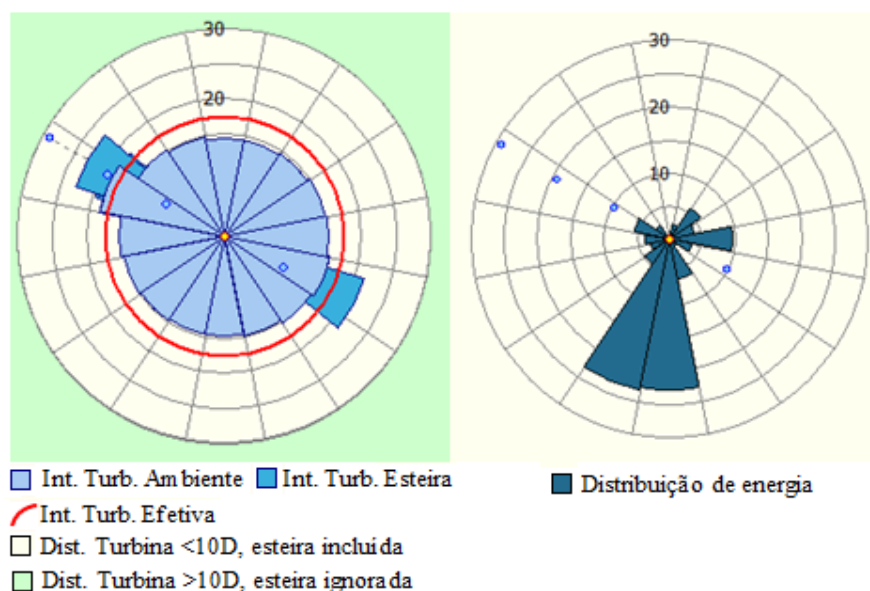


Figura 7.15 – Rosa de intensidade de turbulência (à esquerda) e rosa de energia (à direita) para o local V6.

Os setores para os quais os valores de intensidade de turbulência são maiores não coincidem com os setores mais energéticos, pelo que a limitação setorial do funcionamento do aerogerador, neste caso, pode permitir a diminuição da intensidade de turbulência com uma perda de produção reduzida.

A esteira provocada pelos aerogeradores vizinhos V1 e V7 provocam um acréscimo considerável na intensidade de turbulência do local V6 relativamente ao valor da ambiente.

Na Tabela 7.12 apresenta-se a limitação setorial imposta ao funcionamento do aerogerador do local V6. Neste caso está-se a limitar o funcionamento do aerogerador para o vento proveniente da direção do local V1, na gama de velocidades de 7 a 13 m/s.

Tabela 7.12 – Limitação setorial imposta ao aerogerador do local V6.

Limitação setorial	Intervalo do setor [°]	Gama de velocidade [m/s]
I	288 – 310	7 – 13

Na Figura 7.16 apresenta-se a curva de intensidade de turbulência efetiva experimentada pelo aerogerador no local V6 após a aplicação das limitações setoriais, em comparação com a mesma curva na ausência de gestão setorial. Verifica-se que a limitação setorial do funcionamento imposta ao aerogerador permitiu que a curva de intensidade de turbulência

efetiva passasse a respeitar o limite definido pela subclasse A na gama de velocidades de interesse.

