



UNIVERSIDADE da BEIRA INTERIOR

Caracterização do Potencial de Energia Eólica na Beira Interior

Francisco Manuel Serra Correia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electromecânica

Orientador: Professor Doutor Luís Carrilho Gonçalves

Co-Orientador: Engenheiro Luís Pires

Junho de 2010

Agradecimentos

Ao meu pai (in memoriam), à minha mãe, irmã e restante família que nunca duvidaram e encorajaram-me nos momentos mais difíceis, tendo sido fundamentais na conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador professor Dr. Luís Carrilho Gonçalves, que me despertou o interesse para este trabalho. E esteve sempre presente, procurando saber os detalhes e avanços do trabalho, e auxiliando na resolução do mesmo.

Ao meu co-orientador Engenheiro Luís Pires, que sempre se mostrou disponível e paciente sobretudo aquando das traduções do artigo para o ICREPQ.

À Dr^a Ana Estanqueiro (INETI), ao Engenheiro Porfírio Mendes (ENERCON) e ao Engenheiro Miguel Almeida (ENERG) pela colaboração prestada no fornecimento e auxílio do tratamento de dados.

Aos meus amigos que me ajudaram e incentivaram ao longo deste trabalho.

“The answer, my friend, is blowin’ in the wind, The answer is blowin’ in the wind”

Bob Dylan

Resumo

O presente Relatório de Mestrado em Engenharia Electromecânica pretende avaliar e caracterizar o potencial de energia eólica na Beira Interior (Portugal).

Para isso, irão ser analisadas as capacidades instaladas de produção de energia eólica, bem como os respectivos potenciais na região referida. Atendendo a esta proliferação dos sistemas de produção de energia apoiados na força do vento é necessário conhecer, otimizar e inovar os procedimentos que se relacionam com a produção de energia eólica.

Posteriormente, com base nos dados meteorológicos e com a caracterização dos vários sistemas de aproveitamento de energia eólica, entre os quais a análise do tipo de turbinas, os seus parâmetros de funcionamento e a sua relação com o vento.

Esta análise pretende compreender as variações da curva de potência de determinado parque eólico, com a variabilidade da velocidade do vento compreendendo assim qual a implicação que as diversas variáveis (efeitos sazonais; orografia; presença de obstáculos; rugosidade do terreno), possuem na oscilação da produção de energia eólica.

O objectivo deste trabalho é melhorar e fomentar o desenvolvimento da energia eólica na região da Beira Interior, e consequentemente em Portugal.

Palavras chave

Beira Interior

Energia Eléctrica

Potencial de Energia eólica

Avaliação / Regime dos Ventos

Abstract

The present work intends to evaluate and to characterize the wind potential in Beira Interior (Portugal).

To do that it will be examined the installed capacity of wind energy, as well as their potential in that region. Due to the development of such systems for energy production is necessary to optimize and innovate the procedures that are related to the conversion of wind energy.

The analysis is based on meteorological data and on the characterization of the various systems of exploitation of wind energy, including the type of turbines used, their operating parameters and their relationship with the wind.

This work do a comprehensive analysis in order to understand the variations of the power curve of a particular wind park, with the variability of wind speed and the influence of several variables, such as seasonal changes; effects of treadmill; the presence of obstacles, the roughness of the ground and the local altitude, in the oscillation of the transformation of wind energy.

Finally, the wind data information about Beira Interior will be integrated in the national portuguese general Framework.

Keywords

Beira Interior
Electrical energy
Wind Energy Potential
Wind availability

Índice

1.Introdução	1
1.1 Introdução	2
1.2 Motivação	3
1.3 Objectivos	4
1.4 Estrutura do trabalho.....	5
2.Estado Actual	7
2.1 Situação Internacional.....	8
2.1.1 Europa.....	8
2.1.2 África	10
2.1.3 América	10
2.1.4 Ásia.....	11
2.1.5 Oceânia	12
2.2 Situação Nacional	12
3.A Beira Interior	17
3.1 Noções gerais	18
3.2 Caracterização do relevo e do clima	18
3.3 A distribuição da rede eléctrica.....	21
3.4 Restrições Ambientais	22
3.5 Levantamento dos Parques eólicos na Beira Interior.....	22
4.Fundamentos Teóricos da Energia Eólica.....	27
4.1 Caracterização dos ventos.....	28
4.2 Factores de influência no regime dos ventos	29
4.2.1 A Altura	30
4.2.2 Rugosidade	33
4.2.3 Obstáculos	34

4.2.4	Altitude	35
4.2.5	Orografia.....	36
4.2.6	Efeito de esteira	37
4.3	Potencial da Energia Eólica	37
4.3.1	Eficiência de Betz.....	39
4.3.2	Análise da Curva de Potência.....	40
4.3.3	Coeficiente de Potência	42
4.4	Seleção do terreno para um parque eólico	42
4.5	Medições do vento	45
4.5.1	Estações Anemométricas.....	46
4.5.2	CrITÉrios para uma boa medição do vento	47
4.6	Parâmetros Estatísticos	49
4.6.1	Rosa-dos-ventos	49
4.6.2	Distribuição de Weibull.....	50
4.6.3	Distribuição de Rayleigh	53
5.	Caracterização da Tecnologia	57
5.1	Introdução	58
5.1.1	Sistemas ligados à rede.....	58
5.2	O sistema eólico.....	58
5.2.1	Suportes	60
5.2.2	Sistemas de captação	61
5.2.3	Sistemas de orientação	65
5.2.4	Sistemas de regulação.....	66
5.2.5	Sistemas de transmissão	67
5.2.6	Sistemas de geração.....	68
5.2.7	Acessórios.....	70
5.2.8	Armazenamento.....	70
5.3	Aerogerador E-82	71
5.3.1	Sistema de sensores	74
5.3.2	Sistemas de controlo.....	75

5.3.3 Monitorização da temperatura	75
5.3.4 Armário de controlo / display	76
5.3.5 Nacelle	77
5.3.6 Monitorização à distância (sistema SCADA).....	77
5.3.7 Curva de potência	79
6.Impactes Ambientais e Socioeconómicos	83
6.1 Paisagem	84
6.2 Ruído.....	86
6.3 Biodiversidade	87
6.4 Ocupação do solo	88
6.5 Interferência Electromagnética	90
6.6 Socioeconómicos	90
7.Análise e Tratamento de Dados	93
7.1 Análise para Guarda e Castelo Branco	94
7.1.1 Caracterização do distrito da Guarda	94
7.1.2 Caracterização do distrito de Castelo Branco.....	96
7.2 Análise do Parque eólico da Gardunha.....	98
7.3 Análise do Parque eólico do Vergão.....	103
8.Conclusões	109
Referências Bibliográficas	113
ANEXOS.....	121

Lista de Figuras e Tabelas

Figura 2.1 - Representa o crescimento da energia eólica nos últimos 10 anos, com as capacidades totais instaladas em MW, no final de cada ano	8
Figura 2.2 – Evolução da energia produzida a partir de fontes renováveis (TWh)	14
Figura 2.3 – Evolução mensal da produção de energia eólica em Portugal Continental. Os valores que se encontram em %, correspondem à variação relativamente ao mês homólogo do ano anterior	15
Figura 3.1: Mapa de altitude, de Portugal Continental (m), apresentando um relevo bastante montanhoso no interior do País.....	19
Figura 3.2: Distribuição da temperatura (°C) média anual para Portugal Continental, com temperaturas mais elevadas no litoral e sul do País	19
Figura 3.3: Mapa da velocidade média do vento (m/s), a 80 metros do solo, para Portugal continental, atingindo maiores velocidade, no interior, litoral e sul do País.	21
Figura 3.4: Histograma da direcção do vento a 80 metros de altura, para Portugal Continental.	21
Figura 4.1: Ventos de vale.	29
Figura 4.2: Ventos de montanha.	29
Figura 4.3: Mapas com a intensidade média do vento anual (m/s), para diferentes alturas 10 m (a), 60 m (b), e 80 m (c).....	32
Figura 4.4: Exemplo do escoamento do ar, em torno de um edifício, que pode ser comparado a um objecto de secção transversal rectangular.....	35
Figura 4.5: Esquema do vento em terrenos montanhosos.....	36

Figura 4.6: Potência (kW) versus velocidade do vento (m/s) de um aerogerador de 2 MW. Para cada ponto da curva de potência, encontram-se os valores na tabela ao lado, possibilitando assim uma visão geral do comportamento do aerogerador.....	41
Figura 4.7: Forma dos montes: (a) triangular (de maior aceleração); (b) arredondado; (c) topo plano; (d) encosta íngreme; (e) escarpado (de menor aceleração).	43
Figura 4.8: Orientações possíveis de linhas cumeadas: (a) perpendicular; (b) oblíquo; (c) paralelo; (d) côncavo; (e) convexo (menos desejável).	44
Figura 4.9: Exemplo de um anemómetro	46
Figura 4.10: Exemplo de um cata-vento	46
Figura 4.11: Frequência versus velocidade do vento para diferentes valores do factor de forma (k).....	52
Figura 4.12: Curvas de Weibull e Rayleigh para um determinado histograma.	54
Figura 5.1:Características de funcionamento para cada tipo de rotor – coeficiente de potência versus velocidade específica.....	61
Figura 5.2:Turbina eólica com rotor de duas pás	62
Figura 5.3: Turbina eólica com rotor de três pás	62
Figura 5.4: Turbina eólica com rotor multipás	62
Figura 5.5: Turbina eólica com rotor Darrieus	63
Figura 5.6: Turbina eólica com rotor Darrieus	63
Figura 5.7: Turbina eólica com rotor Savonius	63
Figura 5.8: Turbina eólica com rotor Savonius	63
Figura 5.9: Comparação do rendimento de aerogeradores de uma, duas e três pás - coeficiente de potência versus velocidade específica	64
Figura 5.10: Aerogerador E-82 da Enercon	71
Figura 5.11: Gráfico com a potência ligada e a instalar por parte dos maiores fabricante em Portugal	72
Figura 5.12: Display no armário de controlo do E-82	76
Figura 5.13: sistema de monitorização à distância para parques eólicos.....	78

Figura 5.14 A curva de potência e a do coeficiente de potência, para os vários valores de velocidade do vento do E-82	80
Figura 5.15 Curvas de potência dos aerogeradores mais utilizados	80
Figura 6.1 Representa o crescimento do número de empregados associados ao sector eólico nos últimos 5 anos, e as previsões até 2012	91
Figura 7.1: Rosa-dos-ventos elaborada em Excel a partir de dados fornecidos pelo IM para o distrito da Guarda (valores em %).	94
Figura 7.2: Gráfico com a distribuição das velocidades do vento em km/h, para os diferentes pontos cardeais. Elaborado em Excel com base nos dados fornecidos pelo IM para o distrito da Guarda.	95
Figura 7.3: Elaboração em GRAFHER8 da Distribuição de Weibull característica da estação meteorológica da Guarda.	95
Figura 7.4: Rosa-dos-ventos elaborada em Excel a partir de dados fornecidos pelo IM para o distrito de Castelo Branco (valores em %).	96
Figura 7.5: Gráfico com a distribuição das velocidades do vento em km/h, para os diferentes pontos cardeais. Elaborado em Excel com base nos dados fornecidos pelo IM para o distrito de Castelo Branco.	97
Figura 7.6: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull característica da estação meteorológica de Castelo Branco.	97
Figura 7.7 representação do mastro anemométrico da Gardunha	98
Figura 7.8: Mapa de curvas de nível representativo do local da estação anemométrica – IN32 da Gardunha	99
Figura 7.9: Maquete tridimensional representativa do local da estação anemométrica da Gardunha	99
Figura 7.10: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull característica da estação anemométrica da Gardunha.	101
Figura 7.11: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull em perspectiva, característica da estação anemométrica da Gardunha.	101
Figura 7.12: Rosa-dos-ventos característica da estação anemométrica da Gardunha.	101

Figura 7.13 Velocidade do vento ao longo do dia na estação anemométrica da Serra da Gardunha, para alturas de 10 e 20 metros	102
Figura 7.14: Impacto sonoro do funcionamento das turbinas eólicas	103
Figura 7.15: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull característica do Parque eólico do Vergão.	105
Figura 7.16: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull em perspectiva, característica do Parque eólico do Vergão.	105
Figura 7.17: Rosa-dos-ventos característica do Parque eólico do Vergão.	105

Tabela 3.1: Caracterização dos parques eólicos, quanto à potência instalada (MW), localizados no distrito da Guarda.....	23
Tabela 3.2: Caracterização dos aerogeradores instalados nos parques eólicos localizados no distrito da Guarda.....	23
Tabela 3.3: Caracterização dos parques eólicos quanto à potência instalada (MW), localizados no distrito da Castelo Branco.	24
Tabela 3.4 Caracterização dos aerogeradores instalados nos parques eólicos localizados no distrito de Castelo Branco	25
Tabela 4.1: Valores da velocidade do vento e potência da Curva de Potência	41
Tabela 4.2: Margem de erro na determinação da velocidade do vento [4.30]	48
Tabela 5.1: Evolução dos aerogeradores entre 1980 e 2005 na Alemanha [I4.3].....	60
Tabela 5.2: Descrição das vantagens e desvantagens para os diferentes tipos de rotores de eixo horizontal.	62
Tabela 5.3: Descrição das vantagens e desvantagens para os diferentes tipos de rotores de eixo vertical	63
Tabela 5.4: Características técnicas do E-82.....	73
Tabela 5.5: Os respectivos valores da potência e do coeficiente de potência, do E-82 para determinadas velocidades do vento, com massa específica do ar de $1,225\text{kg/m}^3$.81	

Tabela 7.1: Valores médios mensais obtidos pela estação anemométrica do INETI, na Serra da Gardunha.....	100
Tabela 7.2: representação dos valores do vento em função dos 12 sectores da rosa-dos-ventos, cada um com 30° (Parque eólico do Vergão).	104
Tabela 7.3: Parâmetros calculados do parque eólico do Vergão	106

Glossário

Lista de Siglas

<i>ABC</i>	American Bird Conservancy
<i>AWEA</i>	American Wind Energy Association
<i>CWEA</i>	Canadian Wind Energy Association
<i>DEWI</i>	German Wind Energy Institute
<i>DWTMA</i>	Danish Wind Turbine Manufacture´s Association
<i>EWEA</i>	European Wind Energy Association
<i>ICREPQ</i>	International Conference on Renewable Energies and Power Quality
<i>INEGI</i>	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
<i>INETI</i>	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
<i>IM</i>	Instituto de Meteorologia
<i>LNEG</i>	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
<i>MEI</i>	Ministério da Economia e da Inovação
<i>REN</i>	Rede de Energia Nacional

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SEE	Sistema Eléctrico de Energia
UE	União Europeia
WEA	World Energy Assessment
WWEA	World Wind Energy Association

Lista de Símbolos

Constantes e Variáveis

A	Área
A_W	Factor de escala de Weibull
c	Cinética
C_P	Coeficiente de potência
E_c	Energia cinética
F_{pot}	Fluxo de potência
h	Horas de funcionamento
k	Factor de forma de Weibull
m	Massa
m_{ar}	Massa de ar caudal

P	Potência
P_e	Potência eléctrica
P_m	Potência mecânica
R	Constante dos gases
v	Velocidade do vento
v_1	Velocidade antes da passagem pelo rotor
v_2	Velocidade depois da passagem pelo rotor
$v_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima
$v_{m\acute{e}d}$	Velocidade média
v_z	Velocidade à altura desejada
v_{z_r}	Velocidade à altura de referência
v_{min}	Velocidade mínima
z	Altura desejada
z_0	Comprimento da rugosidade
z_r	Altura de referência
α	Parâmetro directamente associado à rugosidade da superfície
ρ	Massa específica

σ Desvio padrão

Funções

Γ Função gama

$R(v)$ Função densidade de probabilidade de Rayleigh

$W(v)$ Função densidade de probabilidade de Weibull

CAPÍTULO

1

Introdução

Introdução

Motivação

Objectivos

Estrutura do Trabalho

1.1 Introdução

Com as crescentes oscilações no preço dos combustíveis fósseis, com o progressivo aumento na procura de energia por parte dos países emergentes, com as elevadas preocupações ambientais relacionadas com a emissão de gases, uma vez que foram defraudadas as expectativas em relação à cimeira de Copenhaga, torna-se assim imprescindível encontrar alternativas sustentáveis capazes de se oporem à previsível escassez de recursos energéticos a médio prazo.

Como alternativa aos combustíveis fósseis, a energia eólica, surge como a mais promissora. E Portugal tenta acompanhar este paradigma tanto europeu como mundial.

É na região da Beira Interior, longe dos grandes centros urbanos e aglomerados populacionais e próxima de relevos montanhosos que se pretende determinar a qualidade do potencial eólico que esta zona delimitada pelos distritos de Castelo Branco e Guarda, pode oferecer.

O objectivo passa por encorajar a produção de energia eólica em locais com boas condições de vento para assim ser possível gerar energia limpa e de forma competitiva.

Para que seja viável a implementação de parques eólicos é necessário analisar: o regime dos ventos na região pretendida; o custo de implementação dos aerogeradores e da energia produzida; os impactos ambientais e a disponibilidade de tecnologia. A caracterização do potencial eólico é tarefa fundamental e tem como requisito básico, a existência de um banco de dados, com a velocidade e direcção do vento ao longo de vários anos.

O aproveitamento do vento, como potencial de geração de energia, encontra-se intimamente dependente do conhecimento detalhado das suas características, nas zonas onde os aerogeradores serão integrados. O conhecimento preciso do regime dos ventos é um dos elementos mais importantes na especificação do projecto para aproveitamento deste tipo de energia, assim, o levantamento de dados ao longo de vários anos do comportamento do vento na dada região é essencial na aquisição e elaboração de uma base de dados, que será determinante na escolha da zona potencialmente utilizável e na especificação do sistema eólico mais apropriado bem como na determinação da localização exacta.

Em Portugal o governo aumentou as metas definidas na RCM nº63/2003, de 19 Outubro para as várias fontes de energia renovável, com o objectivo de reduzir a dependência do exterior e combater as alterações climáticas. Este objectivo passa por aumentar de 39% para 45% a produção de electricidade com base em energias renováveis [1].

Dando maior expressão à criação de riqueza com as energias renováveis, a atribuição de capacidade de injeção de potência passou a ser atribuída por concursos internacionais, visando a criação de clusters internacionais.

A potência eólica instalada no final de Dezembro de 2009 situava-se em 3 566 MW, distribuída por 195 parques, com um total de 1 879 aerogeradores ao longo de todo o território Continental. 37% da potência instalada situa-se em parques com potência igual ou inferior a 25 MW [2].

A produção, em 2009, situou-se nas 2 231 horas equivalentes por MW, com 72% da energia gerada em instalações com mais de 2 000 horas em 2009 [3].

1.2 Motivação

Tem-se registado nos últimos anos que a energia eléctrica a partir da energia eólica tem sofrido um aumento significativo. Constata-se que o grande impulso de investimento no sector eólico em Portugal iniciou-se no ano de 2001, sobretudo após as directivas internacionais iniciadas com protocolo de Kiotto. E desde esta altura, é observável o crescimento exponencial neste sector.

Para um país se tornar competitivo deve dispor de fontes abundantes de energia. A crescente necessidade de se conhecer as potencialidades energéticas assume um papel preponderante no que se refere às fontes de energia alternativas. De entre estas, a energia eólica surge como uma das mais promissoras.

O estudo incidirá em Portugal na região da Beira Interior, que comporta os distritos de Guarda e Castelo Branco. Tendo este último uma das maiores quotas de potencia instalada a nível nacional.

Esta região da Beira Interior apresenta um relevo muito montanhoso que se deve ao grande número de serras existentes e caracteriza-se também pela sua elevada altitude,

que conseqüentemente torna esta região, sobretudo na parte norte, uma das zonas mais frias do País.

A instalação de parques eólicos está invariavelmente associada aos custos económicos exigidos. No entanto estes custos totais poderão ser reduzidos com o aumento de produção, melhoramento de tecnologia, mas sobretudo com a identificação precisa de áreas que possuem bom potencial eólico.

Uma avaliação correcta do potencial eólico com vista à produção de energia eléctrica tem de basear-se em medidas de vento efectuadas especificamente para esse efeito. Isto não acontecia nos primeiros tempos; as estações meteorológicas, que forneciam os registos, não estavam normalmente localizadas nos locais mais favorecidos do ponto de vista eólico, o que conseqüentemente conduziu a uma avaliação defeituosa [4].

Com isto, neste estudo o conhecimento preciso do regime dos ventos é um dos elementos mais importantes na especificação do projecto para aproveitamento deste tipo de energia. O levantamento de dados ao longo de vários anos do comportamento do vento será essencial na aquisição e elaboração de uma base de dados, que será determinante na escolha da região potencialmente utilizável e na especificação do sistema eólico mais apropriado e na determinação da localização exacta.

Quanto ao impacto ambiental da utilização de sistemas de produção de energia eólica sobre o meio ambiente é pouco significativo. Os sistemas eólicos não causam poluição atmosférica, sendo neste campo muito superiores aos outros sistemas de energia eléctrica. Os problemas de poluição sonora também são reduzidos. O problema mais crítico, poderá residir na poluição visual, uma vez que as turbinas eólicas tendem a crescer de tamanho, atendendo a potência solicitada. No entanto pode dizer-se que não existe forma de conversão energética que interfira menos na paisagem do que a energia eólica. Além de que a área ocupada pelos aerogeradores é mínima e as actividades agrícolas podem coexistir sem grande problema.

1.3 Objectivos

Com este trabalho pretende-se caracterizar e avaliar o potencial eólico na Beira Interior dadas as condições meteorológicas e de altitude desta região.

Para isso será determinante na referida região a análise de desvios da curva de potência dos parques eólicos ao longo do tempo; análise da velocidade do vento medida nos referidos parques e identificação dos desvios relativamente a valores previstos; análise de produção de energia eléctrica em relação a parâmetros do vento, com base na rede meteorológica nacional; análise das capacidades instaladas de produção de energia eólica e respectivos potenciais e caracterização dos vários sistemas de aproveitamento de energia eólica.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em oito capítulos.