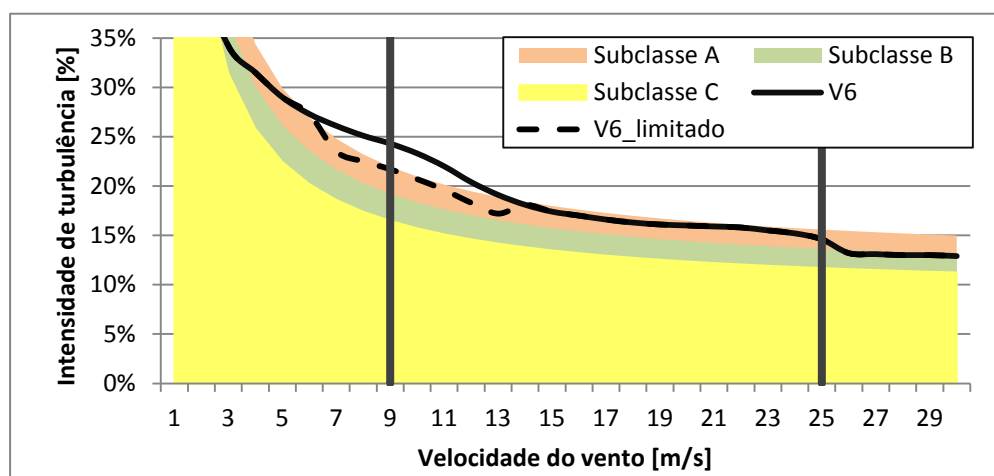


Figura 7.16 – Curvas de intensidade de turbulência efetiva experimentadas pelo aerogerador do local V6 com e sem gestão setorial do seu funcionamento.

Na Tabela 7.13 apresenta-se a comparação entre as produções anuais líquidas do aerogerador do local V6 para o caso de funcionamento sem limitação e para o caso de funcionamento com as limitações definidas na Tabela 6.12.

A perda de produção devido à limitação do funcionamento do aerogerador é baixa, sendo esta uma boa solução para eliminar o excesso de intensidade de turbulência verificada para o local V6.

Tabela 7.13 – Perdas de produção devido à limitação setorial imposta ao aerogerador do local V6.

Produção Anual Líquida [GWh]	11,884
Produção Anual Líquida com limitação setorial [GWh]	11,661
Perda devido à limitação setorial [%]	1,9

7.7 Avaliação do comportamento dos programas

Nesta secção, tal como para o caso de estudo anterior, efetua-se a avaliação da capacidade de previsão de alguns parâmetros pelo WAsP e WEng através da sua comparação com os dados obtidos para a estação de medição.

Os parâmetros em comparação são a distribuição de frequências de velocidade, a inclinação do perfil vertical de velocidades e a curva de intensidade de turbulência. As comparações são efetuadas para a estação A à altura de 80 m a.n.s..

7.7.1 Distribuição de frequências de velocidade

Na Tabela 7.14 comparam-se os valores dos parâmetros da distribuição de Weibull do regime de ventos observado no local da estação de medição, com os valores dos parâmetros do regime de ventos previsto pelo WAsP para o local da estação e à mesma altura.

Tabela 7.14 – Comparação entre os parâmetros da distribuição de Weibull observados e previstos pelo WAsP, para o parque África do Sul.

Distribuição de Weibull	Observado	Previsão WAsP	Erro de previsão [%]
Fator de escala – A [m/s]	8,7	8,7	0
Fator de forma – k [-]	2,28	2,2	-3,5
Velocidade média [m/s]	7,68	7,73	0,7

O modelo do WAsP apresenta um bom desempenho na previsão dos parâmetros da distribuição de Weibull para o local da estação de medição.

7.7.2 Perfil vertical de velocidades

Na Figura 7.17 é possível observar o perfil vertical de velocidades obtido a partir dos dados da estação A, o previsto pelo WAsP e o previsto pelo WEng.

Os perfis verticais de velocidade previstos balizam o perfil medido, verificando-se uma sobre estimativa do valor de *shear factor* previsto pelo WAsP e uma subestimação do valor previsto pelo WEng.

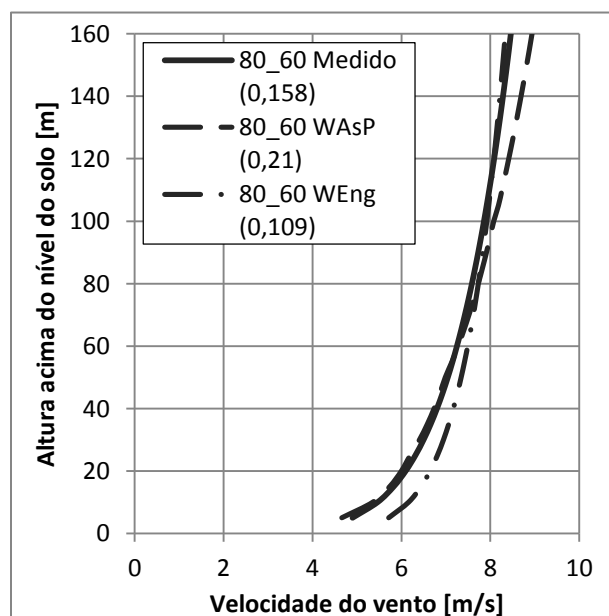


Figura 7.17 – Perfil vertical de velocidades medido e perfis previstos pelo WAsP e WEng, para o parque África do Sul.

7.7.3 Intensidade de turbulência

Na Figura 7.18 comparam-se as curvas de intensidade de turbulência (valores representativos) obtidas a partir dos dados da estação A à altura de 80 metros a.n.s. com a respetiva previsão do WAT para a estação e à mesma altura.

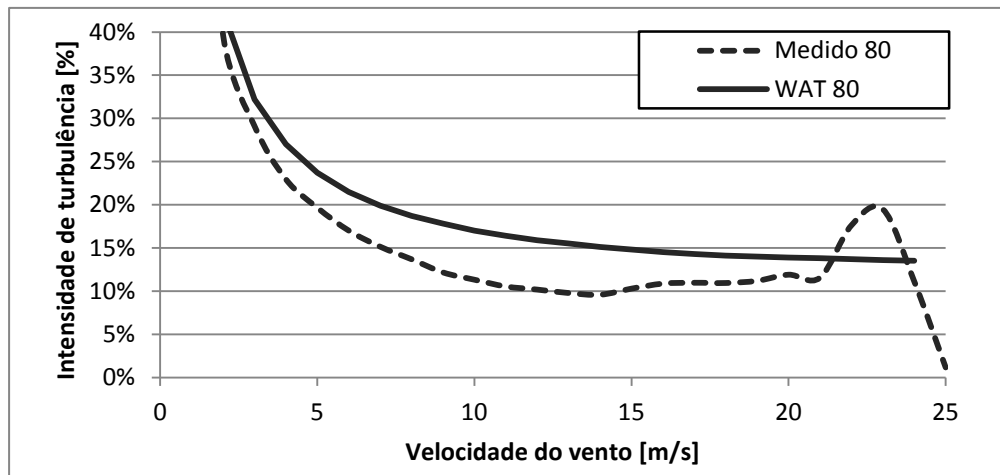


Figura 7.18 - Curva de intensidade de turbulência medida a 80 m a.n.s. e respetiva previsão do WAT, para o parque África do Sul.

A previsão do WAT sobrestima os valores de intensidade de turbulência quando comparados com os valores obtidos da análise direta dos dados da estação.

Neste caso é provável que as curvas previstas de intensidade de turbulência efetiva para os diferentes locais se encontrem acima das reais.

7.8 Considerações finais

O parque eólico de África do Sul apresenta um terreno plano, o que faz com que os parâmetros qualitativos de vento respeitem, na generalidade, os limites definidos pela norma. Contudo, verifica-se o desrespeito das frequências de velocidade do vento para todos os locais, assim como, o incumprimento por parte da curva de intensidade de turbulência efetiva, na parte inicial da gama de interesse, para alguns locais.

Este terreno cumpre as condições fundamentais ao correto funcionamento do WAsP, sendo os resultados fornecidos pelo programa confiáveis neste caso. A reduzida variação dos parâmetros de vento para os diferentes locais é um reflexo da não complexidade do terreno.

Neste projeto, a aplicação da gestão setorial do funcionamento do aerogerador é atrativa, pelo facto de permitir mitigar o incumprimento verificado em relação à turbulência à custa de uma reduzida perda de produção do aerogerador, sendo que tal se deve ao facto dos parâmetros de vento para os rumos dominantes respeitarem os limites definidos pela norma.