No primeiro capítulo são traçados os objectivos, a motivação e a estrutura deste trabalho.

No segundo capítulo é feito um enquadramento do sector eólico a nível internacional e nacional. Também são analisadas, de uma forma geral, as capacidades instaladas, bem como os seus recursos eólicos.

No terceiro capítulo é abordada a região da Beira Interior, com uma breve descrição da localização, relevo e clima. São caracterizados os parques eólicos instalados na região e os impactes a nível ambiental e na rede eléctrica.

No quarto capítulo é descrito o comportamento do vento, e as suas condicionantes. Refere-se o método de avaliação do potencial eólico de determinado local. E é igualmente analisada a recolha de medições do vento e o procedimento do tratamento destes dados.

No quinto capítulo apresenta-se a tecnologia associada ao sistema eólico, com especial relevo para o aerogerador E-82 da Enercon.

No sexto capítulo são abordados os impactes ambientais e socioeconómicos inerentes à instalação de parques eólicos.

No sétimo capítulo são discutidos os resultados obtidos para os dois distritos da Beira Interior, com destaque para o parque eólico da Gardunha e do Vergão.

No oitavo e último capítulo são descritas as conclusões deste trabalho, que se extraíram da investigação desenvolvida.

CAPÍTULO

2

Estado Actual

Situação Internacional

Situação Nacional

2.1 Situação Internacional

A nível internacional, a energia eólica tem tido um crescimento exponencial nos últimos 10 anos, e a tendência é de continuar a evoluir nesse sentido, como é observado na figura seguinte (figura 2.1)

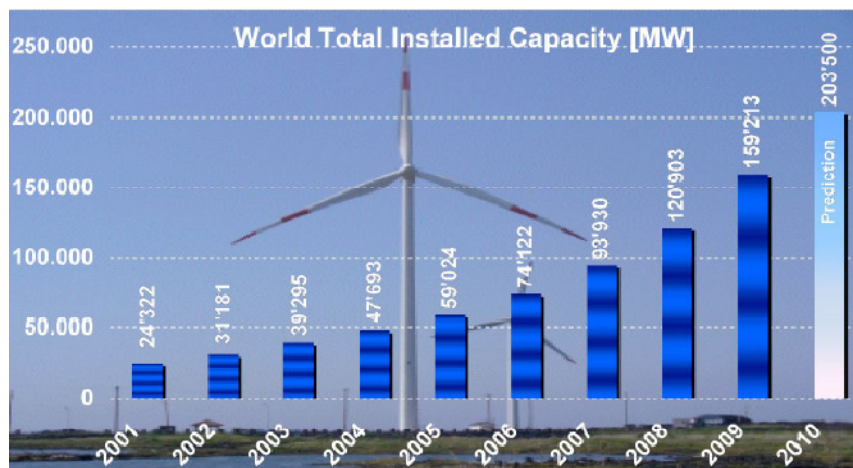


Figura 2.1 - Representa o crescimento da energia eólica nos últimos 10 anos, com as capacidades totais instaladas em MW, no final de cada ano [2].

A situação internacional no sector eólico no final de 2008 é observada na figura do Anexo A, onde se analisa a capacidade total instalada e adicionada neste mesmo ano, bem como a energia eólica produzida (TWh) e a percentagem equivalente de energia eléctrica de origem eólica. No final de 2008, os Estados Unidos, lideravam na instalação de energia eólica com 25170 MW, seguidos pela Alemanha (23903MW). Porém a Alemanha apresentava maior % de energia eléctrica através da energia eólica (6,5%) em relação aos estados Unidos (1,9%) [2].

2.1.1 Europa

O continente europeu destaca-se na produção de energia eólica, concentrando-se sobretudo em dois países, Alemanha e Espanha, que juntos possuem 44926 MW dos 76218 MW instalados em todo o continente, até ao final de 2009 (Anexo B). Porém a Europa surge pela primeira vez, no final de 2009, com menos de metade da capacidade total de energia eólica instalada em todo o Mundo, com 47,9%.

No seu conjunto a Europa no ano de 2009 instalou 10474 MW (Anexo B), um aumento significativo quando comparado com o ano anterior em que tinham sido adicionados 8928 MW de potência eólica.

A Alemanha que perdeu a condição de líder mundial para os Estados Unidos, no final de 2008 na produção de energia eólica, continua na vanguarda a nível europeu. Isto deve-se em grande parte ao forte apoio das autoridades federais e regionais alemãs, aliado a uma lei aprovada em 1991, que garantia aos produtores de energia renovável grandes incentivos financeiros[5].

Quanto à Espanha, esta ocupa o segundo lugar a nível europeu com mais potência eólica acumulada 19149 MW, porém sendo o país europeu onde o crescimento foi mais significativo, 2460 MW. Este desempenho deve-se ao apoio continuado de todos os governos das comunidades autónomas, através de uma legislação favorável (como é o caso da lei 82/80 ou a lei 54/97 da conservação da energia e do sector eléctrico respectivamente) [6], a forte indústria nacional de aerogeradores (como a Gamesa e a Ecotecnia) e o interesse exercido sobre os grandes investidores com igual capacidade financeira.

No caso do Reino Unido com base nos atlas eólicos existentes, é possível constatar que se trata do país presente no continente que possivelmente possui maior potencial para gerar energia a partir do vento. No final de 2009 acumulou 4092 MW de potência instalada, dos quais 897 MW foram adicionados nesse mesmo ano (Anexo B). É ainda de salientar, que o Reino Unido domina o ranking mundial, na instalação de parques eólicos no mar, (offshore) contando com 688 MW instalados em 2009 [2]. No que respeita à capacidade eólica offshore, a Dinamarca surge logo de seguida, com 663 MW, tendo sido o país que mais cresceu nesta tecnologia com 55,6%, fazendo forte concorrência ao Reino Unido (Anexo B).

A Dinamarca com 5,5 milhões de habitantes detinha no final de 2009 uma capacidade total instalada de 3497 MW, capaz de proporcionar em média por ano 20% do consumo eléctrico dinamarquês [7]. Em parte este sucesso reside na indústria dinamarquesa de aerogeradores que vem dominado o mercado mundial desde os anos 80.

A Europa tem vindo também a assistir a um desenvolvimento progressivo por parte dos países de leste como é o caso da Estónia (com 81,8% de crescimento no ano de 2009), Lituânia (68%), Hungria (58,3%) e Polónia (41,1%) (Anexo B).

Quanto ao mercado das turbinas eólicas é dominado pela Espanha, Alemanha e Dinamarca, apesar de começarem a surgir novos concorrentes do continente asiático e americano capazes de se imporem nesta indústria.

No domínio dos parques eólicos offshore a Europa continua a dominar, onde 99% podem ser encontrados neste continente e com boas perspectivas futuras, sobretudo para países junto ao Mar do Norte [2].

2.1.2 África

Apesar de não existir informação suficientemente detalhada ao nível dos recursos eólicos em grande parte do território, nos últimos anos, certas zonas foram alvo de intensas avaliações, apresentando um elevado potencial. Destaca-se o norte de Marrocos, Mar Vermelho e Sul de África. Ainda assim o continente apresenta uma rede eléctrica ainda bastante deficiente, o que dificulta a entrega da energia gerada de forma distribuída. Os países do norte de África mostram especial interesse na promoção da energia eólica. O Egipto é líder na produção deste tipo de energia no continente africano (430 MW) seguido de Marrocos (253 MW) (Anexo B).

2.1.3 América

O continente americano no final de 2009 tinha um total de 39884 MW de potência acumulada, dos quais 35159 MW pertencem aos Estados Unidos, que continuam a ser líderes Mundiais. Este país só no ano de 2009 instalou 9922 MW (Anexo B), valor apenas superado pela China. Ainda assim o mercado Canadano mostra-se bastante activo e países como o Brasil e México geram bastante expectativa.

Os estados Unidos bem como o Canadá dispõem de grandes recursos eólicos. O Canadá começou a dar-se conta do seu potencial eólico e terminou o ano de 2009 com

3319 MW acumulados. A *Canadian Wind Energy Association* prevê um acréscimo de 12000 MW até 2016 [I1].

O Brasil e o México apesar de não se encontrarem entre os países com maior aproveitamento de energia do vento, a eles, se associa o crescimento de 113,3% na América Latina, alcançando assim uma capacidade total de 1406 MW. Após alguns anos menos produtivos, o Brasil ao abrigo do programa governamental o PROINFA¹ aumentou o seu potencial de energia eólica (77,3%) [I2].

O México pretende combater a dependência dos combustíveis fósseis e para isso segundo a IRENA² deseja em 2012 atingir a quota de 26% de fornecimento eléctrico por fontes renováveis, pela intensificação da produção de energia eólica [I3].

Existe grande expectativa à volta dos dois referidos países, bem como do Chile para a instalação de grandes parques eólicos em 2010.

2.1.4 Ásia

No caso do continente asiático em 2009 acumulou um total de 39.961 MW de potência. Nesse mesmo ano foram instalados mais MW que no continente americano, incremento este que está directamente associado aos grandes mercados da China e Índia. Estes dois países estão entre os cinco maiores instaladores de potência eólica no Mundo, dispendo de 23,1%.

A China, o gigante asiático, ocupa a posição de vice líder mundial, com 26 GW instalados. Em 2009 foi registado um crescimento de 13800 MW adicionados, valor este que equivale à potência total acumulada por Itália (4850 MW), França (4521 MW) e Reino Unido (4092 MW) até final deste mesmo ano (Anexo B)! Este facto fica a dever-se à aprovação por parte do governo de uma tarifa, que garante uma

¹ O PROGRAMA DE INCENTIVO ÀS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA ELÉCTRICA (PROINFA), TEM O OBJECTIVO DE PROMOVER A DIVERSIFICAÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA [I2].

² A AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (IRENA), TEM O OBJECTIVO DE PROMOVER E DESENVOLVER O CRESCIMENTO DA ENERGIA RENOVÁVEL [I3].

renumeração fixa ao longo da produção deste tipo de energia, aliada ao facto da China possuir um bom potencial eólico.

De entre os países em vias de desenvolvimento, a Índia foi pioneira no aproveitamento deste recurso, apesar de um arranque tímido e com equipamento desadequado. Nos últimos anos voltou a surgir mas de forma ordenada, possibilitando um crescimento mais sustentável, que lhe garante o segundo lugar no mercado asiático. Sulzon é o fabricante indiano de aerogeradores, que tem alargado a sua expansão internacional, através da aquisição de algumas fábricas. Outros mercados de menor projecção acompanham este crescente asiático como o Japão (2.056 MW), Taiwan (463 MW) e Coreia do Sul (364 MW) (Anexo B).

2.1.5 Oceânia

Austrália e Nova Zelândia adicionaram respectivamente 383 e 172 MW de potência eólica em 2009, único acréscimo registado nesse ano na Oceânia. Estes Países, em conjunto com os Arquipélagos do Pacífico possuem 2388 MW instalados (Anexo B). Por agora, a implementação de aerogeradores é modesta e apesar de a Austrália apresentar recursos eólicos potenciais, faltam infra-estruturas eléctricas capazes de interligar o vasto território [2]. Com o crescimento que temos vindo a assistir, a WWEA tem grandes expectativas em relação ao futuro e anseia alcançar os 1900000 MW de potência eólica instalada em todo o Mundo até ao final de 2020.

Salienta-se o papel preponderante que a IRENA, organização internacional de energia renovável passou a ter desde Janeiro de 2009 (data da fundação), ao contribuir para melhorar a segurança energética, a redução da emissão de gases com efeito de estufa, bem como atenuar as alterações climáticas [8].

2.2 Situação Nacional

Em Portugal existe desde há muito uma grande tradição no aproveitamento do vento (para fins como a moagem de cereais e bombagem de água). As primeiras instalações

de turbinas eólicas foram construídas nas Regiões Autónomas dos Açores e Madeira, num total de 7 MW. O primeiro parque com tecnologia deste género no Continente surgiu em 1992, em Sines, constituído por 12 máquinas de 150 KW, permitindo assim totalizar uma potência de 1,8 MW. Somente em 1996 surge um novo parque e a partir de 1998, o sector tem vindo a ganhar preponderância no panorama nacional [9].

A energia eólica em Portugal teve nos últimos anos um crescimento extremamente acentuado. Este desenvolvimento tem como objectivo principal reduzir a dependência externa dos combustíveis fósseis e a consequente mitigação das emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa.

O esforço das entidades governamentais tem sido meritório ao longo dos anos, inicialmente com o arranque do programa E4 - Programa de Eficiência Energética e Energia Endógenas (decreto de lei n.º154/01 de 27 de Setembro), que visa legislar na definição de novos tarifários para a produção de energia eléctrica por fontes de energia renovável, semelhantes aos aplicados na Europa [10]; bem como o MAPE - Medida de Apoio ao Aproveitamento do Potencial Energético e Racionalização - aprovado à luz do Programa Operacional da Economia (POE) pela portaria regulamentadora 383/02, de 10 de Abril, que ambiciona atrair investidores nas energias renováveis com financiamentos e incentivos fiscais. Mais tarde a 23 de Agosto de 2006, pela Resolução do Conselho de Ministros n.º104/06, surge o PNAC - Programa Nacional para as Alterações Climáticas - visando promover a produção de electricidade isenta de emissões nefastas. Estas medidas contribuíram para a criação de uma maior competitividade na produção destas energias e tem estimulado o sector eléctrico português [1].

Mais recentemente na Resolução do Conselho de Ministros n.º1/2008 foram delineados novos objectivos que passam pelo reforço do sector eólico, tais como, o aumento em 1950 MW da capacidade instalada até 2012, correspondendo a um total acumulado de 5100 MW (dos quais 600 MW serão por “upgrade”) e a promoção simultânea na criação de um “cluster” tecnológico impulsionando a instalação de parques eólicos [11].

O desenvolvimento destas estratégias permite a Portugal tornar-se numa referência no âmbito do sector eólico. Em 2007, Portugal chegou mesmo a ser o terceiro país da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis (tabela C1 do Anexo C).

No final de Dezembro de 2009, Portugal tinha 9055 MW de capacidade instalada para produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis (hídrica, eólica, solar, fotovoltaica...). Segundo o relatório da Direcção Geral de Energia e Geologia, a produção de energia eléctrica de origem renovável está concentrada no Norte, sobretudo nos distritos de Viana do Castelo, Bragança, Viseu, Coimbra, Vila Real, Braga e Castelo Branco, (tabela C2 do Anexo C). Excluindo a grande hídrica, Viseu, Coimbra, Castelo Branco, Viana do Castelo, Vila Real, Lisboa, Guarda, Leiria, Braga e Porto são os principais distritos, no que diz respeito à potência instalada, correspondendo a potência destes dez distritos a 82% do total, em Dezembro de 2009, (tabela C3 do Anexo C).

Na figura 2.2 é possível constatar que a produção de energia eléctrica a partir de fontes renováveis, entre 2001 e 2009 tem aumentado.

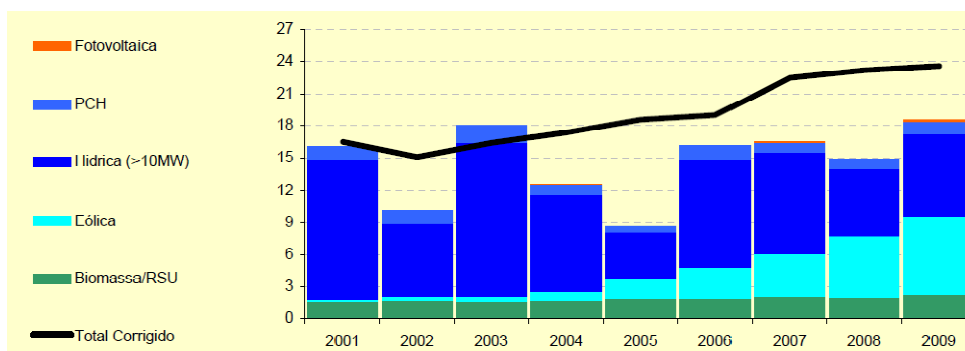


Figura 2.2 – Evolução da energia produzida a partir de fontes renováveis (TWh) [3]

Esta situação deve-se sobretudo às fontes de energia eólica e grande hídrica. É de salientar o protagonismo que a energia eólica tem vindo a ganhar nestes 8 anos, alcançando em 2009, 7.440 GWh valores próximos dos valores da grande hídrica (7547 GWh) (tabela C4 do Anexo C).

A potência eólica instalada no final do ano de 2009 situava-se nos 3566 MW, com 673 MW adicionados ao longo desse ano, a que correspondem 23,5% de crescimento relativamente a 2008[2]. Em Dezembro de 2009 a produo foi 52% superior à verificada no mês homólogo do ano anterior (figura 2.3). Saliente-se o facto de os meses de Novembro, Dezembro, Janeiro e Março serem em geral meses ricos na produo de energia eólica em Portugal.

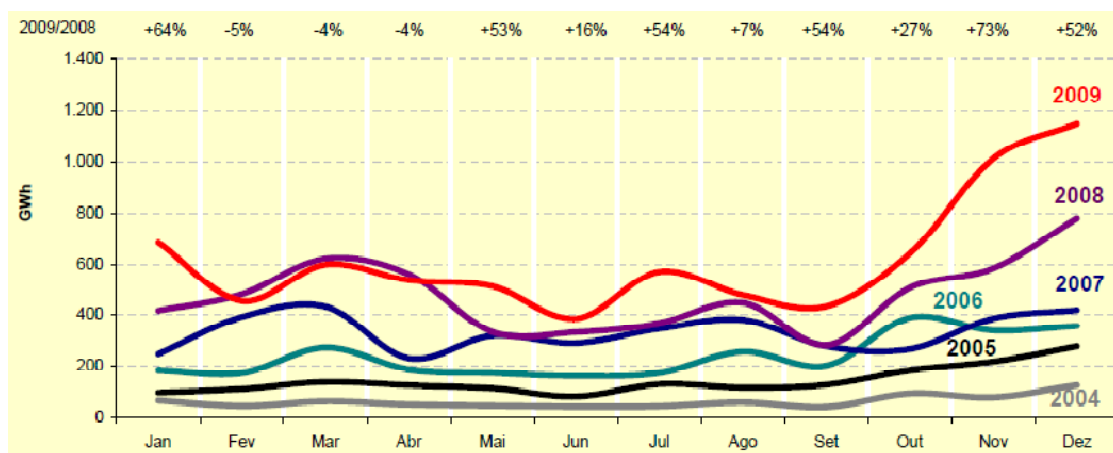


Figura 2.3 – Evoluo mensal da produo de energia eólica em Portugal Continental. Os valores que se encontram em %, correspondem à variao relativamente ao mês homólogo do ano anterior [3].

A referida potência encontra-se distribuída por 195 parques, contando com um total de 1879 aerogeradores ao longo de todo o território Continental (tabela C5 do Anexo C). Segundo o relatório da WWEA 15% da energia eléctrica produzida em Portugal  proveniente de energia eólica, sendo apenas ultrapassado pela líder Dinamarca que conta com 20% [2].

37% desta potência instalada situa-se em parques com potência igual ou inferior a 25 MW (tabela C6 do Anexo C).  observável com base na tabela C6 do Anexo C, que desde 2006 a tendência  de instalar parques eólicos com potências bem superiores, ou seja, aumentar a potência dos já existentes ou criando outros com potências superiores a 25 MW. Em 2006, os parques com potências eólicas similares, eram de apenas 46%.

A produo de energia eléctrica a partir do vento, em 2009, situou-se nas 2 231 horas equivalentes por ano, com grande parte da energia gerada em instalaoes com mais de 2 000 horas (72%) (tabelas C7 e C8 do Anexo C).

Os distritos com maior potência instalada, em Dezembro de 2009, são Viseu, Castelo Branco, Coimbra, Viana do Castelo, Lisboa, Vila Real, Leiria, Santarém, Braga e Guarda. Os distritos com maior produção em horas de vento, em 2009, foram Santarém, Guarda, Lisboa, Aveiro, Bragança, Faro Coimbra, Vila Real e Castelo Branco (tabela C9 do Anexo C).

Até Dezembro de 2009, foram licenciados 4 242 MW de potência eólica. Este valor é semelhante ao atribuído, à grande hídrica (4513 MW) que estagnou em 2007, ao contrário da eólica que tem vindo a aumentar desde 2007 (tabela C10 do Anexo C).

A potência licenciada renovável está concentrada no norte do país, essencialmente devido à localização das grandes hídricas e de um número significativo de parques eólicos. Os distritos de Lisboa, Leiria, Faro, Castelo Branco e Viseu apresentam uma forte componente eólica, superior a 50% da potência renovável desses distritos como é observado na tabela C11 do Anexo C. O caso de Castelo Branco para um total de 694MW de potência renovável tem 478 MW de origem eólica (69%), enquanto o distrito da Guarda possui 142 MW de potência instalada em parques eólicos num total de 457 MW (31%). Dois casos no interior do país que diferem na sua dependência da energia eólica.

Síntese

Foram abordados, nos cinco continentes, as capacidades instaladas e potencialidades de energia eólica, bem como as medidas de incentivo por parte dos respectivos governos. Destaque para os Estados Unidos, China e Alemanha que lideram a nível Mundial na instalação de parques eólicos.

No panorama nacional o sector eólico continua o seu crescimento exponencial, e as perspectivas futuras são bastante animadoras, que se devem em parte aos programas de incentivo das entidades governamentais. O distrito de Castelo Branco é o 2º distrito com maior potência eólica instalada em território nacional.

CAPÍTULO

3

A Beira Interior

Noções Gerais

Caracterização do Relevo e Clima

A distribuição da Rede Eléctrica

Restrições Ambientais

Levantamento dos Parques Eólicos na Beira Interior

3.1 Noções gerais

A região da Beira Interior integra dois distritos, o distrito de Castelo Branco e da Guarda. O distrito da Guarda tem uma população de aproximadamente 174 mil habitantes e uma área de 5536 km². Abrange 14 concelhos, e faz fronteira a sul, com o distrito de castelo Branco [12]. Tendo como capital a própria cidade da Guarda, esta cidade é a mais alta de Portugal, a 1056 metros de altitude [13]

Por seu lado, o distrito de Castelo Branco possui uma população de sensivelmente 209 mil habitantes, abrangendo uma área de 6627 km², com 11 concelhos [12]. A sede de distrito é a própria cidade de castelo Branco.