8 Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A avaliação de locais para instalação de aerogeradores requer dois tipos de análise do vento, a quantitativa, que permite aferir da disponibilidade de recurso eólico do local, e a qualitativa, que permite aferir da possibilidade de instalação e correto funcionamento dos aerogeradores no local.

A análise qualitativa é alvo de normas de regulamentação. A existência destas normas de regulamentação do projeto de aerogeradores e parques eólicos é importante para garantir uma uniformização dos critérios de projeto, permitindo deste modo aumentar a probabilidade de cumprimento do tempo de vida previsto de correto funcionamento dos aerogeradores.

Estas normas encontram-se em permanente mutação, acompanhando a evolução da tecnologia empregue na construção dos aerogeradores. A norma IEC 61400-1 é um exemplo do atrás referido, tendo a sua 1ª edição sido elaborada em 1994, encontrando-se atualmente na 3ª edição. Esta 3ª edição, lançada em 2005, foi entretanto revista em alguns parâmetros pela adenda IEC 61400-1/A1 de 2009. Posto isto, estas normas não devem ser encaradas como regras de ouro para a possibilidade de instalação de aerogeradores, mas sim como um modo de identificação de situações críticas para o seu correto funcionamento.

A norma define as metodologias e os parâmetros de vento que devem ser alvo de análise, assim como os valores limites para os diferentes parâmetros. De entre os parâmetros qualitativos de vento destacam-se os seguintes: inclinação do escoamento, perfil vertical de velocidades, distribuição de frequências de velocidade, ventos extremos e turbulência do escoamento. Os valores limites devem ser encarados como um modo de identificação de locais críticos, e não como decisores finais da possibilidade de instalação do aerogerador, tal como já referido.

Para a verificação dos parâmetros apresentados pelas normas é necessário utilizar programas de simulação do escoamento atmosférico. Os principais programas utilizados neste trabalho foram o WAsP, o WEng e o WAT. Estes programas utilizam um modelo linearizado, pelo que apresentam limitações no tratamento de dados de vento em terrenos complexos, pois não têm capacidade de tratar fenómenos de descolamento do escoamento, nem os fenómenos de recirculação associados. Estas limitações obrigam o utilizador a assumir uma atitude crítica em relação aos parâmetros estimados pelos programas, sendo importante a realização de testes de comportamento do programa que afirmem da qualidade dos seus resultados.

A complexidade do terreno tem um papel determinante na avaliação qualitativa do recurso eólico. Em locais de vegetação densa e de elevada altura, como é caso do projeto do parque Itália analisado, as medições a alturas a.n.s. inferiores são fortemente influenciadas pela sua presença, sendo nestes casos recomendável efetuar medições a alturas superiores, nomeadamente à altura do eixo, se possível, tendo em conta os custos associados. Estas

medições a alturas inferiores são, contudo, importantes na tentativa de prever as condições a que estarão sujeitas as pás do rotor na passagem por essas alturas.

Os terrenos caracterizados como complexos apresentam uma grande variação dos parâmetros de vento para diferentes locais, como observado no projeto do parque Itália, enquanto nos terrenos de baixa complexidade a variação dos parâmetros para os diferentes locais é reduzida, como observado no projeto do parque África do Sul.

As metodologias de previsão de ventos extremos requerem séries de dados de longos períodos de tempo, períodos mínimos de 7 a 10 anos. Porém, existem metodologias que permitem a previsão a partir de dados de períodos inferiores, apresentando contudo estas previsões uma validade reduzida.

A análise qualitativa global do vento do local deve ser complementada com uma análise setorial, com especial destaque para os setores mais energéticos. Quando a análise global qualitativa identifica situações críticas, mas as mesmas não se verificam para os setores mais energéticos, a gestão setorial do funcionamento dos aerogeradores permite a mitigação dos problemas identificados à custa de uma baixa perda de produção do aerogerador, como visto no parque África do Sul. Contudo, quando os parâmetros de vento dos rumos mais energéticos não cumprem o estabelecido nas normas, a gestão setorial do funcionamento deixa de ser atrativa, pois a mesma implica elevadas perdas de produção, como visto no parque Itália. Relativamente a esta problemática, é necessário ter ainda em conta que, a paragem de um determinado aerogerador diminui as perdas de esteira e problemas de turbulência dos aerogeradores vizinhos, o que é benéfico para a produção global do parque.

Por fim, destacar que os fabricantes de aerogeradores desempenham um papel muito importante na avaliação do correto funcionamento de aerogeradores nos locais previstos para a sua instalação, pois são eles que definem as condições limites de funcionamento dos seus equipamentos.

No futuro seria interessante analisar a metodologia de matrizes de decisão utilizada na avaliação de locais para instalação de aerogeradores. Esta metodologia baseia-se, tal como o próprio nome refere, na criação de uma matriz em que, para cada local, se apresenta os valores dos diferentes parâmetros qualitativos de vento. A análise da matriz permite a identificação dos locais mais críticos para a instalação dos aerogeradores.

A comparação entre os resultados obtidos pelo WASP e ferramentas complementares com os resultados obtidos de modelos CFD (*Computer Fluid Dynamics*) baseados nas equações de Navier-Stokes também seria algo interessante de realizar. Os modelos de CFD permitem ultrapassar algumas limitações dos modelos linearizados, sendo interessante a sua utilização em locais e setores críticos.

Referências

- [1] Rodrigues, Á. H., *Generalidades Eólica*, 2012.
- [2] The Guardian, “The Guardian,” 17 Outubro 2008. [Online]. Available: <http://www.guardian.co.uk/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy>. [Acedido em 02-05-2013].
- [3] Castro, R. M. G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada - Introdução à Energia Eólica*, Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2008.
- [4] ENERCON, “ENERCON - Energy for the World,” [Online]. Available: <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>. [Acedido em 02 Maio 2013].
- [5] The Wind Power, “Wind farms list,” [Online]. Available: http://www.thewindpower.net/windfarms_list_en.php. [Acedido em 28 Maio 2013].
- [6] Burton, T. et al, *Wind Energy Handbook*, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [7] Manwell, J. F., McGowan, J. G. e Rogers, A. L., *Wind Energy Explained - Theory, Design and Application*, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- [8] Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, *European Wind Atlas*, Commission of the European Communities, 1989.
- [9] IEC - International Electrotechnical Commission, *Wind Turbine - Part 1: Design Requirements*, IEC - 3ª Edição, 2005.
- [10] Wind Energy Division, *WAT 3 Help*, Roskilde, Denmark: Risø DTU, 2011.
- [11] Nelson, V., *WIND ENERGY - Renewable Energy and the Environment*, CRC Press - Taylor and Francis Group, 2009.
- [12] Frandsen, S. T., *Risø-R-1188(EN)*, Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 2007.
- [13] Mortensen, Niels G. et al, *Wind Atlas Analysis and Application Program: WAsP 10 Help Facility*, Wind Energy Division, Risø National Laboratory for Sustainable Energy, Technical University of Denmark (DTU), 2011.
- [14] Jørgensen, Hans E., *WAsP Engineering User's Guide*, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.

ANEXO A: Modelo de turbulência de esteira

O modelo de esteira apresentado na 3ª edição da norma IEC 61400-1 é uma versão simplificada do modelo de esteira apresentado no estudo Risø-1188 (EN).

A turbulência de esteira é formulada como uma combinação da intensidade de turbulência ambiente (I_{amb}) e turbulência adicional devido à presença dos aerogeradores vizinhos (I_{adi}), tal como apresentado na expressão (A.1).

$$I_{esteira} = \sqrt{I_{amb}^2 + I_{adi}^2} \quad (A.1)$$

No estudo Risø-1188 (EN) a turbulência adicional é modelada de acordo com a expressão (A.2).

$$I_{adi}^2 = \frac{1}{\left(1,5 + 0,8d/\sqrt{C_T(u)}\right)^2} \quad (A.2)$$

Na expressão (B.2), d é a distância normalizada pelo diâmetro do rotor e C_T é coeficiente de impulso axial.