Estes dois distritos compõem a região da Beira Interior, por vezes também dividida em Beira Alta (distrito da Guarda) e Beira Baixa (distrito de Castelo Branco). Esta região situa-se no centro do País, entre o Rio Douro a norte e o Rio Tejo a sul, fazendo fronteira a este com Espanha [14].

Como muitas regiões do interior de Portugal Continental, esta também se caracteriza por uma densidade populacional média baixa, situação que se tem vindo a acentuar nos últimos anos. Esta região tem uma actividade agrícola importante, mas tem muitos terrenos incultos, como se pode observar no Anexo D

3.2 Caracterização do relevo e do clima

O declive do terreno tem uma influência que não deve ser desprezável no aproveitamento do potencial eólico, quer do ponto de vista da instalação dos aerogeradores no terreno, sobretudo com a actual tendência para a instalação de máquinas de grandes dimensões, o que torna muito difícil o seu transporte para zonas com dificuldades acrescidas nos acessos.

A Beira Interior apresenta um relevo bastante acidentado e montanhoso (figura3.1), destacando-se os contrafortes meridionais das Serras da estrela e Lousã, bem como a

Serra da Gardunha, sendo esta última separada da Serra da Estrela por uma longa e larga zona, denominada de “Cova da Beira”, que é atravessada pelo rio Zêzere [15].

No caso da Serra da Estrela, esta integra a Cordilheira Central Ibérica, constituindo o sector mais oriental e elevado do alinhamento montanhoso de direcção SW-NE existente entre a Guarda e a Serra da Lousã ao longo de cerca de 15 km, com uma largura média de 25 km [16]. Apresenta uma altitude máxima de 1993 metros, constituído o ponto mais alto de Portugal continental (figura 3.1).

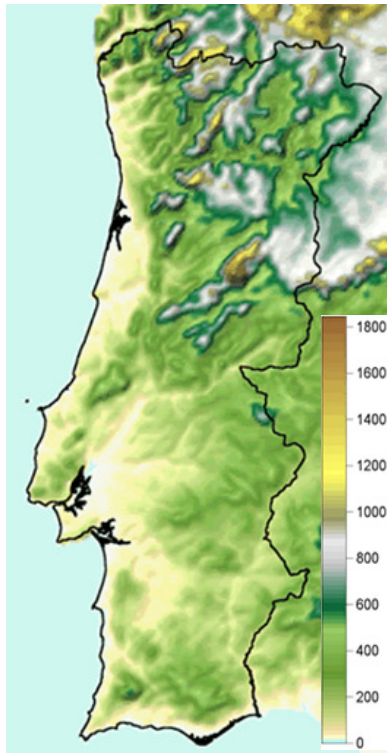


Figura 3.1: Mapa de altitude, de Portugal Continental (m), apresentando um relevo bastante montanhoso no interior do País [14].

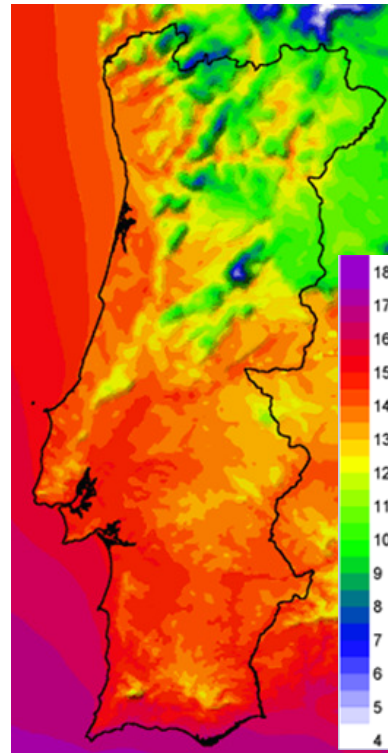


Figura 3.2: Distribuição da temperatura (°C) média anual para Portugal Continental, com temperaturas mais elevadas no litoral e sul do País [17].

O relevo desta zona da Serra da Estrela consta, fundamentalmente de dois planaltos, de orientação NNE-SSW: do lado ocidental, com o planalto da Torre-Penhas Douradas (150-1993 metros), do lado oposto, com o planalto do Alto da Pedrice-Curral do Vento (1450-1761 metros) [15].

O clima no distrito de Castelo Branco é temperado e apresenta pouca humidade ao longo do ano. A temperatura média do ar é de 15,6 °C, atingindo o seu mínimo em Janeiro (com temperaturas próximas dos 5 °C) e o seu máximo em Julho (onde a temperatura se situa, em média, na casa dos 31 °C). A precipitação média anual é de 827,3 mm. O clima da região Sul da Beira Interior apresenta Verões muito quentes e Invernos suaves; ao contrário da situação que ocorre na região Norte [18].

O clima mediterrânico está presente por toda a Beira Interior, exemplo disso é a sul da Serra da Estrela, que possui temperaturas elevadas no verão e invernos frescos, onde os verões são secos e os invernos mais húmidos. A norte da Serra da Estrela, encontra-se um clima, mais húmido e com temperaturas médias mais baixas, sobretudo nas zonas altas, enquanto que, nas zonas baixas, registam-se valores mais elevados, com média anual de 16,4°C, na figura 3.2 é apresentado o mapa com a temperatura média anual ambiente [12]. Nesta figura observa-se, na região da Beira Interior, uma mancha azul que representa uma média de temperaturas, bastante baixa, em relação ao resto do País.

Localizado no distrito da Guarda, o local considerado mais frio do país é sem dúvida a Serra da Estrela, que apresenta uma temperatura média anual de 7°C nas partes mais elevadas e inferior a 4°C, no topo da Serra (a Torre), situado no município de Seia. A Serra da Estrela, caracteriza-se também pela ocorrência regular de nevões e temperaturas inferiores a -10°C, (comum em altitudes superiores a 1000 metros).

A estação húmida vai de Outubro a Maio, com precipitação média anual superior a 2000 mm na maior parte da área dos planaltos. A precipitação parece ser fundamentalmente condicionada pela altitude e orientação da serra em relação aos fluxos dominantes das massas de ar, como representados na figura 3.3 e 3.4. A zona ocidental do maciço apresenta maior número de dias com precipitação do que a zona oriental (mas um valor médio anual ligeiramente inferior)

Verifica-se que a temperatura média mensal medida nas estações meteorológicas das Penhas Douradas, Lagoa Comprida e Penhas da Saúde revelam que a Serra da Estrela é caracterizada por um regime térmico simples, sendo o mês mais quente Julho e o

mais frio Janeiro. A temperatura média anual é inferior a 7°C na maior parte da área dos planaltos, sendo no alto da Torre, inferior a 4°C [18].

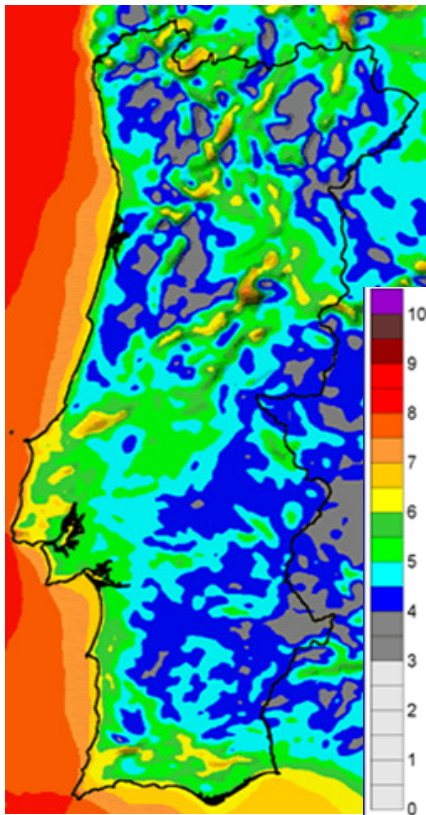


Figura 3.3: Mapa da velocidade média do vento (m/s), a 80 metros do solo, para Portugal continental, atingindo maiores velocidade, no interior, litoral e sul do País [17].

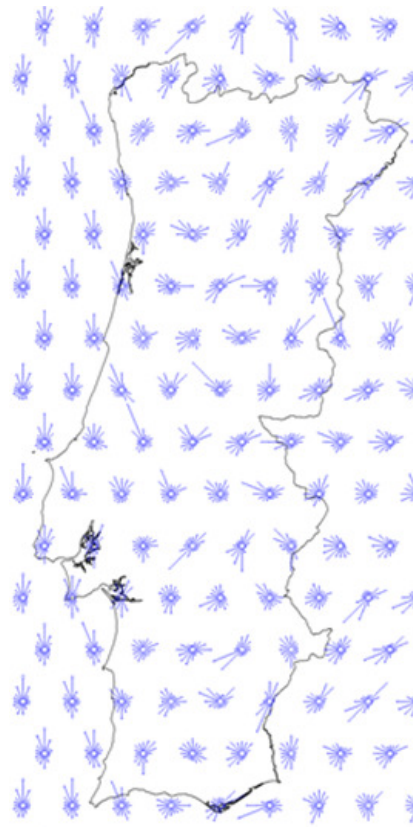


Figura 3.4: Histograma da direcção do vento a 80 metros de altura, para Portugal Continental [17].

3.3 A distribuição da rede eléctrica

A distribuição das linhas de transmissão de electricidade é um factor que deve ser levado em conta, devido à necessidade do escoamento da energia eléctrica produzida pelos parques eólicos. A elevada densidade populacional, nas regiões litorais, e respectivo sector industrial levou a uma proporcional concentração das linhas eléctricas, responsáveis pela distribuição da electricidade. Com isto, as regiões do

interior do País, mais desertificadas a todos os níveis, apresentam uma desigualdade na distribuição das linhas de transmissão de electricidade (Anexo E).

Estando as áreas com maior potencial eólico nas regiões do interior do País, leva a que esta limitação das linhas de transmissão, obriguem à construção de linhas de grande extensão, bem como os custos associados para ligar a rede preexistente às subestações dos parques eólicos[4]. Estes custos são ainda suportados na sua grande maioria pelos promotores, no entanto, dado o elevado custo pode colocar em causa muitos projectos. [19].

3.4 Restrições Ambientais

Há que ter em conta que há terrenos classificados como reserva ecológica nacional (REN), para a instalação dos parques eólicos, assim aos promotores dos parques eólicos, é geralmente exigido um estudo de acerca dos impactos ambientais a incluir na fase de projecto e licenciamento dos mesmos. Estas restrições ambientais encontram-se no mapa do Anexo F.

A região da beira Interior possui algumas zonas como parques naturais onde não é autorizado a instalação de parques eólicos, ou seja, apenas as áreas Porém, há que ter precauções acrescidas quando se pretende instalar um parque eólico numa zona com espécies protegidas ou com passagem de aves migratórias, sobretudo, durante a fase de instalação das máquinas [20]. Este tema será desenvolvido mais detalhadamente adiante, neste trabalho.

3.5 Levantamento dos Parques eólicos na Beira Interior

Foi feito o levantamento dos parques eólicos localizados no distrito da Guarda e Castelo Branco. Determinou-se a sua localização, o número de turbinas eólicas instaladas, com a respectiva potência unitária, fabricante e modelo, e também o ano em que o parque foi ligado à rede.

Tabela 3.1: Caracterização dos parques eólicos, quanto à potência instalada (MW), localizados no distrito da Guarda

Distrito	Nome do Parque	Concelho	Potência Total [MW]	Nº Turbinas Eólicas	Potência Nominal [MW]
Guarda	Dirão de rua	Sabugal	2,6	1	2,0
				1	0,6
	Guarda	Guarda	8,0	4	2,0
	Mosqueiros		8,0	4	2,0
	Mosqueiros II		20,0	10	2,0
	Mosteiro	Aguiar da Beira	9,1	7	1,3
	Penamacor 2	Penamacor	14,7	7	2,1
	Penamacor 3B		39,9	19	2,1
	Sabugal	Sabugal	25,2	12	2,1
	Serra Alta		2,0	1	2,0
	Terreiro das bruxas		1,0	1	1,0
	Videmonte	Celorico da Beira	32	16	2,0
	TOTAL			162,5	

Tabela 3.2: Caracterização dos aerogeradores instalados nos parques eólicos localizados no distrito da Guarda

Distrito	Nome do Parque	Fabricante	Modelo	Ligação à rede	
Guarda	Dirão de rua	Enercon	E66/20.7	2004	
			E40/6.44		
	Guarda		E-82	2007/08	
	Mosqueiros		E-83	2008	
	Mosqueiros II		E-84	2009	
	Mosteiro		Bonus	1.3	2004
	Penamacor 2		Sulzon	S-88	2007
	Penamacor 3B			S-89	2007/08
	Sabugal			S-90	2009
	Serra Alta		RE Power	MM92 EVO	2009
	Terreiro das bruxas		Win WinD	WWD 1	2006
	Videmonte		Gamesa	G87	2006

Actualmente, no distrito da Guarda existem 23 centrais eléctricas (como hídricas e térmicas de biogás) em funcionamento. Um quinto da potência instalada na região é assegurado por parques eólicos (162,5 MW).

Contribuem com mais de metade da potência instalada, os parques eólicos de Videmonte e de Penamacor, como observado na tabela 3.1. Na tabela 3.2 estão representados os respectivos fabricantes e modelo dos aerogeradores, bem como o ano de ligação do parque à rede

Tabela 3.3: Caracterização dos parques eólicos quanto à potência instalada (MW), localizados no distrito da Castelo Branco.

Distrito	Nome do Parque	Concelho	Potência Total [MW]	Nº Turbinas Eólicas	Potência Nominal [MW]
Castelo Branco	Alto Arganil	Castelo Branco	10	5	2,0
	Alvoaça	Seia	20	10	2,0
	Bravo	Sertã	16	8	2,0
	Cabeço da Rainha	Oleiros	22,2	17	0,6
		Proença-a-Nova		3	2,0
		Sertã		3	2,0
	Cabeço da Rainha	Castelo Branco	31,2	4	2,3
				11	2,0
	Chiqueiro	Pampilhosa da Serra	4	2	2,0
	Gardunha	Fundão	114	2	2,0
		Castelo Branco		55	2,0
	Mougueiras	Pampilhosa da Serra	8,0	4	2,0
	Pedras Lavradas	Covilhã/Seia	16,1	7	2,3
	Penamacor 1	Penamacor	20	10	2,0
	Penamacor 3A	Penamacor	20	10	2,0
	Perdigão	V. Velha Rodão	2	1	2,0
	Pinhal Interior I	Oleiros	54	18	3,0
Pinhal Interior II	Castelo Branco/Oleiros	90	13	2,0	
	V. Velha Rodão		32	2,0	
Vergão	Proença-a-Nova	13	10	1,3	
TOTAL			432,5		

No distrito de Castelo Branco existem 24 centrais eléctricas (como hídricas, térmicas de biogás, de biomassa e de cogeração) em funcionamento, das quais dois terços da potência instalada neste distrito são de origem eólica (432,5 MW).

Tabela 3.4 Caracterização dos aerogeradores instalados nos parques eólicos localizados no distrito de Castelo Branco

Distrito	Nome do Parque	Fabricante	Modelo	Ligação à rede
Castelo Branco	Alto Arganil	Enercon	E-82	2009
	Alvoaça		E-70	2007
	Bravo		E-82	2009
	Cabeço da Rainha		E40/6.44	2000
			E66/20.7	2003
			E-82	2009
	Cabeço da Rainha II		E-70 E4	2008
			E-82	2008/09
	Chiqueiro	Vestas	V80	2007
	Gardunha	Enercon	E-70 E4	2007/08
			E-82	
	Mogueiras		E-70 E4	2007
	Pedras Lavradas		G83	2006
	Penamacor 1	Gamesa	G83	2006
	Penamacor 3A			
	Perdigão	Enercon	E-82	2007
	Pinhal Interior I	Vestas	V90	2006
	Pinhal Interior II	Enercon	E-82	2007
			E-70 E4	2005/06
Vergão	Nordex	N62	2003	

Saliente-se o contributo significativo para este valor dos grandes parques eólicos do Pinhal Interior, e da Gardunha, assim representado na tabela 3.3. A tabela 3.4 representa os fabricantes e modelos das turbinas eólicas instaladas nos parques, bem como o ano em que este passou a gerar energia eléctrica.

Síntese

A Beira Interior apresenta um relevo bastante montanhoso, de elevada altitude e um clima mediterrâneo. Apresenta ainda uma densidade populacional bastante baixa, com predominância na actividade agrícola

Segundo o INETI, as velocidades médias do vento nesta região, são bastante boas quando comparadas com o resto do País, o que tem levado desde 2003 à instalação de parques eólicos, com potências instaladas cada vez maiores.

CAPÍTULO

4

Fundamentos Teóricos da Energia
Eólica

Caracterização dos Ventos

Factores de Influência no Regime dos Ventos

Potencial de Energia Eólica

Seleção do local para um Parque Eólico

Medições do Vento

Parâmetros Estatísticos

4.1 Caracterização dos ventos

A energia eléctrica produzida com base no vento, denominada de energia eólica, provem de uma energia de origem solar. Isto deve-se ao facto de a radiação solar ao atingir a superfície terrestre de forma irregular criar zonas diferentes de densidade, pressão e temperatura. O vento resulta de deslocamentos de massas de ar entre estas zonas atrás referidas, caracterizando-se pelas componentes velocidade e direcção[21].

Nas regiões junto à costa, durante o dia, a superfície terrestre sofre um aquecimento superior em relação ao mar, obrigando o ar a ascender, devido à sua expansão e menor valor de densidade. Esta zona próxima do continente é preenchida com o ar que vem da zona marítima a temperatura mais baixa, fenómeno este que é denominado de brisa marítima. No período nocturno, o vento sopra em sentido inverso, onde se verifica o deslocamento de ar à superfície do continente para o mar, dando origem a brisas terrestres, caracterizadas de menores velocidades quando comparadas com as brisas marinhas. Este efeito deve-se ao facto de existir menor diferença de temperatura entre a terra e o mar durante a noite [22]. As fases de menos vento ocorrem quando as temperaturas da superfície terrestre e marítima são semelhantes.

No caso dos ventos de regiões montanhosas, o processo é análogo, pois tal como descrito anteriormente, nas brisas marítimas e terrestres, o ar desloca-se junto ao solo e ascende por determinado período temporal, retornando e descendo de novo.

Durante o período diurno (período característico de maior insolação) as zonas montanhosas com maior exposição são aquecidas com maior grau de intensidade em relação aos vales (figura 4.1). O ar quente é obrigado a subir pelas encostas, originando os ventos de vale (figura 4.2). No período da noite ocorre novamente o processo inverso, os planaltos arrefecem mais rapidamente, devido às perdas por radiação terrestre. Surgem assim os ventos de montanha, em que o ar frio se desloca encosta abaixo até atingir os vales.



Figura 4.1: Ventos de vale [22].

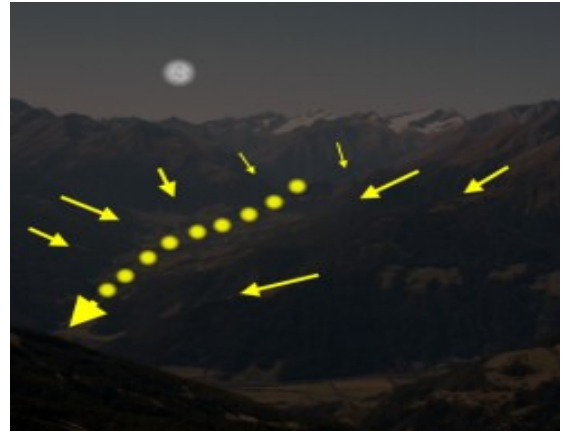


Figura 4.2: Ventos de montanha [22].

O facto das encostas mais inclinadas e as zonas mais estreitas dos vales serem aquecidas pelo sol mais intensamente, em relação às amplas superfícies dos vales ou os picos, contribui para a formação dos ventos de vale e montanha.

4.2 Factores de influência no regime dos ventos

A velocidade do vento é determinante na produção de energia eólica. A energia produzida varia com o cubo da velocidade do vento, ou seja, a potência extraída é deveras sensível à velocidade, factor este que quando regista uma aumento de 10%, induz um incremento de 33% na energia disponível [9].

Para que a produção de electricidade a partir do movimento do ar, seja uma realidade com sucesso tanto do ponto de vista técnico como económico, há factores de interferência na velocidade do vento que devem ser analisados e levados em conta tais como: a altura; a rugosidade do terreno; os obstáculos; a altitude; a orografia e o efeito de esteira.

As informações acerca destes factores de influência podem ser fornecidas a partir de mapas analógicos ou digitais ou por imagens satélite, bem como visitas ao local para avaliar a rugosidade e os obstáculos inerentes.

4.2.1 A Altura

Os dados da velocidade do vento geralmente são acompanhados da referência de altura à qual ocorre a medição. Normalmente, as medições são obtidas a uma altura de 10, 60 ou 80 m, porém é objectivo primordial, que este tipo de medições seja efectuado junto do rotor das turbinas a instalar [17].

Existem dois métodos de aproximação para analisar a velocidade do vento de acordo com a altura: a Lei da Potência comum na América do Norte e a Lei Logarítmica mais usual na Europa. A Lei da Potência é o método mais simples e resulta de estudos da camada limite sobre uma placa plana. Este método apesar da sua fácil utilização os resultados não possuem a precisão adequada [23].

A Lei da Potência é expressa da seguinte forma:

$$v(z) = v(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (4.1)$$

A tabela 4.1 apresenta alguns valores do factor α para diferentes tipos de superfície, factor este que está associado à rugosidade da superfície.

Tabela 4.1: Valores de α para diferentes tipos de superfície [21]

Descrição do terreno	Factor α
Superfície lisa, lago ou oceano	0,10
Gramma Baixa	0,14
Vegetação rasteira (até 0,3 m), árvores ocasionais	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,20
Árvores, construções ocasionais	0,22 a 0,24
Áreas residenciais	0,28 a 0,40

A Lei Logarítmica exprime um modelo mais complexo, que considera um escoamento atmosférico altamente turbulento.