A 3ª edição da norma IEC 61400-1 sugere uma versão simplificada do modelo anterior, em que se define um valor conservativo para o coeficiente de impulso axial, tal como apresentado na expressão (A.3). Introduce ainda um fator de 0,9 na expressão do modelo. O modelo definido pela norma encontra-se expresso em (A.4).

$$C_T(u) = \frac{7}{u} \quad (A.3)$$

$$I_{adi}^2 = \frac{0,9}{\left(1,5 + 0,3d/\sqrt{u}\right)^2} \quad (A.4)$$

Contudo, a adenda IEC 61400-1/A1 define que se pode utilizar o modelo definido pelo estudo Risø-1188 (EN).

ANEXO B: Turbulência ambiente em parques eólicos

Em parques eólicos com um grande número de aerogeradores, estes tendem a gerar a sua própria turbulência ambiente. Assim, quando o número de aerogeradores alinhados desde da fronteira inicial do parque eólico até à unidade considerada é maior que 5 ou quando o espaçamento entre aerogeradores na direção do rumo dominante do vento é inferior a 3 vezes o diâmetro do rotor do aerogerador, deve ser assumida, de acordo com a norma IEC 61400-1, a seguinte turbulência ambiente,

$$\hat{\sigma}' = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\hat{\sigma}_W^2 + \hat{\sigma}^2} + \hat{\sigma} \right) \quad (\text{B.1})$$

onde,

$$\hat{\sigma}_W = \frac{0,36V_{eixo}}{1 + 0,2\sqrt{d_r d_f / C_T}} \quad (\text{B.2})$$

O símbolo d_f representa o espaçamento entre aerogeradores na direção perpendicular à direção dominante do vento e d_r representa o espaçamento entre os aerogeradores na direção dominante do vento.

ANEXO C: Outros Resultados – Parque eólico Itália

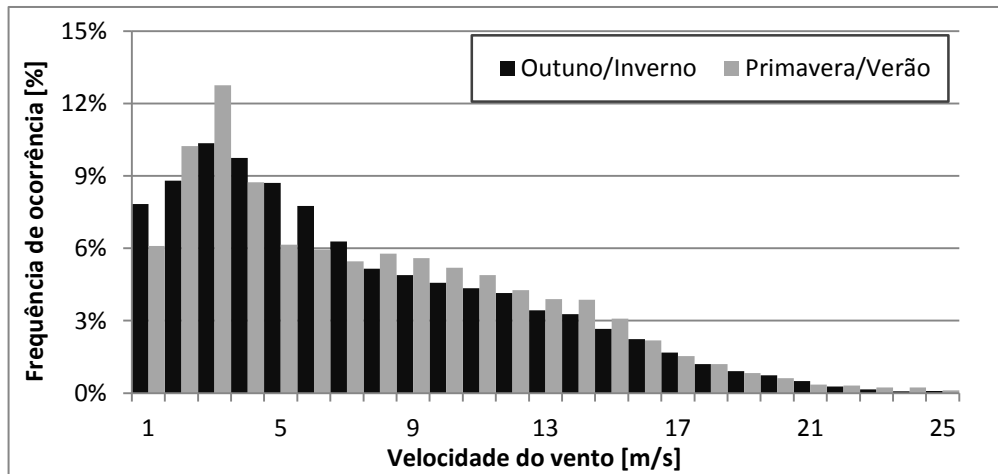


Figura C.1 – Distribuição de frequências de velocidade para os períodos Outuno/Inverno e Primavera/Verão para os dados da estação B do parque Itália.

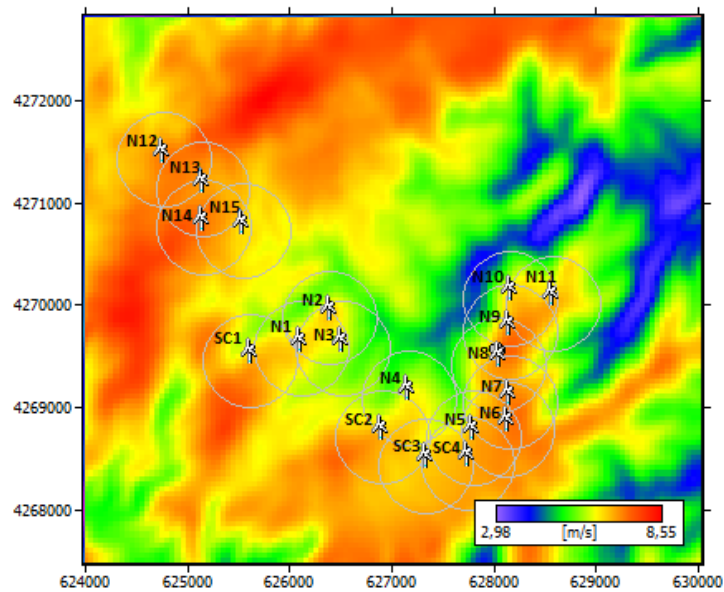


Figura C.2 – Distribuição dos aerogeradores e respectivas circunferências de diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro do rotor dos aerogeradores, para o parque Itália.

Tabela C.1 – Valores do ângulo de inclinação do escoamento por sector para alguns locais do parque Itália.

Setor [°]	N3		N4		N10		N11		SC1	
	Incl. [°]	Freq. [%]	Incl. [°]	Freq. [%]	Incl. [°]	Freq. [%]	Incl. [°]	Freq. [%]	Incl. [°]	Freq. [%]
0	3,8	3,1	9,5	3,46	8,2	9,41	5	3,43	7	3,42
22,5	6,6	3,96	10,1	4,31	6,4	9,27	7,8	3,98	8,7	4,33
45	8,4	6,3	9,3	6,19	4,1	8,58	9,8	4,92	8,9	6,46
67,5	9,2	7,63	7,2	6,62	1,2	7,42	10,1	5,65	8,2	6,88
90	8,9	5,05	4	4,92	-1,7	7,84	8,6	5,06	6,2	4,77
112,5	7,4	2,52	-0,4	2,65	-4,9	9,5	5,7	3,48	3	2,49
135	4,2	1,79	-4,5	1,95	-7,2	10,29	2,1	2,54	-0,7	1,87
157,5	0,4	1,72	-8	1,98	-8,7	13,4	-1,5	2,41	-4,9	1,92
180	-3,9	2,46	-9,6	2,79	-8,2	11,51	-5	3,26	-7,2	2,73
202,5	-6,7	4,06	-10,1	4,45	-6,6	10,71	-7,9	3,98	-8,7	4,42
225	-8,5	4,25	-9,4	3,86	-4,3	9,71	-9,9	3,17	-9	3,95
247,5	-9,2	4,75	-7,4	4,1	-1,6	9,71	-10,2	3,09	-8,2	4,1
270	-8,9	13,26	-4,1	9,55	1,3	10,08	-8,7	7,85	-6,2	9,84
292,5	-7,4	24,22	0,1	26,08	4,4	11,46	-5,7	25,02	-3	25,88
315	-4,3	10,77	4,3	11,61	7,1	11,28	-2,1	16,29	0,9	11,69
337,5	-0,2	4,17	7,7	5,49	8,5	11,42	1,6	5,87	4,4	5,29

Tabela C.2 – Valores setoriais de *shear factor* (α) para os locais N3, N13 e N15.

Setor [°]	N3		N13		N15	
	α [°]	Freq. [%]	α [°]	Freq. [%]	α [°]	Freq. [%]
0	0,18	3,1	0,21	2,67	0,168	2,88
22,5	0,155	3,96	0,229	3,01	0,192	3,32
45	0,134	6,3	0,218	4,31	0,216	4,68
67,5	0,126	7,63	0,193	5,86	0,211	6,03
90	0,134	5,05	0,172	6,62	0,195	6,07
112,5	0,178	2,52	0,169	4,15	0,183	3,74
135	0,197	1,79	0,167	2,54	0,164	2,45
157,5	0,201	1,72	0,197	2,25	0,167	2,27
180	0,169	2,46	0,241	2,51	0,19	2,71
202,5	0,139	4,06	0,227	3,13	0,204	3,49
225	0,105	4,25	0,187	2,96	0,176	3,08
247,5	0,091	4,75	0,137	3,24	0,159	3,23
270	0,095	13,26	0,11	7,52	0,134	7,45
292,5	0,135	24,22	0,112	31,82	0,128	30,33
315	0,196	10,77	0,135	13,07	0,141	13,55
337,5	0,222	4,17	0,18	4,32	0,161	4,72