O modelo logarítmico utiliza o conceito do comprimento da rugosidade local, z_0 , onde é considerado que a superfície da Terra nunca se apresenta perfeitamente lisa [24].

O método referido é bastante utilizado para estimar a velocidade do vento numa determinada altura com base em duas expressões de perfil logarítmico, uma para a altura desejada z e uma outra para a altura de referência, z_r .

A lei Logarítmica, é expressa pela equação:

$$v(z) = v(z_r) \cdot \left(\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}} \right) \quad (4.2)$$

O parâmetro z_0 é definido por uma escala de comprimento utilizada para caracterizar a rugosidade do terreno. É de referir que o comprimento de rugosidade z_0 , deve ser levado em conta como um parâmetro temporal que se encontra associado às mudanças naturais da paisagem.

Para alturas próximas à superfície, a velocidade do vento é nula. Por exemplo, num campo agrícola, com cultivo de trigo, a rugosidade muda significativamente entre o período de plantação, crescimento e colheita. A tabela 4.2 apresenta os valores de z_0 .

Tabela 4.2: Valores de z_0 em função do tipo de terreno [25].

Tipo de terreno	z_0 (m)
Plano (mar, areia, neve)	0,001 a 0,02
Moderadamente rugoso (ervas curtas, campos de trigo ou cereais)	0,02 a 0,3
Rugoso (bosques, bairros)	0,3 a 2
Muito rugoso (cidades, edifícios)	2,10

A fim de perceber-se o efeito da altura na velocidade do vento, ao duplicar a altura de 50 para 100 m, é possível provocar um aumento de 10% na velocidade do vento, isto para valores de α iguais a 0,1 [7].

O efeito da altura na velocidade dos ventos é observado na figura 4.3, cujos mapas representam a média anual de intensidade do vento (m/s) para diferentes alturas: 10 (a), 60 (b) e 80 m (c). Quando comparados, é possível observar que na figura 4.3(a) a velocidade do vento é mínima e nalgumas zonas é quase inútil, dada a necessidade de uma velocidade mínima (3 ou 4 m/s) para gerar energia eólica. Na figura 4.3(b) a 60 m de altura, a velocidade média do vento aumentou significativamente, à volta de 2 m/s. Ao contrário do mapa (a) esta velocidade do vento estimada, já apresenta potencialidades para geração de energia eléctrica a partir da energia do vento.

Na figura 4.3(c) com um aumento de 20 m de altura, os aumentos na velocidade são pouco significativos, ainda assim é possível visualizar, que de forma geral, a velocidade do vento aumenta com a altura.

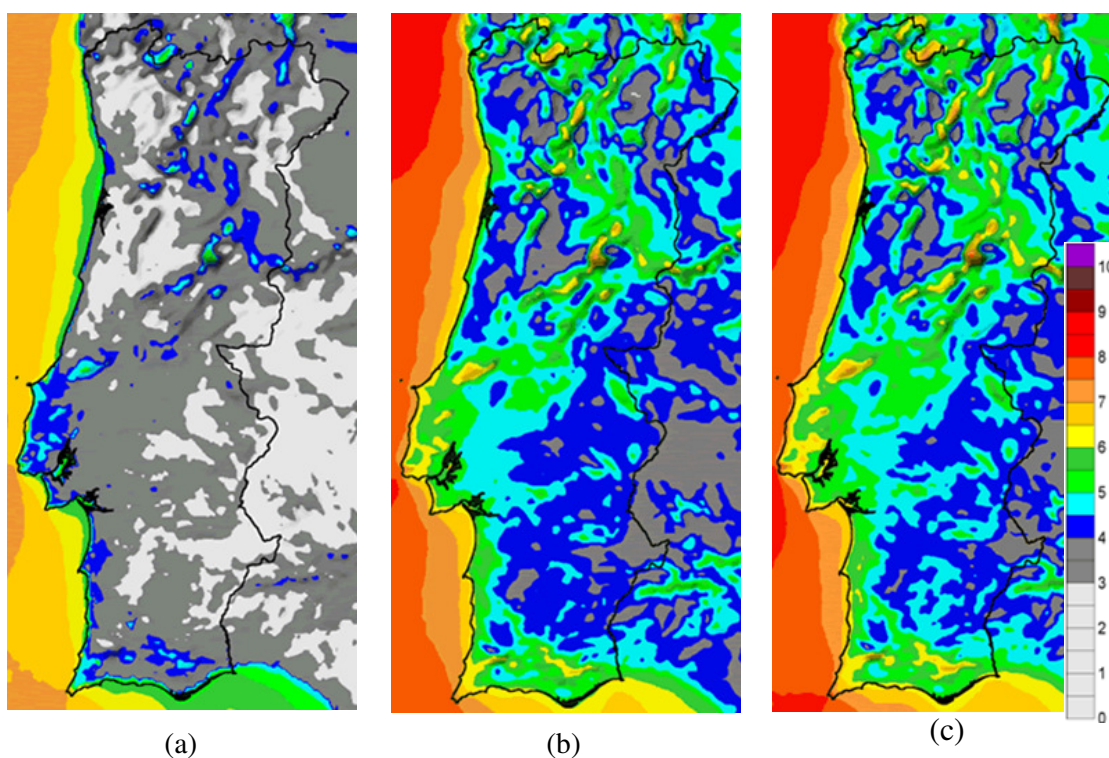


Figura 4.3: Mapas com a intensidade média do vento anual (m/s), para diferentes alturas 10 m (a), 60 m (b), e 80 m (c) [17]

4.2.2 Rugosidade

A rugosidade de um terreno caracteriza-se pelo conjunto de elementos, por árvores, arbustos, vegetação rasteira, bem como algumas construções sobre a superfície do solo, que afectam a velocidade do vento, oferecendo resistência à sua passagem.

Quanto mais densa e alta for a sua formação, maior será a rugosidade, ou seja, maior será a dificuldade que o vento terá para se deslocar [26].

A 100 m de altura do solo, os deslocamentos de massas de ar, são denominados de ventos de superfície. Nesta situação, o vento é influenciado por parte da rugosidade da superfície e dos obstáculos naturais existentes, dependendo das suas dimensões e distribuições, assim como da variação da temperatura na direcção vertical. Assim, torna-se uma mais valia conhecerem-se os ventos de superfície.

Dentro da camada limite atmosférica³, a frequência da velocidade do vento sofre uma variação do perfil que tem início no zero, junto à superfície e culmina na velocidade gradiente. [27].

Na análise anteriormente feita acerca do valor das variáveis, α da Lei de Potência e z_0 da Lei Logarítmica, estão directamente associados à rugosidade do terreno.

A Lei Logarítmica é considerada a de maior precisão, sobretudo devido ao uso do ajuste logarítmico feito nas duas alturas [26].

Nos dois métodos de cálculo a característica de extrapolação, está intrinsecamente ligada à rugosidade do terreno, factor que é levado em conta nos modelos de cálculo encontrados na rede mundial de computadores para a obtenção dos valores de velocidade do vento a uma determinada altura.

No Anexo G é possível observar os valores de rugosidade considerados pelo INETI para Portugal Continental.

³ CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA, É A CAMADA ATMOSFÉRICA MUITO PRÓXIMA À SUPERFÍCIE DE ALTURA GERALMENTE INFERIOR A 100 METROS EM QUE O TRANSPORTE TURBULENTO VERTICAL DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO É CONSTANTE (OU APROXIMADAMENTE CONSTANTE). O PERFIL VERTICAL DO VENTO NESTA CAMADA É LOGARÍTMICO, TENDO NA SUPERFÍCIE ESCOAMENTO NULO.

4.2.3 Obstáculos

É usual, junto do mastro do anemómetro, surgirem elementos sombra que não podem ser classificados como rugosidade. Então, neste caso denominam-se por obstáculos cuja identificação, bem como caracterização da influência que exercem na velocidade do vento é essencial.

Os obstáculos para além de obstruírem o escoamento das partículas de ar, modificam a distribuição das velocidades. O escoamento é influenciado por factores como a forma dos obstáculos, a sua porosidade e a distância entre eles. A representação dos obstáculos no local é executada através da medição das distâncias do mastro aos dois cantos mais próximos do obstáculo e respectivos ângulos, altura e profundidade, onde posteriormente é atribuído um coeficiente de porosidade por obstáculo [28]. São considerados obstáculos elementos como:

- Pequenas construções, embora não seja comum a instalação de turbinas eólicas nas proximidades de edifícios, acaba por ser frequente a implementação deste tipo de tecnologia em urbanizações;

- Barreiras vegetais, constituídas por inúmeras árvores, em que a perda de velocidade pode oscilar entre 3 a 20%, conseqüentemente a perda de energia pode variar entre 9 a 40%, estando dependente do tipo de folhagem e da distância ao ponto de interesse [29].

É assinalável a perda significativa a nível energético, devido à mudança de direcção do vento. A influência dos obstáculos é comparada a objectos com secção transversal rectangular (figura 4.4)

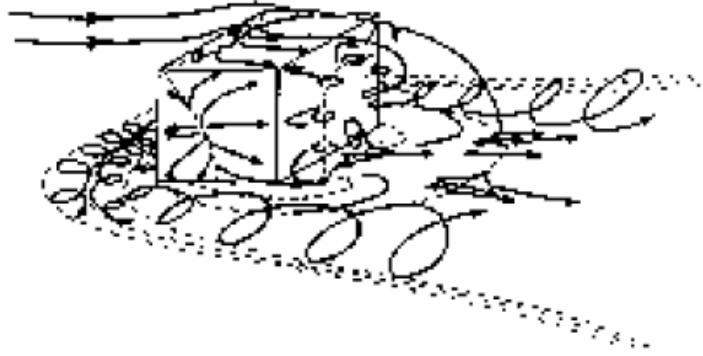


Figura 4.4: Exemplo do escoamento do ar, em torno de um edifício, que pode ser comparado a um objecto de secção transversal rectangular [30].

O comportamento do vento, na presença de obstáculos é complexo e de difícil caracterização devido ao facto de depender de muitas variáveis.

Ao escolher-se um local para a instalação de aerogeradores sempre que possível, devem ser evitados os obstáculos, devem ser minimizados os seus efeitos, como por exemplo, posicionando os aerogeradores a uma distância razoável dos obstáculos, instalando-os de forma que os obstáculos fiquem localizados em direcções menos privilegiadas para a produção de energia eléctrica desta natureza.

4.2.4 Altitude

A grande altitude a velocidade dos ventos aumenta, para isso contribuem alguns factores como o facto de a atmosfera ser menos densa, o que provoca elevada força directa⁴; o facto de existirem maiores efeitos de força directa em terrenos montanhosos e por fim a diminuição da presença de obstáculos [31].

Porém com o aumento da altitude ocorre uma redução na densidade do ar, diminuindo a energia dos ventos, assim para manter a mesma energia, a velocidade deve aumentar à volta de 3% por cada 1000m [32].

⁴FORÇA DIRECTA, FORÇA QUE AGE PARALELAMENTE AO EIXO DAS PÁS DO AEROGERADOR

A altitude tem influência na densidade do ar, que por sua vez é directamente proporcional à pressão e varia inversamente com a temperatura e constante dos gases.

4.2.5 Orografia

A orografia é um dos factores mais importantes na caracterização da velocidade dos ventos, dada a complexidade do terreno em causa.

Os terrenos montanhosos podem ser responsáveis pela alteração do escoamento atmosférico de diferentes formas. A diferença de temperatura sentida entre o ar próximo da colina e o ambiente circundante dá origem a fenómenos de brisa.

Quando se atinge um equilíbrio, o escoamento sobre terrenos montanhosos dá origem a gradientes de pressão na direcção do escoamento e o efeito do atrito por fricção à superfície pode provocar a separação do referido escoamento [33].

Se esta separação ocorre a jusante da montanha, o efeito de esteira pode ir até dez ou vinte vezes a altura do cume da montanha, se por outro lado ocorre a montante este efeito remoinho produzido concentra-se na base da elevação (neste caso a esteira não vai além de duas alturas de montanha) [34].

Em elevações de inclinação suave, este fenómeno é quase inexistente, onde as linhas de corrente bastante concentradas provocam um aumento na velocidade do vento e consequentemente um aumento proporcional de energia.

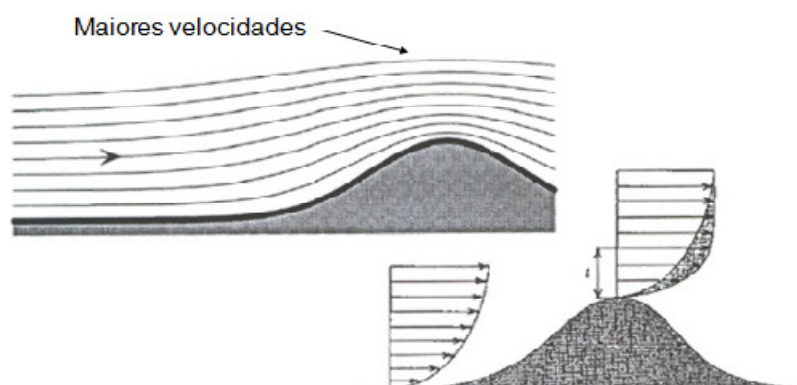


Figura 4.5: Esquema do vento em terrenos montanhosos [9].

Quanto ao escoamento atmosférico em terrenos considerados montanhosos, este não apresenta grandes oscilações, no entanto está dependente do local e da época do ano, uma vez que a média da velocidade do vento nos cumes é superior no Inverno, quando comparado com o Verão. A correlação possivelmente existente entre a direcção do vento num terreno deste género e uma dada referência em campo aberto, é considerado apenas válido para um local [35].

4.2.6 Efeito de esteira

Um outro facto que deve ser levado em conta, denominado de efeito de esteira, resulta numa perturbação na zona posterior da turbina eólica aquando da passagem do vento pelas pás desta. Na parte de trás do aerogerador forma-se uma esteira de vento turbulento, que se caracteriza por um conteúdo energético inferior e de velocidade reduzida relativamente ao vento incidente.

Em virtude disto os aerogeradores devem ser espaçados entre 5 a 9 diâmetros na direcção predominante do vento e entre 2 a 5 diâmetros perpendiculares a este. Apesar destas medidas a experiência demonstra que as perdas energéticas devido ao factor de esteira são de aproximadamente 5% [35]

4.3 Potencial da Energia Eólica

A análise do potencial eólico de determinado local deve ser essencial, aquando da instalação de um parque eólico. Um investimento desta envergadura requer o conhecimento preciso do regime dos ventos na região, sendo fundamental o conhecimento prévio da quantidade de energia que será possível produzir anualmente.

Uma correcta caracterização do potencial eólico num dado local passa inevitavelmente pela medição da intensidade e direcção do vento [36]. Nestes locais onde se pretendem instalar parques eólicos, as medições devem ter uma duração mínima de 12 meses consecutivos, porém se as campanhas de medições forem alargadas, permitem reduzir

as incertezas e possíveis erros associados à variabilidade do escoamento atmosférico [37].

Assim a precisão da média anual da distribuição da velocidade do vento e a curva de potência da turbina eólica, constituem elementos fundamentais para minimizar os riscos de investimento. Uma avaliação incorrecta pode ditar o fracasso do projecto.

A velocidade do vento tem um impacto muito forte no rendimento energético. Além da avaliação da velocidade do vento, uma análise da orografia, rugosidade do terreno e obstáculos do local a instalar são uma mais-valia para um projecto onde se deseja boa rentabilidade económica.

O acesso à rede é também um factor decisivo para determinar o número e valor da potência das turbinas, pois pode ser necessário a construção de linhas eléctricas, daí a importância da proximidade dos acessos de ligação à rede.

A energia que o aerogerador converte provém do vento, apesar da sua intermitência. Estas massas de ar em movimento possuem energia cinética, E_c , que é aproveitada por parte das turbinas eólicas, que por sua vez têm a capacidade de converter esta energia cinética em energia eléctrica.

A potência disponível do vento determina-se pela derivada da E_c em ordem ao tempo [38]:

$$P = \frac{dE_c}{dt} \cdot \frac{1}{A} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{dx}{dt} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A \quad (4.3)$$

A potência disponível é muito dependente da velocidade do vento, se esta aumentar para o dobro, obter-se-á uma potência oito vezes maior. No entanto, no caso da área varrida pelas pás dos aerogeradores, se esta duplicar, a potência aumenta duas vezes. O mesmo ocorre com a massa específica.

Para o caso, em que os valores de pressão e temperatura diferem das condições normais de temperatura e pressão, como por exemplo no Verão ou em grandes altitudes, haverá variações de potência. Se consideramos uma turbina eólica localizada

a 2000 m a densidade de energia dos ventos é 21% menor quando comparada, com uma localizada ao nível do mar, devido à altitude. Por outro lado em pleno mês de Agosto em Portugal, [IM] as temperaturas rondam os 30°C, o que consequentemente decresce em 5% a densidade de energia [39].

A mesma expressão pode ser escrita, como fluxo de potência ou densidade de potência disponível, ou seja,

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4.4)$$

Em W/m^2 , potência por unidade de área varrida pelas pás da turbina.

E a densidade da energia contida nos ventos é determinada por:

$$\frac{E}{A} = P \cdot h = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot h \quad (4.5)$$

4.3.1 Eficiência de Betz

A primeira teoria da quantidade de movimento que analisava elementos (neste caso específico, as pás da turbina) capazes de extrair energia dos fluidos (como o ar) foi desenvolvida por Albert Betz em 1920 [23].

O seu teorema demonstra que na passagem do vento pelo aerogerador, o rotor diminui a velocidade do vento, absorvendo parte da sua energia cinética e posteriormente transformando-a em energia mecânica essencial á rotação do próprio rotor.

É assim possível referir que a máxima energia retirada dos ventos, por um aerogerador é a energia cinética que os acompanha, quando atravessam a secção circular, formada pela área das pás. No entanto, o vento ainda possui velocidade, ou seja, energia cinética na esteira do rotor, assim nem toda a energia dos ventos é aproveitada. Betz mostrou que a velocidade que atravessa efectivamente o rotor é a média entre a velocidade antes e depois da passagem pelo rotor, ou seja:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{4.6}$$

E a massa de ar caudal é:

$$m_{ar} = \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{4.6}$$

Concluiu da existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão da energia eólica em mecânica, de $16/27 \approx 59,3\%$, conhecido como o limite de Betz. Este aproveitamento máximo ocorre quando $v_2 = \frac{1}{3} \cdot v_1$, ou seja, quando a velocidade do vento que abandona a turbina é igual a 1/3 da velocidade inicial [39].

O rotor (ver secção onde é explicado) trata-se do elemento responsável pela conversão da energia cinética em energia mecânica, porém este é um dos estágios da conversão da energia dos ventos em electricidade, uma vez que em média, a eficiência de conversão dos modernos aerogeradores está sujeita a [40]:

Rendimento de Betz.....	59,3%
Rendimento das pás.....	85,0%
Rendimento da caixa multiplicadora.....	98,0%
Rendimento do alternador.....	95,0%
Rendimento do transformador.....	98,0%

Donde se obtém um rendimento final na ordem dos 46%.

4.3.2 Análise da Curva de Potência

Os aerogeradores são instalados para gerarem a máxima potência, para uma determinada velocidade do vento.

A curva de potência de um aerogerador é um gráfico que indica qual será a potência eléctrica disponível no aerogerador para diferentes velocidades do vento, sendo este

projectado para produzir a máxima potência (potência nominal) a uma determinada velocidade do vento (velocidade nominal).

Para calcular esta curva de potência é muito importante levar em conta factores como: densidade do ar, velocidade do vento e potência do aerogerador.

A figura 4.6 mostra um exemplo da curva de potência de um aerogerador 2MW.

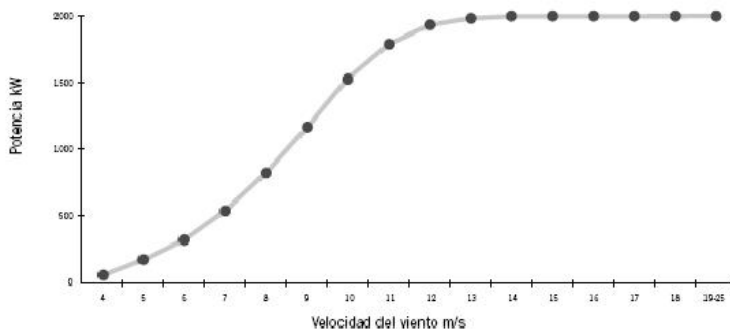


Figura 4.6: Potência (kW) versus velocidade do vento (m/s) de um aerogerador de 2 MW. Para cada ponto da curva de potência, encontram-se os valores na tabela ao lado, possibilitando assim uma visão geral do comportamento do aerogerador [7].

Tabela 4.3: Valores da velocidade do vento e potência da Curva de Potência [7].

Velocidade (m/s)	Potência (kW)
4	79
5	181
6	335
7	550
8	832
9	1175
10	1530
11	1816
12	1963
13	1988
14	1996
15	1999
16-25	2000

Para velocidades do vento reduzidas, neste caso abaixo dos 4m/s, o aerogerador não produz energia. Grande parte destas máquinas começa a produzir energia para velocidades do vento acima dos 4 m/s - *cut-in wind speed* -, com uma potência baseada na equação atrás referida. A sua potência nominal é considerada para velocidades do vento compreendidas entre 12 a 15 m/s - *rated wind speed*. Para velocidades do vento acima destes valores, é mantida a potência máxima. No entanto quando a velocidade do vento alcança os 25 a 30 m/s - *cut-out wind speed* -, o aerogerador é desligado por razões de segurança [39].

Quando a velocidade nominal do vento é ultrapassada, não interessa extrair energia, pois não se torna económico aumentar a potência, uma vez que apenas seria rentável durante poucas horas no ano. Assim é necessário, por vezes, regular a potência fornecida pelo aerogerador, através dos sistemas de regulação que são referidos no capítulo seguinte.

4.3.3 Coeficiente de Potência

A designação de coeficiente de potência, por vezes, surge também como rendimento aerodinâmico [40] ou mesmo como factor de aproveitamento [39], no entanto a terminologia é comum, é coeficiente de potência, C_p .

O coeficiente de potência C_p , indica com que eficiência o aerogerador converte a energia do vento em electricidade.

Em função da velocidade do vento temos que:

$$C'_p(v) = \frac{P_m}{P} \quad (4.7)$$

Em que o C_p é dado pela razão entre a potência mecânica no veio da turbina e potência disponível (equação 4.7).

Porém, os fabricantes de aerogeradores, geralmente, incluem o rendimento do gerador eléctrico no valor de C_p , ou seja, na prática temos que [41]:

$$C_p(v) = \frac{P_e}{P} \quad (4.7)$$

Em relação à equação anterior, substituiu-se P_m , pela potência eléctrica fornecida aos terminais do gerador (P_e).

4.4 Selecção do terreno para um parque eólico

A selecção do terreno numa dada região, onde será instalado um parque eólico é deveras importante, uma vez que há características fulcrais que devem ser levadas em conta, de modo a obter um melhor aproveitamento energético do vento na região.

Sendo a Beira Interior objecto de estudo deste trabalho, a selecção do terreno será focada em terrenos montanhosos. Assim na escolha do local a caracterização dos montes tem de ser analisada, uma vez que estes condicionam a o escoamento atmosférico. As principais características às quais se deve tentar obedecer são [42]:

- Devem-se evitar cumes muito acentuados, com formas dentadas e cumes com formatos muito planos, ou seja, pretendem-se cumes com inclinações suaves.
- Colinas com vegetação rasteira, evitando assim que estas constituam um obstáculo;

Como é visível na figura 4.7, o monte de forma triangular, é aquele onde o vento adquire maior velocidade.

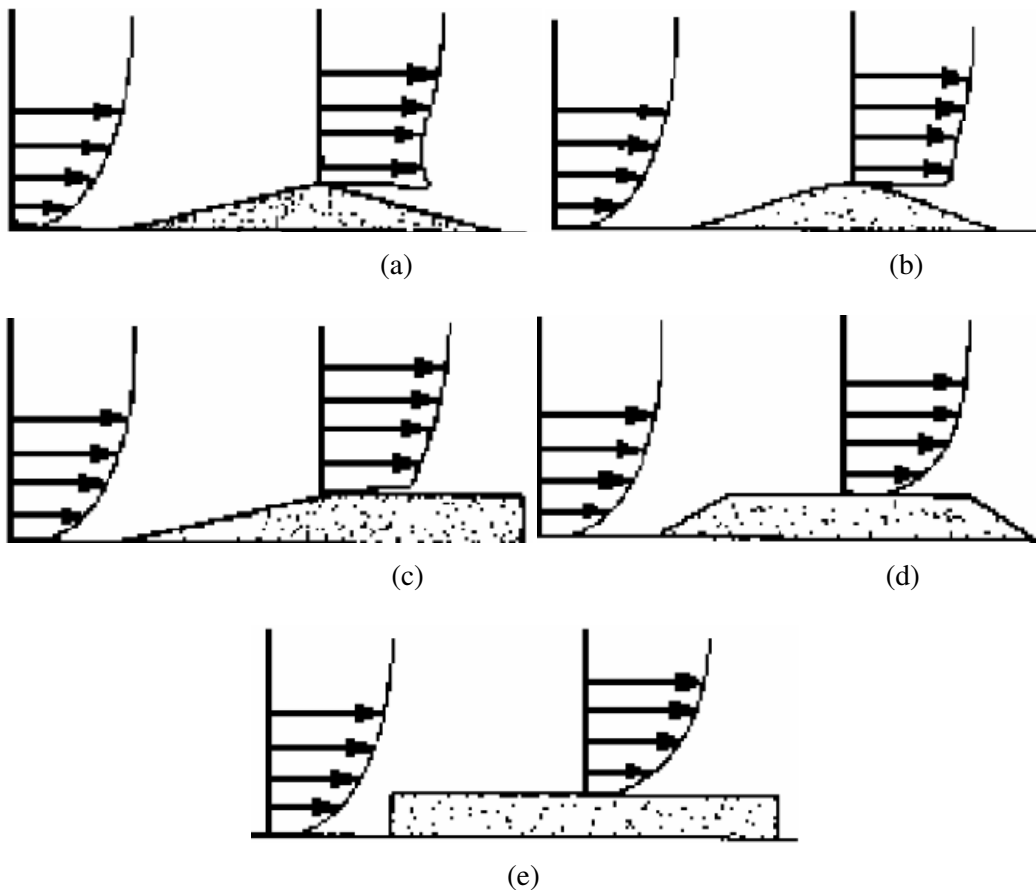


Figura 4.7: Forma dos montes: (a) triangular (de maior aceleração); (b) arredondado; (c) topo plano; (d) encosta íngreme; (e) escarpado (de menor aceleração) [29].

- Os terrenos montanhosos caracterizados por linhas cumeadas, torna-os locais propícios à instalação de parques eólicos, uma vez que os efeitos de arrefecimento junto ao solo são parcialmente evitados, o que conseqüentemente pode provocar a aceleração do escoamento atmosférico, incrementando assim a energia que pode ser captada localmente.
- O peso da componente térmica assume assim um papel primordial, devido aos ventos de vale e montanha que pode formar. Na figura 4.8 é observável que a melhor orientação de uma linha de cumeadas, em relação à direcção predominante do vento, é sem dúvida a perpendicular [32]. Ou seja, tal como os aerogeradores a linha de cumeadas também deve ser perpendicular à direcção predominante do vento.

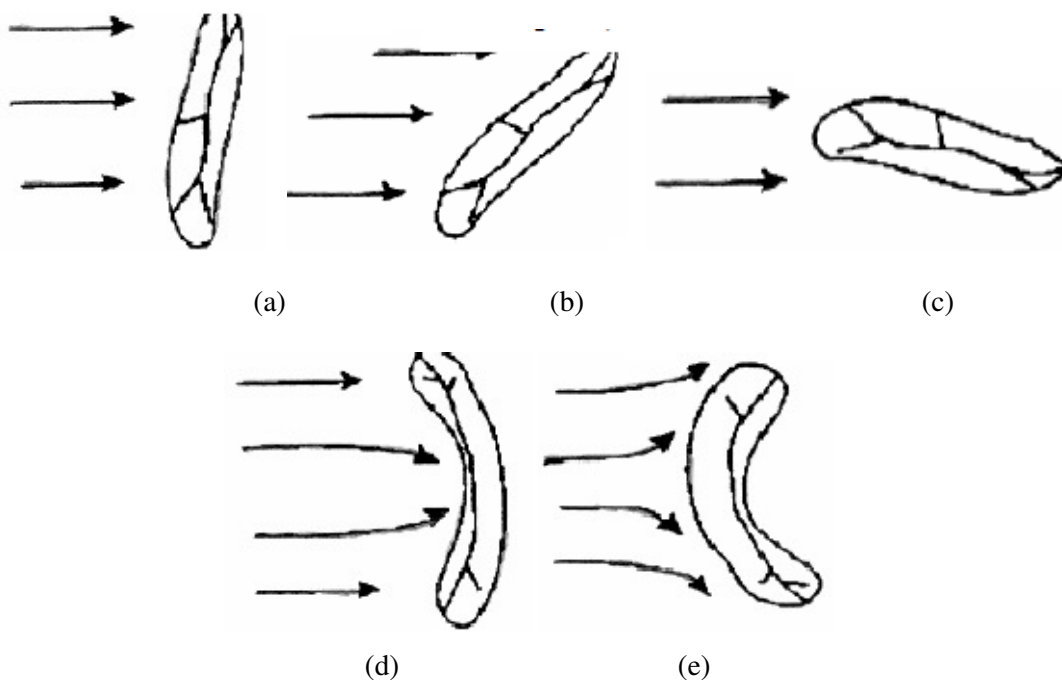


Figura 4.8: Orientações possíveis de linhas cumeadas: (a) perpendicular; (b) oblíquo; (c) paralelo; (d) côncavo; (e) convexo (menos desejável) [35].

Outras considerações que devem ser levadas em conta são factores como [43]:

- Terrenos com baixos valores de rugosidade e poucos obstáculos, de forma a evitar zonas como florestas, ou zonas densamente urbanas, que tendem a baixar e interferir na velocidade de escoamento do vento;
- Áreas suficientemente extensas, para que se possa instalar o número de aerogeradores desejados;
- Acessos facilitados a estas mesmas zonas, evitando dificuldades de instalação do parque eólico, bem como a sua manutenção;
- Salvaguarda do interesse dos proprietários dos terrenos;
- Avaliação dos impactos ambientais.

As zonas que possam ser consideradas com bom potencial, podem ser analisadas usando cartas militares ou se possível mapas eólicos, no entanto, a visita aos locais é sempre imprescindível, bem como uma caracterização pormenorizada do local recorrendo a medições efectuadas na região seleccionada.

Assim os locais com grandes potencialidades de se tornarem bons fornecedores de energia eólica consideram-se, os topos das montanhas, os planaltos e planícies elevadas e também os vales que apesar de serem locais com menos vento, podem ocorrer efeitos de concentração local.

4.5 Medições do vento

Para estimativa do potencial de energia eólica recorre-se a medições feitas no local ou a estações meteorológicas próximas.

Uma forma alternativa para avaliação deste potencial é com base em mapas eólicos ou modelos atmosféricos. Porém para um projecto fiável e de qualidade, recomendam-se medições de vento no local, cujas informações obtidas serão as mais fidedignas possíveis.

4.5.1 Estações Anemométricas

As medições de vento constituem o melhor método para se estimar o potencial deste tipo de energia. A campanha de medições deve ter um período suficientemente capaz de cobrir as oscilações meteorológicas do local, ou seja, devem ter um período mínimo de um ano [17].

A instalação de uma estação anemométrica tem como objectivo a recolha e armazenamento dos dados do vento como a sua direcção e velocidade. Esta estação caracteriza-se por ser composta por dois anemómetros situados a alturas diferentes e um cata-vento. A localização da torre de medição deverá situar-se de modo a evitar obstáculos que possam causar alguma interferência no escoamento do vento. Quanto à altura do aparelho de medição este deverá situar-se o mais próximo possível do eixo do rotor do aerogerador adequado para ser instalado no local, permitindo assim mitigar possíveis erros de cálculo associados.

A figura 4.9 demonstra um exemplo dum anemómetro, para medir a velocidade do vento.



Figura 4.9: Exemplo de um anemómetro [I15]



Figura 4.10: Exemplo de um cata-vento [I16]

Apesar da sua utilização ser comum a nível mundial, o anemómetro de copos apresenta algumas debilidades, pois no caso em que a componente vertical do escoamento é significativa, o instrumento regista valores de velocidade média afastados do valor da velocidade real do vento. Também a massa do conjunto dos copos juntamente com a haste e as fricções associadas provocam um amortecimento

na velocidade do vento, contribuindo para uma análise imprecisa na variação da velocidade do escoamento, sobretudo quando o objectivo passa por avaliar curtos períodos de tempo [40].

Os anemómetros de sensores ultrasónicos, constituem uma solução, quando se pretendem avaliar zonas caracterizadas por escoamentos com elevadas componentes verticais ou muito turbulentos.

Para analisar a direcção do vento, recorre-se a um cata-vento. Este instrumento procura incessantemente o alinhamento com a direcção do fluxo de massas de ar. Através de um transdutor é possível a conversão da posição do cata-vento para um sinal eléctrico. O comportamento do cata-vento também não é perfeito, pois apresentam uma certa resistência à mudança de posição, facto que se deve ao seu momento de inércia causado pelo movimento de rotação dos rolamentos. Com velocidades de vento inferiores a 1 m/s, o instrumento em questão apresenta um comportamento desequilibrado, girando sem uma tendência aparentemente definida. Aqui os anemómetros ultrasónicos surgem novamente como soluções viáveis, uma vez que têm a capacidade de avaliar também a direcção do vento.

Além da avaliação da velocidade e direcção do vento, será uma mais-valia a medição da pressão atmosférica e temperatura ambiente do local pretendido. Esta medição é feita com o auxílio de uma sonda de temperatura e um transdutor piezoeléctrico [43].

Todos estes valores medidos através dos sensores instalados na torre, são processados e armazenados em aparelhos denominados de data loggers. Estes aparelhos funcionam como unidades de memória, que por limitações de capacidade apenas as médias de 10 minutos e respectivo desvio padrão são armazenados.

4.5.2 Critérios para uma boa medição do vento

É fundamental ter elevada qualidade nas medições, para isso torna-se imprescindível, torres altas com aproximadamente $2/3$ da altura do rotor do aerogerador, bem como um local favorável à instalação da torre e o posicionamento correcto dos sensores [44].

Em terrenos complexos, como é o caso dos terrenos montanhosos da Beira Interior, deve-se instalar mais do que uma torre anemométrica, onde pelo menos uma deve ter a altura do rotor da turbina eólica. Para combater e diminuir as incertezas associadas às medições deve-se medir a velocidade do vento para duas alturas diferentes, obtendo-se assim o perfil do vento no local.

Segundo a DEWI existem margens de incerteza mais significativas que se encontram associadas à medição da velocidade do vento (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Margem de erro na determinação da velocidade do vento [45].

Fontes de erro	Margem de incerteza (%)
Calibração de Anemómetros	0,5 – 0,3
Efeito da inclinação dos anemómetros	0,5 – 4,0
Montagem dos anemómetros	0,2 – 3,0
Seleccção do local de medição	0,5 – 5,0
Período de medição	0,3 – 3,0
Avaliação dos dados	0,0 – 2,0
Margem de erro total da velocidade do vento	1,5 – 14,0
Incerteza na predição da energia gerada	3,0 – 30,0

No planeamento de um parque eólico, as campanhas de medição, tendo em vista a avaliação do potencial eólico, são indispensáveis, e a instalação de uma torre anemométrica representa 0,1% do orçamento total para a implementação de um parque eólico. Custo este, que se considera bastante baixo, tendo em conta a redução de riscos no investimento.

Posto isto, recomenda-se aos promotores e projectistas, rigorosas medições dos parâmetros importantes no local de instalação dos parques eólicos.

4.6 Parâmetros Estatísticos

O vento apresenta uma característica estocástica e a sua velocidade é uma variável aleatória contínua. Por isso, é necessária uma análise cuidada do seu comportamento. Assim depois de recolhidos os dados com base nas campanhas de medição são posteriormente tratados, passando a ser preciosos.

As grandezas estatísticas mais utilizadas na determinação do regime dos ventos são a velocidade média \bar{v} , e o desvio padrão σ . Tendo como objectivo a selecção da turbina eólica mais apta a funcionar no local ou comparar o comportamento do vento de diferentes regiões através de parâmetros estatísticos, é necessário armazenar os dados de forma consistente. Assim estes dados têm um tratamento estatístico, armazenando-os em forma de expressões analíticas, conhecidas como distribuições de probabilidades [46].

4.6.1 Rosa-dos-ventos

A rosa-dos-ventos assume particular importância uma vez que, na instalação das turbinas eólicas a disposição destas no terreno é determinada com base neste parâmetro. O termo “rosa” tem origem na aparência dos pontos cardeais da bússola que lembram as pétalas desta flor. Esta invenção era utilizada para indicar as direcções do vento [9].

Ao fim de uma série de medições surge a rosa-dos-ventos, onde é possível observar a direcção predominante do vento, bem como a frequência de ocorrência da velocidade do vento [19]. Beaufort em 1805 elaborou uma escala de medição de frequência da velocidade do vento [7]. Esta escala permite caracterizar 12 níveis de velocidade, os quais são utilizados internacionalmente.

Uma rosa-dos-ventos pode ser dividida em 8 a 24 sectores. A direcção que o vento pode ter, é medida em graus de 0 a 360, no sentido horário a partir de Norte. As rosas-dos-ventos que serão apresentadas ao longo deste estudo, estarão divididas em 8 partes representativas, com 45 graus cada uma, apresentando os pontos cardeais e colaterais (N, E, S, O, NE, SE, SO, NO).

4.6.2 Distribuição de Weibull

Sabendo que a intensidade dos ventos não é constante e com o objectivo de se determinar a energia gerada pelos ventos durante um certo intervalo de tempo é essencial realizar um tratamento dos dados, de forma a distinguir as velocidades e frequência com que ocorrem.

A distribuição de Weibull surge como o método mais utilizado para realizar o tratamento estatístico do comportamento do vento, tal como acontece na maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia [43].

A distribuição da velocidade do vento pode ser representada pela função densidade de probabilidade da velocidade do vento $f(v)$. Então a velocidade média será dada pela seguinte equação:

$$v_{méd} = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) \quad (4.8)$$

A distribuição de Weibull por seu lado, permite a representação de forma adequada e compacta, a distribuição da velocidade do vento.

Então, para a função densidade de probabilidade de weibull será:

$$w(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (4.9)$$

Teoricamente esta função é definida por dois parâmetros essenciais:

- factor de escala A, que está associado à velocidade média;
- factor de forma k, que permite indicar a uniformidade da distribuição e a forma de curva de weibull;

Os parâmetros A e k da referida distribuição podem ser determinados de diferentes formas. A mais rápida e simples de determinar k, consiste em utilizar uma relação aproximada como [40]:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{méd}} \right)^{-1,086} \quad (4.10)$$

No caso do parâmetro de escala A, através do valor de k e a função gama temos que [40]:

$$A = \frac{v_{méd}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (4.11)$$

Assim uma análise qualitativa da distribuição de Weibull implica a compreensão dos factores de forma k e de escala A. No Anexo H, encontram-se os mapas com os parâmetros da distribuição de Weibull, para Portugal Continental.

O factor de forma k é adimensional e representa uma grandeza inversa da oscilação da velocidade do vento, ou seja, uma grandeza inversa do índice de turbulência [47]. Então é possível constatar que quanto menos a velocidade do vento oscilar, menor será o índice de turbulência e conseqüentemente o valor de k atinge valores elevados. Por outro lado para grandes oscilações do vento, elevados índices de turbulência, teremos valores de k pequenos.

O factor de forma k assume grande influência na curva de distribuição de Weibull (figura 4.11), existem valores de k para os quais a distribuição de Weibull pode assumir uma distribuição exponencial ou uma distribuição de Rayleigh, para valores de k iguais a 1 ou 2 respectivamente.

Grande parte do regime dos ventos conhecidos na Europa e América do Norte, caracterizam-se por valores de k entre 1,8 e 2,5 [48].

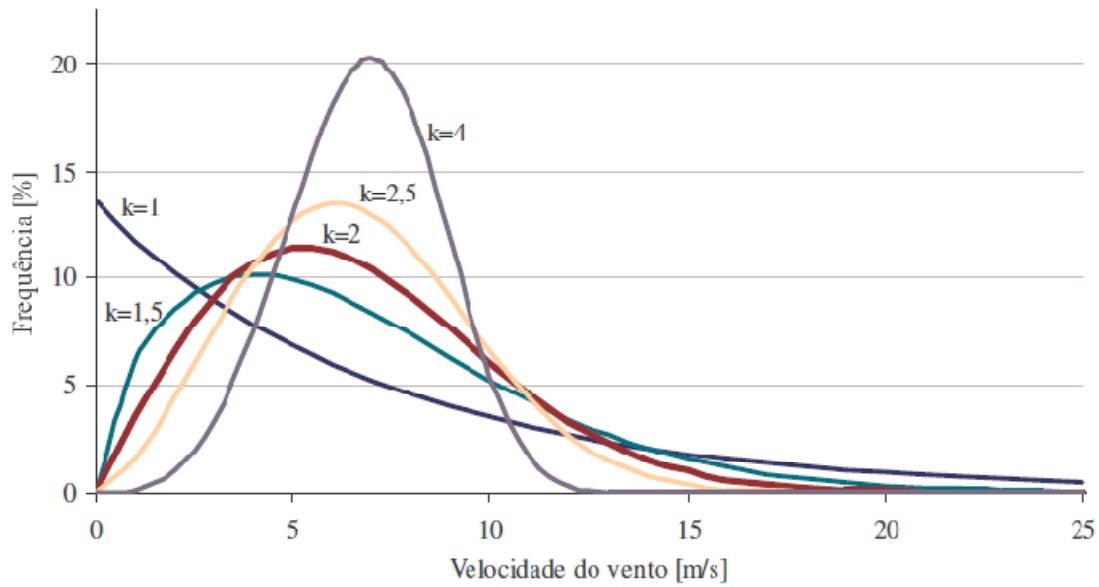


Figura 4.11: Frequência versus velocidade do vento para diferentes valores do factor de forma (k) [40]

Numa zona montanhosa, onde certamente ocorre uma maior dispersão dos ventos, pelas várias classes de velocidades, os valores de k baixam, aproximando-se entre 1,2 e 1,8.

Por seu lado o parâmetro de escala A, é medido em m/s e encontra-se dependente da velocidade média, representando as várias ocorrências na velocidade do vento, da distribuição de Weibull [37]. Então, quanto maiores forem os valores de A, tanto maior será a velocidade média.

Através dos valores de A e k da distribuição de Weibull é possível determinar a velocidade média, $v_{méd}$, (equação 4.12) e o fluxo de potência médio F_{pot} (equação 4.13) (Anexo I). Apesar da velocidade média ser o parâmetro mais vulgarmente utilizado para a caracterização do potencial eólico, é com o parâmetro fluxo de potência médio que se alcança maior rigor na caracterização do potencial energético do vento. Daí a importância das seguintes equações [9]:

$$v_{méd} = A \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (4.12)$$

$$F_{pot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^3 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \quad (4.13)$$

Para um correcta caracterização do regime dos ventos, será sempre necessário igualmente, uma correcta e rigorosa determinação dos valores de k e A

4.6.3 Distribuição de Rayleigh

Das inúmeras representações estatísticas testadas, as distribuições de Weibull e Rayleigh são as mais utilizadas para a representação dos ventos [40]. Para regiões onde se desconhece o perfil de vento, a distribuição de Rayleigh, surge suficiente, devido ao facto de apenas necessitar do conhecimento da velocidade média do vento para determinar a frequência da distribuição [43].