ANEXO D: Outros Resultados – Parque eólico África do Sul

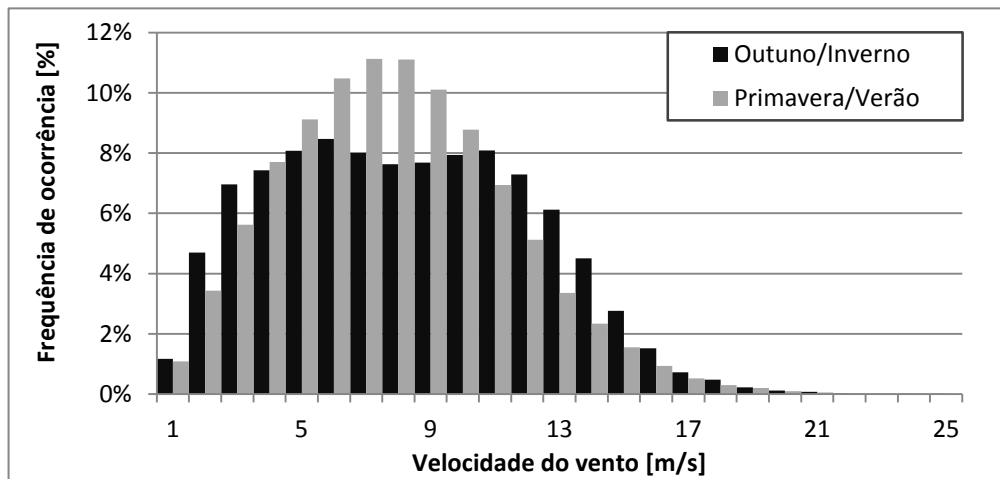


Figura D.1 – Distribuição de frequências de velocidade para os períodos Outono/Inverno e Primavera/Verão para os dados da estação do parque África do Sul.

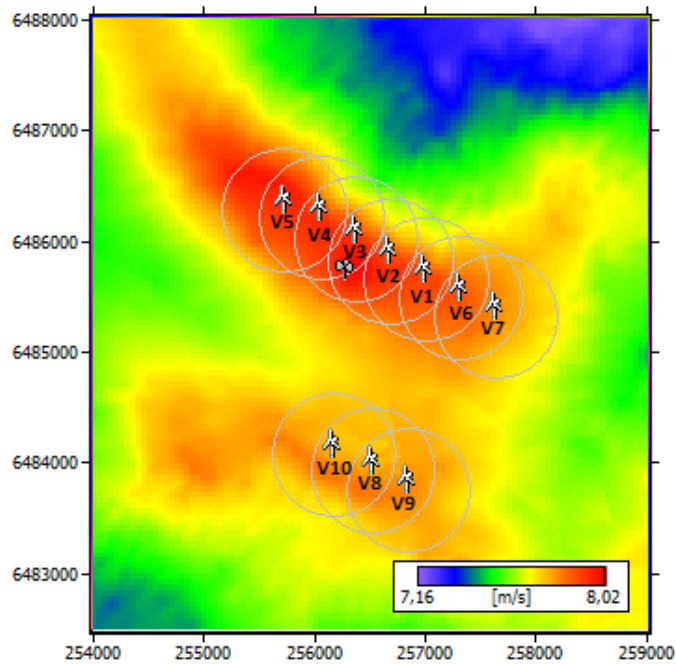


Figura D.2 – Distribuição dos aerogeradores e respectivas circunferências de diâmetro igual a 10 vezes o diâmetro do rotor dos aerogeradores, para o parque África do Sul.