A função de Rayleigh representa-se pela expressão:

$$R(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{v_{méd}^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{v}{v_{méd}}\right)^2} \quad (4.14)$$

A função densidade de probabilidade de Rayleigh é frequentemente utilizada no Norte da Europa, devido aos valores de k próximos de 2 que a distribuição de Weibull assume. A função de Rayleigh é útil pela sua simplicidade. Porém a simplicidade desta função acaba por limitá-la, uma vez que não permite representar com fiabilidade, algumas gamas de velocidades, sobretudo regiões caracterizadas por velocidades do vento elevadas [25].

Esta distribuição apesar de representar uma possibilidade de cálculo para a verificação da frequência da velocidade, não irá ser utilizada como ferramenta de cálculo nesta dissertação, pelas limitações referidas anteriormente.

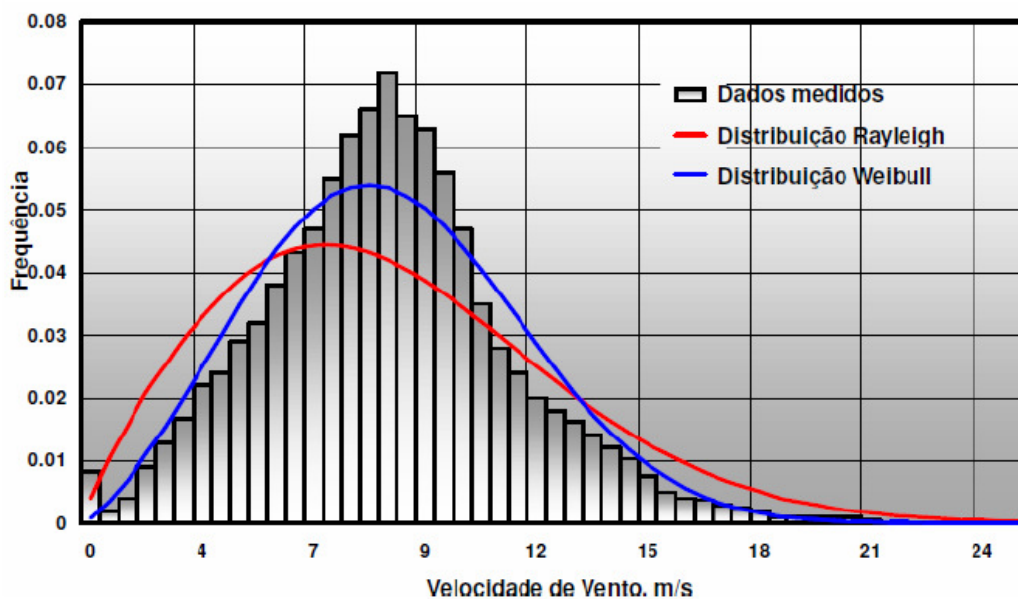


Figura 4.12: Curvas de Weibull e Rayleigh para um determinado histograma [9].

A figura 4.12 representa as distribuições de Weibull e Rayleigh para um determinado histograma. O gráfico permite constatar que a curva de Weibull ajusta-se melhor ao histograma de velocidades do vento medidas.

Os parâmetros que definem o potencial de uma região, como: a velocidade média, desvio padrão e os factores de distribuição de Weibull, são apenas uma orientação,

Aquando da instalação de um parque eólico, torna-se indispensável o conhecimento preciso do vento nessa mesma região, pois só assim será possível conhecer de forma fidedigna a quantidade de energia produzida por ano, bem como a área necessária ao empreendimento.

Síntese

O vento apresenta uma característica estocástica e a sua velocidade é uma variável aleatória contínua, pelo que o conhecimento prévio do regime dos ventos aquando da instalação de um parque eólico é fundamental.

Terrenos montanhosos com baixos índices de rugosidade e elevada altitude, bem como turbinas eólicas de altura superior a 60 metros com curvas de potência aceitáveis, são parâmetros essenciais à produção de energia eólica.

Assim há locais com características privilegiadas à geração de energia eólica que têm de ser alvos de estudo, a fim de se conhecer a viabilidade para o avultado investimento inerente à construção e manutenção dos aerogeradores. Para isso a distribuição de Weibull e a Rosa-dos-ventos são ferramentas indispensáveis ao tratamento dos dados recolhidos durante a campanha de medições

CAPÍTULO

5

Caracterização da Tecnologia

Introdução

O Sistema Eólico

Aerogerador E-82

5.1 Introdução

Nos sistemas de geração de electricidade com base na energia do vento, o componente principal é o aerogerador, que é responsável pela conversão dos movimentos das massas de ar, que possuem energia cinética, em electricidade.

Assim, torna-se crucial verificar a finalidade desta electricidade produzida por sistemas eólicos, bem como determinar a necessidade de utilização de outros equipamentos responsáveis pelo controlo, regulação e armazenamento.

Tendo em conta as especificações de cada aerogerador, a electricidade gerada por sistemas eólicos pode ser em corrente contínua ou corrente alternada. Distinguem-se várias aplicações entre as quais, os sistemas interligados à rede. Estes sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controlo de potência e, em alguns casos, de uma unidade de armazenamento [49]

5.1.1 Sistemas ligados à rede

Geralmente são sistemas de grande porte, que utilizam um grande número de aerogeradores e dispensam sistemas de armazenamento de energia pois toda a geração é entregue directamente à rede eléctrica. Em Portugal, os sistemas de geração eólica, encontram-se ligados à rede. Estes sistemas são, actualmente, bastante viáveis, devido à sua rápida evolução e representam uma fonte energética complementar ao sistema eléctrico ao qual estão ligados. Estes sistemas devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança - com valores de tensão e frequência adequados - para permitir que a energia gerada seja lançada directamente na rede sem qualquer dificuldade e sem criar qualquer perturbação.

5.2 O sistema eólico

O aerogerador é uma máquina capaz de absorver parte da energia cinética contida no vento através do rotor (como já visto anteriormente), convertendo em potência

mecânica, a qual é convertida posteriormente em potência eléctrica através de um gerador eléctrico.

A primeira fase de conversão de energia num sistema eólico surge no rotor, onde em turbinas de eixo horizontal, é constituído por um número de pás que, através de efeitos aerodinâmicos, converte a energia cinética, presente nos ventos, em energia mecânica de rotação, a uma frequência que varia entre 15 a 300 rpm, (estando dependente da potência do aerogerador) [50].

Um aerogerador possui geralmente, uma caixa multiplicadora com o intuito de entregar a energia mecânica ao gerador eléctrico, com uma frequência a rondar as 1500 rpm, caracterizando-se por um rendimento muito elevado [51]. Em muitos casos, a caixa multiplicadora tem sido substituída por componentes electrónicos de potência que adaptam a frequência do rotor para ser entregue ao gerador.

A transformação da energia mecânica de rotação em energia eléctrica deve-se ao gerador eléctrico, que possui também um rendimento elevado (aproximadamente igual ao da caixa multiplicadora). Caso a turbina eólica trabalhe directamente ligada à rede eléctrica será necessário, um transformador para elevar a tensão de saída, compatibilizando-a com a da rede [49].

Para captação de uma maior quantidade de energia por parte das pás, o sistema de conversão deverá estar apoiado numa torre a uma altura do nível do solo cujo desnível varia em função do diâmetro do rotor. A grandes alturas a velocidade do vento tende a ser maior e conseqüentemente a energia produzida. Da tabela 5.1 constata-se que quanto maior for o diâmetro do rotor, e conseqüentemente maior a potência da turbina, obtém-se maior quantidade de energia produzida anualmente.

Em Portugal, geralmente utilizam-se aerogeradores com uma potência unitária de 1,6 a 2 MW, encontrando-se ainda em fase de teste as turbinas de 5 MW [52].

Tabela 5.1: Evolução dos aerogeradores entre 1980 e 2005 na Alemanha [I4.3].

Potência nominal [kW]	30	80	250	600	1500	5000
Diâmetro do rotor [m]	15	20	30	46	70	115
Altura do eixo [m]	30	40	50	78	100	120
Energia anualmente produzida [MWh]	35	95	400	1250	3500	17000

Assim, os diferentes elementos que compõem um sistema eólico devem trabalhar em harmonia de forma a contribuírem para um maior rendimento final e inevitavelmente uma maior aproveitamento. Para isso devem ser considerados os seguintes componentes responsáveis na conversão da energia eólica: suporte, sistema de captação, sistema de orientação, sistema de transmissão, sistema de geração e os acessórios.

5.2.1 Suportes

Os aerogeradores devem estar posicionados sobre um apoio capaz de suportar o impulso do vento que o sistema de captação transmite e as eventuais vibrações que possam ocorrer. A sua altura deve ser suficiente a fim de evitar que as turbulências que provêm do solo possam afectar a máquina e superar todos os obstáculos próximos, que possam perturbar o escoamento do ar. Os suportes de um sistema de geração eólico são a torre e a fundação [52].

As torres, que sustentam os rotores, à altura adequada estão sujeitas a elevados esforços. Primeiramente, forças horizontais devem ser levadas em conta, como a resistência do rotor e a resistência da própria torre à força do vento. Em seguida, forças de torsão, impostas pelo mecanismo de controlo de rotação e esforços verticais como o peso do próprio equipamento.

Assim, uma questão fundamental no projecto da torre é determinar todas as frequências naturais de vibração dos componentes, sobretudo no que respeita às pás e torre, para evitar ressonância com as frequências de excitação do rotor em operação. A ressonância provoca o aumento das amplitudes de carregamento cíclico no sistema,

comprometendo assim a resistência à fadiga e reduzindo a vida útil prevista para o aerogerador, que é de aproximadamente 20 anos [49].

Hoje em dia, com uma melhor percepção acerca dos problemas dinâmicos das turbinas eólicas, tornou-se possível a construção de aerogeradores mais leves, que são conseqüentemente menos rígidos e também significativamente mais baratos que seus antecessores. No anexo J, encontram-se mais informações acerca dos materiais da torre e das pás dos aerogeradores.

5.2.2 Sistemas de captação

O rotor, considerado elemento principal de um aerogerador, é constituído por um determinado número de pás e um cubo. A sua função passa por transformar a energia cinética contida no vento em energia mecânica utilizável. Na figura 5.1 demonstra-se o desempenho de cada tipo de rotor dadas as suas características de funcionamento. Existe uma grande variedade de rotores e geralmente classificam-se segundo a disposição do seu eixo, obtendo-se assim aerogeradores de eixo horizontal ou vertical [51].

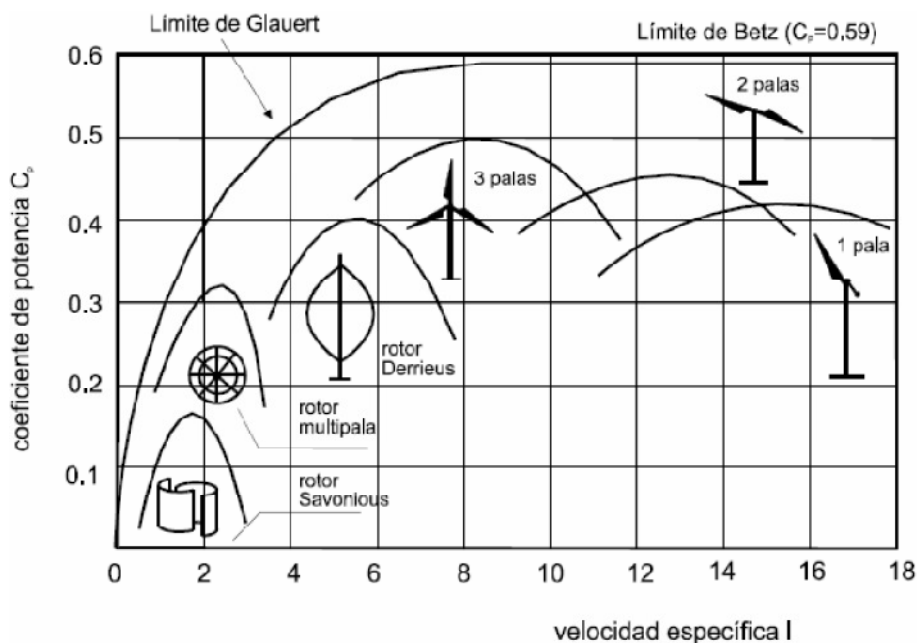


Figura 5.1:Características de funcionamento para cada tipo de rotor – coeficiente de potência versus velocidade específica [53].

Quanto ao eixo horizontal, esta disposição necessita de um mecanismo que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação a direcção do vento, para um melhor aproveitamento global, sobretudo onde ocorram variações na direcção dos ventos. Os principais modelos distinguem-se quanto às características que definem a sua utilização, sendo eles observados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Descrição das vantagens e desvantagens para os diferentes tipos de rotores de eixo horizontal.

Rotor	Vantagens	Desvantagens
Rotor multipás (figura 5.4)	Caracteriza-se por ser capaz de extrair energia dos ventos, mesmo para velocidades baixas (figura 5.1).	Pouco indicado para geração de energia eléctrica
Rotor de três ou duas pás (figura 5.2 e 5.3)	Grande relação de potência extraída por área varrida do rotor, (muito superior ao rotor multipás) e utilizado para velocidades mais elevadas (figura 5.1) – padrão dos rotores utilizados nos aerogeradores modernos.	Incompatível para sistemas que requeiram elevados momentos de força ou carga variável



Figura 5.21: Turbina eólica com rotor de duas pás [53]



Figura 5.3: Turbina eólica com rotor de três pás [53]



Figura 5.4: Turbina eólica com rotor multipás [15]

Por outro lado, a principal vantagem das turbinas de eixo vertical (tabela 5.3) é não necessitar de mecanismos de orientação, sendo evidenciada nos aeromotores por simplificar bastante os mecanismos de transmissão de potência. Apresenta como desvantagem, o facto das pás, serem constantemente sujeitas a alterações dos ângulos

de ataque e de passo em relação à direcção dos ventos (devido ao movimento de rotação). Consequentemente gera forças resultantes alternadas, que além de limitarem o seu rendimento (figura 5.1), causam vibrações acentuadas em toda sua estrutura. []

Tabela 5.3: Descrição das vantagens e desvantagens para os diferentes tipos de rotores de eixo vertical

Rotor	Vantagens	Desvantagens
Rotor Savonius (figura 5.7 e 5.8)	É mais indicada para pequenos sistemas como é o caso do bombeamento de água, onde os custos finais compensam este rendimento mais baixo, devido à simplicidade do sistema de transmissão e construção do rotor.	Apresenta uma curva de rendimento próxima à do rotor de múltipás de eixo horizontal, mas numa faixa ligeiramente mais estreita e de menor amplitude, funcionando para baixas velocidades do vento (figura 5.1)
Rotor Darrieus (figura 5.5 e 5.6)	Por apresentar uma curva de rendimento com características próximas à dos rotores de três pás de eixo horizontal são utilizados para geração de electricidade	Muito sensível a danos provocados por ventos muito fortes



Figura 5.5: Turbina eólica com rotor Darrieus [I6]



Figura 5.6: Turbina eólica com rotor Darrieus [I7]

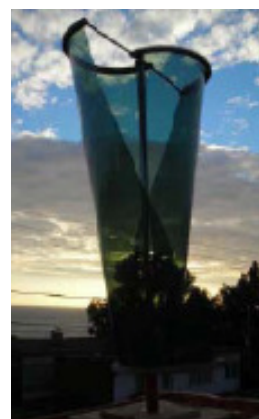


Figura 5.7: Turbina eólica com rotor Savonius [I8]



Figura.5.8:Turbina eólica com rotor Savonius [I9]

Porém é possível a utilização de uma, duas, três ou mais pás, no entanto, para soluções economicamente viáveis, estuda-se um máximo de três pás, como observado na figura 5.9. Já aerogeradores de três pás possuem um comportamento dinâmico mais suave e fornecem oscilações menores de torção no eixo, o que simplifica a transmissão mecânica [47].

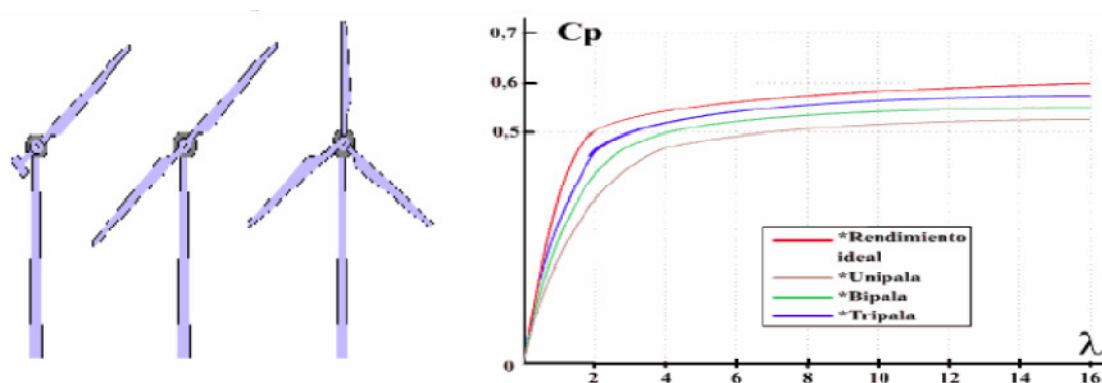


Figura 5.9: Comparação do rendimento de aerogeradores de uma, duas e três pás - coeficiente de potência versus velocidade específica [53].

Quanto à turbina de uma só pá é de referir, que praticamente se encontra fora do mercado, devido ao elevado ruído aerodinâmico, uma vez que pode alcançar velocidades duas vezes superior às turbinas de três pás (figura 5.1) e pelo facto de a opinião pública reprovar a integração deste tipo de turbinas na paisagem.

No caso dum rotor de duas pás, geralmente este é articulado, permitindo poucos graus de movimento perpendicular ao eixo de rotação. Com um cubo articulado, cada pá, ao passar pelo topo do círculo de rotação – onde a velocidade do vento é maior devido ao gradiente vertical – move-se um pouco para trás; ao mesmo tempo a outra pá, no curso inferior do círculo de rotação – onde a velocidade do vento é menor – move-se para a frente. Este movimento de articulação alivia significativamente as tensões no cubo do rotor, compensando o custo extra da articulação do mesmo [52] O próprio peso das pás induz cargas cíclicas no plano de rotação penalizando a estrutura da torre; assim as pás devem obedecer ao critério de peso mínimo, resistência à fadiga e rigidez estrutural.

Actualmente não se nota nenhuma tendência crescente do mercado das turbinas de duas pás. O facto de nas pontas das pás, as velocidades serem mais altas quando comparadas com as turbinas de três pás, constitui uma desvantagem, no que se refere ao nível da potência de ruído do aerogerador.

A maioria, das turbinas eólicas modernas possuem rotores de três pás (tal como acontece na Beira Interior), usando motores eléctricos nos seus mecanismos de orientação. A principal razão do uso das três pás é o momento de inércia constante do rotor para todo o ângulo circunferencial do azimute⁵, devido aos movimentos operacionais à volta do eixo longitudinal da torre [51]. Um aerogerador com este tipo de rotor, não tem nenhum momento de inércia quando gira, e conseqüentemente não induz carga na estrutura do aerogerador, não necessitando de componente adicionais. Outra vantagem reside no movimento de rotação, ao contrário das turbinas de uma e duas pás, os aerogeradores de três pás, possuem uma rotação mais suave, o que constitui um aspecto positivo para a opinião pública.

Além destas razões referidas, o rotor de três pás é o mais utilizado pelo seu desempenho muito próximo do rendimento ideal (dado pelo limite de Betz), como se constata na figura 5.9, apresentando assim um rendimento superior aos seus concorrentes directos. Ao compararmos a relação entre C_p (coeficiente de potência) com λ (coeficiente de velocidade), observa-se que para o mesmo rendimento e dimensão da pá, é necessário impor maior velocidade, quanto menor o número de pás

5.2.3 Sistemas de orientação

As turbinas eólicas de eixo horizontal necessitam de um sistema que oriente o rotor, isto é, um sistema capaz de detectar a orientação do vento e situar o rotor na mesma direcção. Isto contribui consideravelmente para a diminuição das perdas de potência.

Estes aerogeradores estão sujeitos a grandes esforços durante as mudanças de velocidade e direcção dos ventos. Assim, o sistema de orientação é responsável por

⁵ ÂNGULO MEDIDO EM GRAUS, SOBRE UMA SUPERFÍCIE ESFÉRICA, VARIANDO GERALMENTE ENTRE 0 E 90°[110]

posicionar o rotor, evitando alterações bruscas, quando ocorrem mudanças na direcção do vento. Existem vários sistemas de controlo, escolhidos de acordo com a potência da instalação eólica [39].

Para máquinas de pequena e média potência (menores do que 50 kW), o dispositivo mais adequado de orientação geralmente costuma ser uma cauda, de superfície plana, situada no extremo de um suporte unido à turbina eólica.

No caso das máquinas de maior porte (diâmetros superiores a 20 m) utiliza-se o efeito de conicidade: as pás inclinam-se um pouco, de forma que a sua rotação descreva um cone. Quando o rotor não está orientado correctamente, as pás que se encontram mais a favor do vento recebem um maior impulso aerodinâmico que tende a variar a orientação do rotor até alcançar a posição de equilíbrio, onde todas as pás se encontram submetidas ao mesmo impulso [40]. Com a utilização de motores auxiliares que funcionam automaticamente através de servomecanismos (medem a direcção do vento e comparam-na com a do rotor, conhecida como orientação assistida) que são os responsáveis pelo posicionamento adequado do rotor através de uma engrenagem.

5.2.4 Sistemas de regulação

O sistema de regulação tem por objectivo controlar a velocidade de rotação, a fim de evitar flutuações produzidas pelas velocidades dos ventos. Os sistemas mais simples, utilizados apenas em máquinas de pequeno porte e, normalmente em instalações em que são aceitáveis variações na potência de saída, operam apenas na etapa de potência, evitando rotações muito elevadas, provocadas por ventos fortes, que poderiam colocar em perigo a integridade da máquina.

A potência contida no vento é proporcional ao cubo da velocidade do vento, no entanto velocidades muito elevadas de vento ocorrem com pouca frequência. Estes ventos de pequena frequência relativa, contribuem muito pouco para a energia gerada, e não seria economicamente viável projectar aerogeradores para operar eficientemente sob tais condições; os elevados carregamentos nas pás e as grandes potências de pico acrescentariam custos extras substanciais ao custo do aerogerador e dariam um

incremento de energia gerada muito pequeno ao longo do tempo. Estes custos extras podem ser evitados se for limitada a potência do aerogerador para ventos fortes [9]. Os modernos aerogeradores usam dois princípios de controlo aerodinâmico diferentes para limitar a extracção de potência à potência nominal do gerador. O mais passivo é o chamado controlo por passo fixo - “stall” - e o activo controlo de passo variável - “pitch” -, (Anexo K) sendo que o primeiro domina no mercado, uma vez que apresenta maior simplicidade em relação ao controlo de passo variável, já que não possui um sistema de mudança de passo. Além disto a manutenção necessária é menor, facto que se deve ao menor número de partes móveis. [39]

5.2.5 Sistemas de transmissão

A energia mecânica obtida pelo rotor deve ser transmitida de alguma forma para poder ser aproveitada. O sistema de transmissão é responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até ao eixo do gerador [54].

A forma geralmente utilizada e a de maior eficiência passa pela transmissão por engrenagens. Existem ainda outros sistemas de transmissão (óleo/hidráulico, hidráulico) mas são muito pouco utilizados e a multiplicação por correias ou correntes têm a possibilidade de baixos custos, porém são viáveis apenas para pequenas potências [9].

Quanto à frequência dos rotores, esta varia normalmente na faixa das 15 a 220 rpm devido a restrições de velocidade tangenciais, na ponta da pá, que operam na ordem de 50 a 110 m/s, quase independentemente do tamanho do diâmetro [54]. No caso dos geradores, sobretudo os síncronos é que trabalham, pois em rotações mais altas, geralmente entre 1200 e 1800 rpm, torna-se necessária a instalação de sistemas de multiplicação entre o eixo do rotor e o eixo do gerador [9].

No caso de aerogeradores com potências acima de 2 kW, e rotores com mais de 3 metros de diâmetro, geralmente, opta-se pela utilização de um multiplicador de velocidades entre o rotor e o gerador [51].

5.2.6 Sistemas de geração

O sistema de geração é responsável pela conversão da energia mecânica em energia eléctrica. Esta transformação passa pela utilização de equipamentos de conversão electromecânica, cuja tecnologia é amplamente dominada, com grupos geradores correntemente industrializados. A integração destes grupos geradores em sistemas de conversão eólica abrange [55]: variações na velocidade do vento - ampla faixa de rotações por minuto para a geração; variações do binário de entrada - oscilações na velocidade do vento induzem variações da potência disponível no eixo gerador; exigências de frequência e tensão constantes na energia final produzida.

O sistema eléctrico da turbina eólica está condicionado pelas características de operação do rotor e pelo aproveitamento de energia obtida. Os geradores que transformam a energia mecânica em eléctrica podem ser de corrente contínua ou alternada. Estes últimos, por sua vez, podem ser de indução (assíncronos) ou de excitação (síncronos) ou ainda geradores de comutador de corrente alternada, apesar de serem pouco utilizados. Cada um destes sistemas de geração têm diferentes características, tanto nos requerimentos de entrada quanto nas particularidades da corrente de saída [51].

O tipo de gerador influencia de forma determinante o comportamento e a operação do aerogerador, bem como as suas interacções com a rede. Assim quanto maior for a capacidade e a amplitude das variações de rotação permitidas no gerador, menores serão as tensões mecânicas e as oscilações bruscas de potência geradas. Para os aerogeradores ligados à rede, as principais opções que existem são: geradores síncronos, geradores assíncronos e geradores de comutador de corrente alternada.

Geradores Síncronos

Actualmente a maioria dos sistemas de conversão de energia eólica construídos, de média e grande escala de produção, usam geradores síncronos para a conversão electromecânica. As principais vantagens, residem sobretudo na ligação directa à rede eléctrica, o facto de possuírem elevada eficiência, aproximadamente 98% e permitirem

um melhor controlo do factor de potência de carga [55]. Este elevado rendimento, faz dos geradores síncronos dos mais utilizados nas centrais térmicas. Quanto às desvantagens, necessitam dum regulador de tensão acoplado e é necessário manter a velocidade de rotação constante no sistema, visto que a regularidade da frequência apresenta uma forte dependência da regularidade da velocidade de rotação; pois caso contrário apresentará problemas de instabilidade [50] Por conseguinte, os sistemas de controlo são mais caros, requerem flexibilidade na potência e ainda é necessária a utilização de controlo de velocidade do rotor para um bom sincronismo.

Geradores Assíncronos

Quando comparados com os geradores síncronos, caracterizam-se por não possuírem um campo de excitação e necessitarem de maior binário de partida [45]. No gerador assíncrono, são possíveis variações limitadas de rotação, dentro da margem de escorregamento do gerador. Isto oferece maior elasticidade em rotação do que o gerador síncrono, o que reduz tensões mecânicas e oscilações elevadas da potência gerada aquando da ocorrência de rajadas de vento de curta duração (permitindo alguma absorção da energia cinética pela inércia do rotor) [51]. Com isto são eliminados os problemas de instabilidades momentâneas.

Os geradores de indução são considerados mais robustos, requerem uma manutenção mínima e têm uma longa vida de funcionamento. Estes geradores permitem a ligação directa à rede sem a necessidade de sincronização ou regulação da tensão.

No caso dos parques eólicos da Califórnia, praticamente todos os aerogeradores em uso têm geradores de indução [23]; por outro lado, no caso na Beira Interior geralmente os aerogeradores utilizados têm geradores de excitação.

Geradores de Comutador de Corrente Alternada

Dada a sua fraca utilização, apenas é de referir que são geradores adaptados para trabalharem a frequência variável. Apresentando como principais vantagens o facto da

frequência de saída ser sempre igual à frequência de excitação, independentemente do valor da velocidade de rotação do eixo do gerador; um melhor controlo do factor de potência da carga podendo eventualmente, serem usados como geradores síncronos. No entanto, têm um custo de aproximadamente 20% superior aos geradores de corrente contínua, exigem manutenção periódica e apresentam uma limitação tecnológica a nível da potência, situada na faixa dos 5 MW [7].

5.2.7 Acessórios

A tecnologia moderna na área da electrónica, para grandes potências tornou possível, que rectificadores e inversores fossem capazes de operar em potências de sistemas de conversão. Os geradores de corrente contínua apesar de não terem sido referidos atrás, para faixas de potência superiores, devido ao elevado custo dos inversores associados a este sistema para a geração de corrente alternada, começam agora a ser reconsiderados em média e larga escala de produção essencialmente, pela facilidade de armazenamento eléctrico em conjuntos de baterias e o desenvolvimento de inversores [40].

5.2.8 Armazenamento

Em muitos casos, a curva de procura de energia eléctrica não coincide com a disponibilidade de electricidade gerada pelos sistemas eólicos e o ideal seria o seu armazenamento.

As baterias são bastante utilizadas. Porém, para o armazenamento na ordem dos MW não é comportável, além disso há a conversão de energia eléctrica em energia química no interior da bateria, resultando em perdas para o sistema, diminuindo a eficiência do mesmo. Assim, de forma a aumentar o aproveitamento eólico, são utilizados mecanismos para armazenar a energia dos ventos, podendo ser realizados, de forma indirecta, ou seja, a energia gerada é conservada na forma mecânica (ar comprimido). No entanto o inconveniente desta energia passa por não poder ser armazenada na forma de energia eléctrica.

As várias formas de armazenamento, mais utilizadas, deste tipo de energia em grande escala, na ordem dos MW são: [43]

- O motor bomba – em que a energia ficará então armazenada sob a forma de energia potencial da massa de água que quando necessária será libertada e poderá accionar uma turbina geradora de electricidade
- O motor-compressor - permitindo o armazenamento da energia eólica/eléctrica na forma de energia potencial de ar comprimido, podendo ser armazenado num recipiente próprio para posterior utilização no accionamento de turbinas produzindo electricidade.

Saliente-se o facto de que o armazenamento desta energia conduz a perdas, não sendo desta forma uma opção eficiente para a gestão da energia eólica. Só um país que possua condições geográficas favoráveis para o aproveitamento em termos de reservatórios hidroeléctricos (como é o caso de Portugal), é que se torna viável.

5.3 Aeroerador E-82

O aeroerador E-82 caracteriza-se por ser o mais comum nos parques eólicos da Beira Interior (tabela 3.2 e 3.4). Assim será feita a sua caracterização, com o intuito de saber se é o aeroerador mais adequado a funcionar, dadas as características da região.

O E-82 representado na figura 5.10 é um aeroerador com um rotor de três pás, com regulação das pás (regulação de pitch) e operação com rotação variável. O aeroerador em questão tem uma potência nominal de 2000 kW, com um diâmetro do rotor de 82 m e uma altura do cubo de 78 até 108 m de modo a que o vento seja aproveitado com eficácia para a produção de energia.[41]



Figura 5.10: Aeroerador E-82 da Enercon [111].

Este aeroerador pertence à ENERCON o maior fabricante incontestável em território nacional. (figura 5.11).

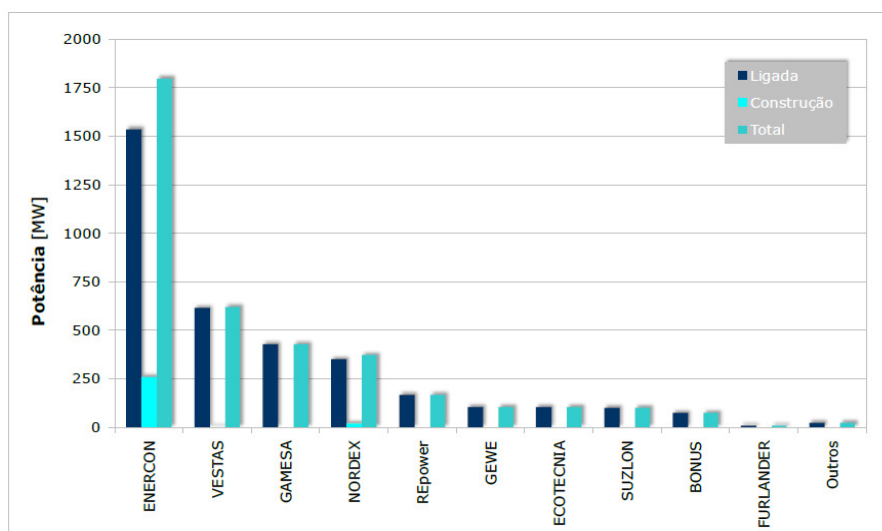


Figura 5.11: Gráfico com a potência ligada e a instalar por parte dos maiores fabricante em Portugal [56].

Os aerogeradores ENERCON são desenvolvidos e projectados com o objectivo de minimizar as cargas e maximizar o rendimento. O aerogerador E-82 distingue-se pelas características, representadas na tabela 5.4.

O componente rotativo do gerador e as pás do rotor constituem uma única unidade. As pás do rotor estão ligadas directamente ao cubo do rotor através de rolamentos.

Não existindo uma caixa redutora principal, nem componentes que girem a alta velocidade, torna as perdas de energia entre o rotor e o gerador, a emissão de ruídos, o uso de óleo em redutores e o desgaste mecânico significativamente reduzidos. As três pás do rotor são equipadas com um sistema independente de controlo de passo, designado por sistema de Pitch. Cada sistema destes é composto por um accionamento eléctrico e uma alimentação de emergência para cada pá

Tabela 5.4: Características técnicas do E-82 (adaptado de [41]).

Aerogerador E-82			
Dados de operação	Potência nominal		2000 kW
	Velocidade do vento para o arranque		2,5 m/s
	Velocidade do vento para a paragem		24-34 m/s
	Velocidade nominal do vento		12 m/s (aproximadamente)
Gerador com transmissão	Gerador		ENERCON, circular (síncrono), directamente aparafusado no cubo
	Rotação		Variável 6-19,5 rpm
	Rolamento		1 rolamento de rolos cilíndrico/ 1rolamento duplo de esferas
	Cubo		Rígido
Rotor	Diâmetro		82 m
	Superfície		5281 m ²
	Pás	Número	3
		Comprimento	38,8 m
		Peso	8,0 toneladas
		Material	PRFV ⁶ / resina epóxi
		Velocidade na ponta	25,8 – 83,7 m/s
	Sistema de travagem		Três sistemas independentes de ajuste das pás
	Direcção da rotação		Horária
Orientação		Para o vento	
Dimensões/ Pesos	Nacelle		120,5 toneladas (aproximadamente)
	Nacelle (sem rotor e gerador)		17 toneladas (aproximadamente)
	Gerador completo		54 toneladas (aproximadamente)
	Cubo com pás		49,5 toneladas (aproximadamente)

⁶ PLÁSTICO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO

O sistema de regulamento de pitch permite controlar a rotação do rotor e a energia absorvida do vento. Isto permite que a potência do E-82 seja limitada com precisão ao seu valor nominal, mesmo que seja por pouco tempo. Quando as pás são movidas para a posição "em bandeira" posição esta que se caracteriza por estar paralela ao vento, o rotor é parado, sem a aplicação de cargas ao sistema, através do accionamento do travão mecânico. O sistema de passo variável permite ainda o aumento da energia produzida, dentro da uma gama de capacidades parciais de geração.

A energia produzida pelo gerador do E-82 é transmitida, por meio dos armários de potência e dos sistemas de ligação à rede até à rede de distribuição de energia. O armário de potência do da ENERCON integra uma unidade rectificador-inversor. O sistema de inversão permite que o rotor do E-82 funcione com rotações variáveis [41]. O rotor gira devagar quando a velocidade do vento é baixa e a velocidades mais altas quando a velocidade do vento é mais elevada. Isto permite o vento fluir com maior eficiência em torno das pás do rotor. A rotação variável permite ainda a redução das cargas impostas ao aerogerador.

O sistema de ligação à rede garante que energia de alta qualidade seja injectada na rede (rede da CEE), já que o E-82 pode adaptar-se aos parâmetros da rede, como tensão e frequência.

Devido às novas características de transmissão dos aerogeradores da ENERCON, o E-82 pode "apoiar", de acordo com as indicações da CEE, por alguns segundos, a rede em caso de uma falha. O E-82 permanece em funcionamento e pode alimentar potência logo que a falha da rede for eliminada.

Os componentes principais do E-82 são o gerador circular, o rotor e o sistema de ligação à rede de distribuição.

5.3.1 Sistema de sensores

Um sistema de monitorização muito complexo garante a segurança do aerogerador. Todas as funções relacionadas com a segurança como: o controlo da velocidade de rotação, enrolamento dos cabos, sistema de segurança do pitch , são monitorizados por

meios electrónicos e, adicionalmente, controlados por sensores mecânicos, com acção de precedência. Este sistema de sensores é um auxílio essencial que serve para eliminar ao máximo as falhas e minimizar os danos provocados pelas falhas[41]. A figura no Anexo L oferece uma visão geral do equipamento de segurança.

5.3.2 Sistemas de controlo

O E-82 regista numerosos estados de funcionamento e avalia permanentemente o estado actual dos componentes individuais.

No Anexo M encontra-se a descrição da operação do sistema de controlo Estes dados são registados por sensores, por exemplo sensor de temperatura, micro interruptor, sensor de ângulo, sensor de velocidade e o seu estado é verificado pelo sistema de controlo. Alguns sensores, como o cata-vento, enviam permanentemente dados que afectam o funcionamento do aerogerador. Outros verificam se o aerogerador está num estado de operação normal. As situações relevantes para a segurança, como, por exemplo, a rotação do rotor e a temperatura do gerador, são controladas várias vezes por sensores independentes. A rotação do rotor é controlada e ajustada constantemente pelo sistema de controlo.

5.3.3 Monitorização da temperatura

A monitorização da temperatura, é importante sobretudo numa zona como a região da Beira Interior, em que se encontra exposta à grande variação de temperaturas durante o ano. Alguns componentes do aerogerador devem ser protegidos de temperaturas de funcionamento que possam ser muito elevadas ou muito baixas. Os sensores medem continuamente a temperatura e, se necessário, param o aerogerador ou reduzem a potência produzida.

A temperatura das unidades de potência é continuamente ajustada por meio de ventiladores. Quando ocorrem temperaturas elevadas nas unidades de potência (rectificador e inversor) os respectivos ventiladores serão ligados.

Para garantir um elevado nível de segurança, alguns pontos de medição, estão equipados com interruptores de temperatura adicionais. Estes reagem sempre que a temperatura exceda um determinado valor limite [41]. Entre outros são controlados: o gerador (rotor e estator); o rolamento principal do cubo-rotor; as unidades de pitch de emergência (baterias); os dissipadores de calor nos armários de potência; os dissipadores de calor do rectificador, e os dissipadores de calor no regulador de excitação.

5.3.4 Armário de controlo / display

No armário de controlo encontra-se uma unidade electrónica comandada por microprocessador para monitorização e controlo do E-82. Um display no armário de controlo informa sobre o estado actual de funcionamento do aerogerador. O painel de controlo do E-82 situa-se abaixo do display. O painel de controlo permite a operação do aerogerador a partir do armário de controlo.

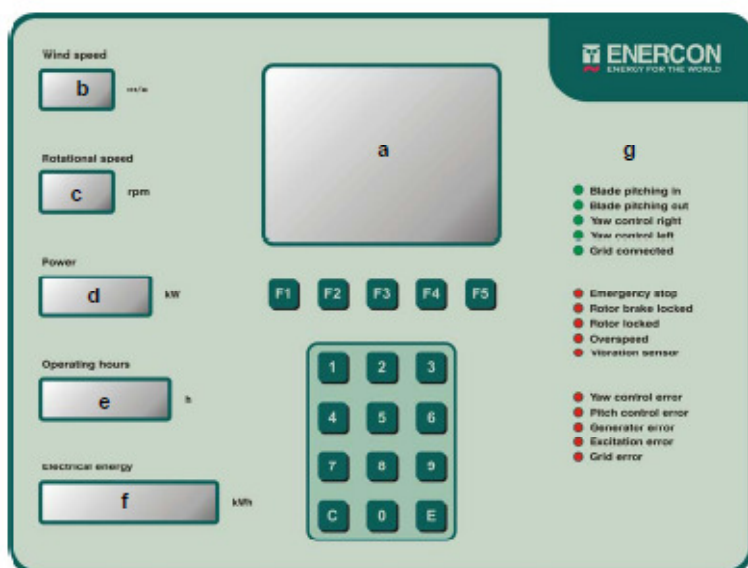


Figura 5.12: Display no armário de controlo do E-82

Os parâmetros indicados no display são: a) display; b) wind speed (velocidade do vento); c) rotational speed (velocidade de rotação); d) power (potência); e) operating

hours (horas de operação); f) electrical energy (energia eléctrica); g) painel de LED's. A descrição destes parâmetros encontra-se no Anexo N.

5.3.5 Nacelle

Na nacelle do E-82 é efectuada a transformação de energia mecânica para energia eléctrica. Situam-se na nacelle o gerador, a unidade de ajuste das pás (pitch), as unidades de pitch de emergência, o corpo do anel colector, o armário de controlo da nacelle, o guincho etc.

No revestimento superior da nacelle existe uma escotilha que pode ser aberta para permitir o acesso do técnico de manutenção ao conjunto anemómetro e às luzes de sinalização. Na figura no Anexo O é representado o aspecto geral dos componentes no interior e exterior da nacelle do E-82

5.3.6 Monitorização à distância (sistema SCADA)

Os aerogeradores da ENERCON ou parques eólicos vêm equipados com o sistema de monitorização à distância e de controlo SCADA (System Control and Data Acquisition). O sistema de ENERCON SCADA é composto por três componentes diferentes [40]:

- O programa SCADA no parque eólico que controla os aerogeradores e regista diversos dados (ver tabela na página seguinte).
- Com o software remoto SCADA o cliente pode entrar nos parques eólicos on-line, efectuar classificações on-line e fazer o "download" de dados para uma classificação posterior.
- Estes dados podem posteriormente ser classificados off-line com o SCADA-Database Software ou trabalhados com um programa de análise de dados (por exemplo, Excel).

Uma documentação completa sobre esta aplicação encontra-se no fornecimento do software. Uma descrição completa do sistema de monitorização à distância encontra-se juntamente com a descrição do programa de monitorização do aerogerador.

Funcionamento

Nas instalações individuais encontra-se o sistema perto do armário de controlo ou na estação de transferência, nos parques eólicos também na estação de transferência. Um PC industrial controla os aerogeradores no parque eólico. A monitorização à distância é um componente do sistema de controlo do aerogerador, no entanto trabalha independentemente do aerogerador.

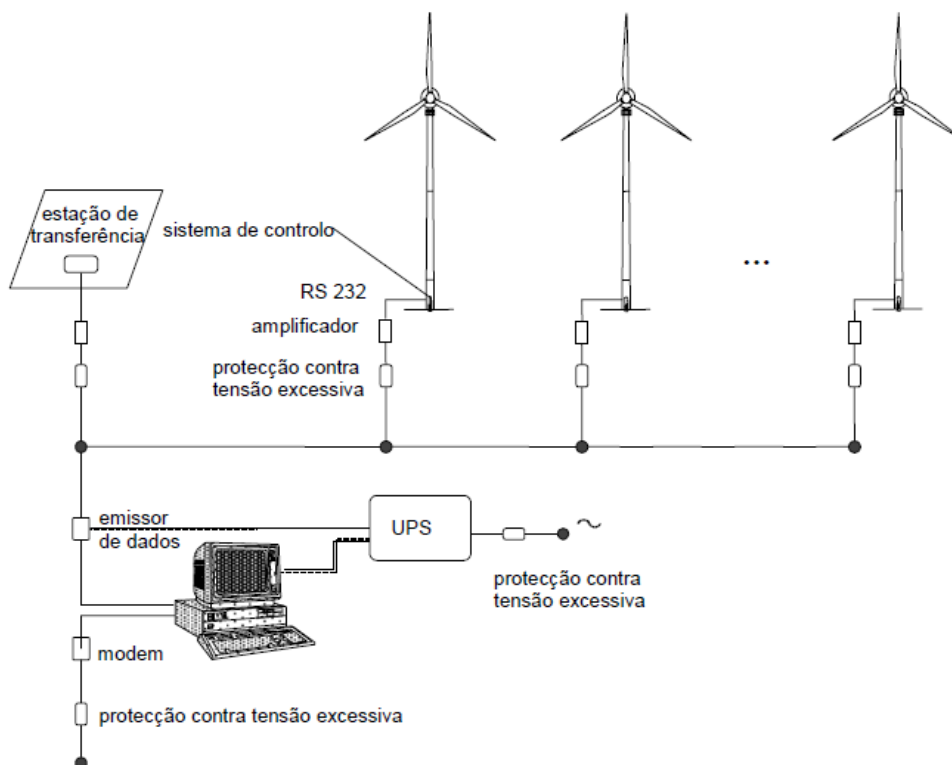


Figura 5.13: sistema de monitorização à distância para parques eólicos

Nos parques eólicos estão instalados cabos de comunicação através dos quais o bus de dados dos aerogeradores fica ligado ao sistema de monitorização à distância. O PC está equipado com um modem para a rede telefónica, a fim de poder comunicar com os outros aparelhos.

Do sistema de monitorização à distância SCADA, no aerogerador ou no parque eólico, são transferidos os dados actuais sobre o funcionamento, através da rede telefónica ou radiotelefónica por meio de um modem, para o sistema de monitorização à distância central, dos centros de manutenção da ENERCON. Adicionalmente podem ser

instalados sistemas de monitorização à distância e de controlo no cliente e na respectiva CEE de energia.

Monitorização de Dados

Os dados como velocidade do vento, rotação, geração, horas de operação, produção de energia, são calculados e produzidos por norma. Os intervalos dos cálculos são constantes (on-line), a cada 10 minutos, diariamente, semanalmente, mensalmente e anualmente. Estes dados podem ser indicados como gráfico ou como tabela. No caso de surgir uma falha no aerogerador os dados sobre o estado e sobre o aerogerador serão transmitidos de imediato para a monitorização central, através de um modem. Este processo repete-se até que a mensagem de falha seja transmitida com sucesso .

5.3.7 Curva de potência

Na figura 5.14 é representada a curva de potência do E-82. A curva de potência é obtida a partir de medições locais, onde um anemómetro regista as velocidades do vento e a potência eléctrica obtém-se através dos aparelhos de controlo do aerogerador. Ao observar-se a na tabela 5.5, o valor máximo do coeficiente de potência do E-82 é de 0,50, o que corresponde a 84% do limite de Betz, atingido à velocidade média do vento de 9 m/s. São atingidos coeficientes de potência de 0,5 que se devem em parte à alta eficácia das pás de rotor da ENERCON, que é reflectida nas curvas de potência medidas em todos os aerogeradores da ENERCON.

Este valor é bastante aceitável, uma vez que para baixas velocidades do vento, a eficiência do aerogerador não é importante, já que a energia extraída dos ventos não é muita [57]. Por outro lado para grandes velocidades, a eficiência também não necessita de ser elevada, primeiro porque a frequência de velocidades do vento muito elevadas é baixa, e depois porque há dificuldades de funcionamento por parte da turbina eólica, pelo que é desligada por motivos de segurança. Assim, o objectivo passa por ter um coeficiente de potência elevado para velocidades do vento mais frequentes, pois é onde se encontra grande parte da energia que será utilizada.

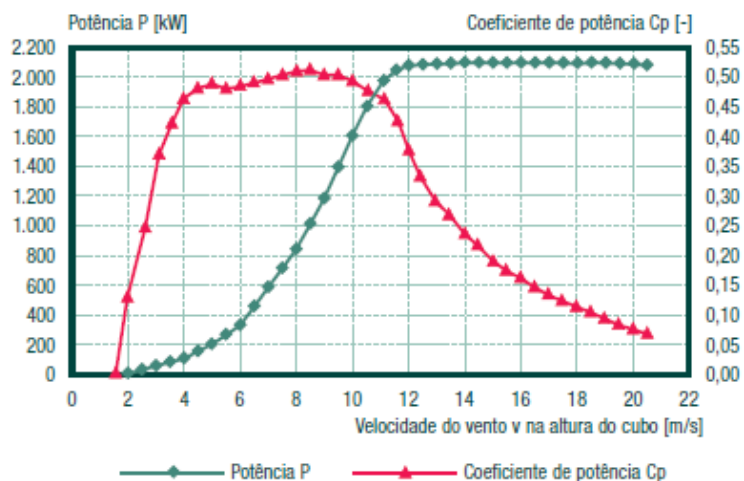


Figura 5.14 A curva de potência e a do coeficiente de potência, para os vários valores de velocidade do vento do E-82 [41]

Ao comparar-se a curva de potência do E-82 com a de outros aerogeradores conhecidos, como se observa na figura 5.14, conclui-se que esta surge logo de seguida à curva do NORDEX N-80, que apresenta a melhor curva de potência.

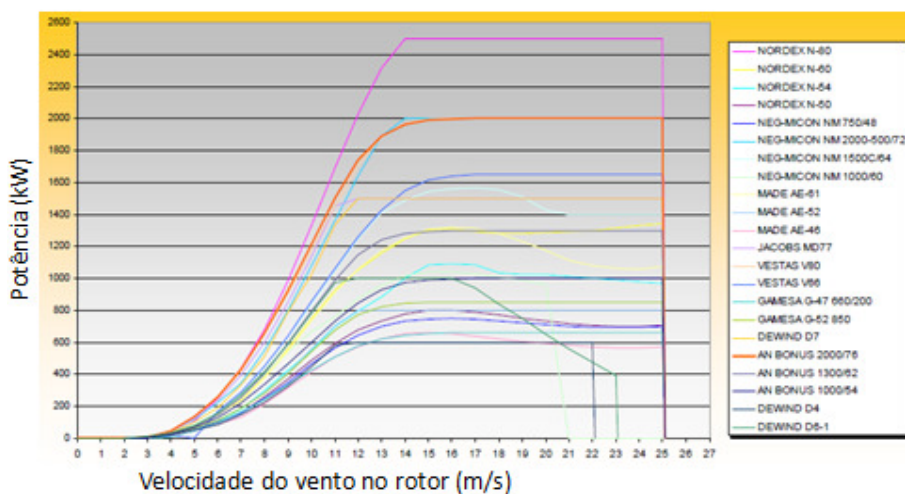


Figura 5.15 Curvas de potência dos aerogeradores mais utilizados [53].

Tabela 5.5: Os respectivos valores da potência e do coeficiente de potência, do E-82 para determinadas velocidades do vento, com massa específica do ar de $1,225\text{kg/m}^3$ [41].

Vento [m/s]	Potência (P) [kW]	Coeficiente de Potência (C_P)
1	0	0,00
2	3	0,12
3	25	0,29
4	82	0,40
5	174	0,43
6	321	0,46
7	532	0,48
8	815	0,49
9	1180	0,50
10	1580	0,49
11	1810	0,42
12	1980	0,35
13	2050	0,29
14	2050	0,23
15	2050	0,19
16	2050	0,15
17	2050	0,13
18	2050	0,11
19	2050	0,09
20	2050	0,08
21	2050	0,07
22	2050	0,06
23	2050	0,05
24	2050	0,05
25	2050	0,04

Síntese

Os aerogeradores de eixo horizontal de 3 pás são sem dúvida os mais indicados para instalar em parques eólicos.

O aerogerador E-82 da ENERCON, bem conhecido na Beira Interior, possui características técnicas bastante aceitáveis e uma curva de potência ao nível dos melhores aerogeradores no mercado.

Uma turbina eólica, de uma forma geral, é essencialmente constituída pela nacelle, rotor e torre fixa ao solo através da fundação. A monitorização à distância constitui nos dias de hoje uma mais-valia na manutenção dos parques eólicos.

Existe o inconveniente da energia gerada não poder ser armazenada na forma de energia eléctrica, como alternativa surge o armazenamento na forma mecânica (energia potencial).

CAPÍTULO

6

Impactes Ambientais e
Socioeconómicos

Paisagem

Ruído

Biodiversidade

Ocupação do Solo

Interferência Electromagnética

Socioeconómicos

6.1 Paisagem

Em termos paisagísticos, a questão não é consensual por lhe estarem inerentes opiniões pessoais, trata-se de uma questão com forte componente estética. A reacção desencadeada por um parque eólico é altamente subjectiva, enquanto alguns vêem as turbinas eólicas como um símbolo de energia limpa e parte integrante duma sociedade próspera, outros há que reagem de forma negativa a esta nova imagem.

As consequências do impacto visual têm sido minimizadas, sobretudo através da consciencialização das populações locais e geral, das virtudes da geração de energia eólica. Com a disseminação deste tipo de tecnologias e os efeitos positivos associados, o nível de aceitação melhora consideravelmente.

É ainda de salientar que durante a fase de construção (figura 6.1) os impactes negativos sobre a paisagem são a alteração de morfologia da paisagem, destruição do coberto vegetal, presença e circulação de maquinaria pesada e desordem visual com emissão de poeiras, resultante da execução das obras. [58].



Figura 6.1 – Montagem de um aerogerador, num parque eólico [I12]

Na fase de exploração, os impactes visuais surgem principalmente com a presença das infra-estruturas do parque eólico. Este nível de impacte deve-se em grande parte à visibilidade do parque eólico e da frequência e número de observadores a partir de locais acessíveis na sua envolvente. A instalação de parques eólicos em Portugal e na Beira Interior longe dos aglomerados populacionais, tem sido menos perturbador e consequentemente menos sensível a críticas.

No que diz respeito à integração paisagística de aerogeradores, em zonas planas geralmente opta-se por um padrão geometricamente simples, sendo também viável a colocação de aerogeradores ao longo de uma linha recta [20].

No caso concreto deste estudo na Beira Interior, a instalação de parques eólicos é comum em zonas montanhosas, e assim a solução mais viável é a colocação de aerogeradores ao longo da linha de cumeeada.

Segundo a EWEA, tendo em conta a necessidade de atenuar os impactes sobre a paisagem, as turbinas eólicas apresentam uma cor branca ou cinzento claro, sem brilho, prende-se com o facto de estas cores combinarem mais facilmente com a alteração constante da tonalidade do céu evitando demasiados reflexos. Em certos casos já surgem torres que apresentam na sua base um gradiente de tons verdes, para melhor integração paisagística.

A magnitude de impacto visual de um parque eólico depende sobretudo de algumas características locais tais como: a dimensão, o número de aerogeradores, a proximidade de aglomerados populacionais, e as características da paisagem [48].

No caso da Beira Interior, esta região sendo predominantemente montanhosa, está longe da observação diária e da presença humana, o que lhe confere um nível de impacto ambiental bastante reduzido. E o facto das turbinas eólicas terem hoje maior potência unitária, permitiu reduzir o seu número por parque eólico, o que consequentemente atenua a magnitude do impacto visual.

6.2 Ruído

A análise do ruído em parques eólicos assume particular importância devido ao impacto sonoro do funcionamento das turbinas eólicas, sobretudo em zonas mais sensíveis como é o caso de zonas habitadas nas proximidades.

O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos e das exigências de um mercado promissor em franco crescimento, permitiu um avanço considerável na diminuição do nível de ruído, produzido pelos aerogeradores. O problema em questão prende-se com factores como a aleatoriedade do funcionamento dos aerogeradores (i.e. a velocidade instantânea que pode mudar a qualquer momento quer seja no incremento ou redução desta), bem como a variação da frequência do ruído, uma vez que está directamente relacionado com a velocidade do vento incidente.

O ruído proveniente das turbinas eólicas em funcionamento deve-se sobretudo a dois factores de origem distinta: mecânico e aerodinâmico. O ruído mecânico tem a sua principal origem no funcionamento da caixa de engrenagens e do gerador. A transmissão do ruído mecânico também pode ser causada pela própria torre, através do contacto desta com a nacelle. Actualmente o ruído de origem mecânica deixou de constituir uma preocupação para os construtores, porque nos últimos anos a adopção de novas técnicas de engenharia na construção de aerogeradores, permitiu que os níveis de ruído diminuíssem para metade [20].

O ruído aerodinâmico é influenciado pela velocidade do vento incidente sobre as pás da turbina eólica, aumentando com a velocidade de rotação das mesmas. Desenvolvem-se pesquisas em novos modelos de pás (sobretudo na extremidade e bordo de fuga), procurando tirar um máximo de aproveitamento aerodinâmico com vista à redução do ruído, determinaram o aparecimento de novos modelos e concepções de formatos aerodinâmicos das pás [47]

A construção cuidadosa das pás dos aerogeradores constitui também um processo importante a fim de evitar a criação de defeitos nas pás, que apenas contribuem para o aumento do ruído emitido durante o funcionamento [47].

Os níveis sonoros da acção dos aerogeradores (a 350 m) apresentam valores entre 35 a 45 dB. O impacto do ruído numa população depende de vários factores entre os quais: a natureza do ruído produzido, as características e condições meteorológicas locais, o número de pessoas expostas e a tolerância ao ruído por parte destas [48].

Os parques eólicos na região da Beira Interior, com localização privilegiada longe dos aglomerados populacionais e em zonas montanhosas apresentam este impacto ambiental minimizado, sendo mais perceptível sobretudo para aqueles que contactam diariamente na manutenção destes parques eólicos.

6.3 Biodiversidade

A maior preocupação relativamente à fauna prende-se com o facto de as aves poderem colidir com as turbinas eólicas, devido à dificuldade de visualização. Outros factores como a caça, linhas de alta tensão ou tráfego de veículos estão entre as causas de morte das aves. Porém tem de ser levado em conta que o comportamento das aves e as taxas de mortalidade estão associados a cada espécie e lugar [59].

Estudos feitos pela ABC e AWEA, permitem concluir que o risco de mortalidade das aves, devido à colisão com as pás dos aerogeradores é reduzido, estando associado a condições de fraca visibilidade e corredores migratórios. Este tipo de acidentes surge como das últimas causas de morte das aves, com um valor de 0,1%. Durante a fase de obra, o impacto mais negativo faz-se sentir sobretudo na perturbação dos locais de repouso, alimentação, e reprodução de todas as espécies [20].

Fora das rotas de migração as aves raramente são atropeladas ou mesmo incomodadas pelas estruturas que visam a produção de energia eólica. Estudos com radares na Dinamarca demonstram que na zona de afectação das turbinas eólicas, as aves tendem a alterar a sua rota de voo (entre os 100 a 200 m), contornando os aerogeradores a distâncias seguras. Na Dinamarca é normal um grande número de ninhos de falcões nascerem nas torres dos aerogeradores [45]

Quanto à flora regista-se a eliminação de alguns elementos constituintes desta, resultantes das consequentes movimentações de terra, durante a fase de construção do parque eólico. Porém a sua recuperação é sustentável, se forem adoptadas medidas nesse sentido.

Durante a fase de exploração, as zonas que anteriormente à implementação do parque eólico, eram pouco acessíveis tornam mais vulneráveis as espécies que viam um refúgio seguro nestas áreas mais inóspitas e afastadas de actividade humana.

Assim torna-se necessário um estudo do impacto ambiental no local onde se pretende instalar um parque eólico, sobretudo se a região for densamente povoada por aves de hábitos migratórios.

6.4 Ocupação do solo

Grande parte da área onde se instalam parques eólicos fica fisicamente disponível para uso como antes, porque a superfície afectada limita-se à base dos aerogeradores e aos caminhos de acesso necessários. A área ocupada pelas turbinas eólicas e os serviços auxiliares é de apenas 2 a 5%, a área restante resulta das necessidades de distância entre os aerogeradores para evitar o fenómeno de interferência aerodinâmica [47].

A actual adopção de aerogeradores com potência unitária superior permite a redução do seu número, que por sua vez reduz a área total de solo a ocupar.

Se fizermos a analogia com a produção a partir de centrais hidroeléctricas esta ocupação corresponde à inundação de áreas, com a consequente destruição de ecossistemas e perda da possibilidade de utilização do solo. No caso da produção via energia eólica, a ocupação não é tão agressiva, não havendo a destruição do solo e dos ecossistemas afectados, e continuando a prevalecer a possibilidade de manutenção de alguns dos usos anteriores. Sendo o grau de reversibilidade deste tipo de impacte muito maior [60]. Numa fase inicial de construção do parque eólico o principal impacte no terreno resulta sobretudo da ocupação das zonas de implantação das obras. Certas áreas são apenas afectadas temporariamente, (período equivalente ao da

execução da obra) readquirindo as suas anteriores potencialidades aquando da conclusão da obra [20].

Para minimização do impacte referente ao factor ambiental em análise a utilização de caminhos já existentes na área afectada pelo parque eólico e o traçado dos caminhos complementares a acompanhar as curvas de nível, permite reduzir a movimentação das terras. Deve também existir o cuidado na escolha dos locais dos parques eólicos, de forma, a que estes possam coexistir com actividades anteriormente existentes, como por exemplo actividades agrícolas, pastagem de gado ou outras [48].

Em zonas montanhosas com fraca aptidão agrícola e interesse reduzido de ordem florestal, dadas as características em altitude e condições atmosféricas locais, é possível continuar a presenciar a utilização da área afecta ao parque eólico, para a criação de gado, como representado na figura 6.2



Figura 6.2 – Representação dum parque eólico em Espanha, que coexiste com a criação de gado e actividades agrícolas [113].

No caso da região da Beira Interior, em que a instalação de parques eólicos ocorre sobretudo em zonas montanhosas, e por vezes sem qualquer tipo de intervenção humana, a predominância de actividades na Beira Interior é a agricultura (Anexo D), que como já foi referido, pode funcionar harmoniosamente com a produção de energia eólica. Assim a magnitude deste tipo de impacto é pouco significativa.

6.5 Interferência Electromagnética

Os estudos levados a cabo pela EWEA demonstraram que o projecto quando pensado na questão das interferências por parte das ondas electromagnéticas, pode evitar qualquer distúrbio nos diversos sistemas de telecomunicações (como as emissões de televisão, radares, telemóveis, comunicações por satélite etc). No entanto pode não ser suficiente uma vez que qualquer grande estrutura em movimento pode produzir este tipo de interferência.

Os aerogeradores podem causar o referido distúrbio por reflexão dos sinais nas pás, de modo que um receptor próximo recebe um sinal directo e um reflectido. A interferência electromagnética deve-se porque o sinal reflectido é atrasado devido à diferença entre os comprimentos de onda alterados por causa do movimento das pás.

A interferência electromagnética é maior com materiais metálicos, uma vez que se tratam de materiais reflectores e mínima no caso de serem pás de madeira que absorvem. Este impacto está perdendo cada vez importância, uma vez que na fabricação dos modernos aerogeradores dá-se preferência ao uso de materiais à base de polímeros e de fibras não metálicas.

A fibra de vidro, que é utilizada na maioria das pás modernas, é parcialmente transparente às ondas electromagnéticas, o que conseqüentemente diminui o efeito da interferência [48].

A instalação apropriada de aerogeradores onde seja garantida determinada distância dos eixos de passagem das ligações ou a adopção de tecnologias como amplificadores de sinal pode evitar a interferência de ondas electromagnéticas [48].

6.6 Socioeconómicos

Ao contrário dos impactes anteriormente referidos, na área socioeconómica há a referir apenas impactes positivos. A criação de parques eólicos em zonas rurais estimula a economia nessa mesma região, como: a criação de emprego seja na construção,

operação ou manutenção do parque; as receitas resultantes dos terrenos cedidos; melhoria dos acessos a locais que anteriormente pareciam impenetráveis; dinamização da zona em si, nomeadamente por interesses turísticos, o que fomenta o desenvolvimento da actividade hoteleira, restauração entre outras.

Porém regista-se a intensificação do tráfego de veículos pesados, durante a fase de implementação, afectando com ruído e poeiras as comunidades locais. É ainda de salientar os possíveis conflitos com outros usos que poderão constituir um impacto negativo na exploração do parque eólico [48].

Na figura 6.4 observa-se que o sector eólico no final de 2009 empregava directamente e indirectamente 550.000 pessoas, com grande parte deste número caracterizado por mão-de-obra altamente qualificada. O futuro neste sector é de tal forma promissor, que as expectativas são de alcançar o primeiro milhão de postos de trabalho, no ramo da energia eólica.



Figura 6.3 – Representa o crescimento do número de empregados associados ao sector eólico nos últimos 5 anos, e as previsões até 2012 [2].

Síntese

Os diferentes grupos de interesse da sociedade, como organizações não governamentais, comunidade científica, comunicação social e comunidades locais

geram pressões para a melhoria do desempenho ambiental dos referidos parques eólicos. Os impactes paisagísticos, sonoros e ao nível da fauna e flora são os que causam maior apreensão. Os impactes ambientais referidos neste capítulo devem ser analisados e abordados com grande rigor, quando se escolhe o local de instalação de um parque eólico, a fim de tentar reduzir ao máximo o impacto consequente.

Assim aos promotores dos parques eólicos é geralmente exigido um estudo acerca dos impactes ambientais a incluir na fase de projecto.

A região da Beira Interior goza do facto de ter vastas áreas montanhosas com pouca utilização, e longe dos aglomerados populacionais, o que determina um reduzido impacte ambiental. Este facto permite melhorar a aceitação dos parques eólicos por parte das comunidades locais.

A nível socioeconómico, a criação de parques eólicos em zonas rurais estimula a economia nessa mesma região. O futuro neste sector é de tal forma promissor, que as expectativas são de alcançar o primeiro milhão de postos de trabalho, no ramo da energia eólica.

CAPÍTULO

7

Análise e Tratamento de Dados

Análise para Guarda e Castelo Branco

Análise do Parque Eólico da Gardunha

Análise do Parque Eólico do Vergão

7.1 Análise para Guarda e Castelo Branco

7.1.1 Caracterização do distrito da Guarda

A estação meteorológica que serviu de base às medições fornecidas pelo IM para este trabalho tem de coordenadas (latitude 40°32'N; longitude 7°16'W) a uma altitude de 1019 metros, encontrando-se a uma altura de 24 metros. As medições ocorreram de Janeiro de 1971 a Dezembro de 2000

Através dos dados da frequência da direcção dos ventos procedeu-se à elaboração da rosa-dos-ventos, tal como é observado na figura 9.1, nota-se a predominância dos ventos a Sul (23,5%) e também alguma a Noroeste (20,6%) e a Norte (15,8%).

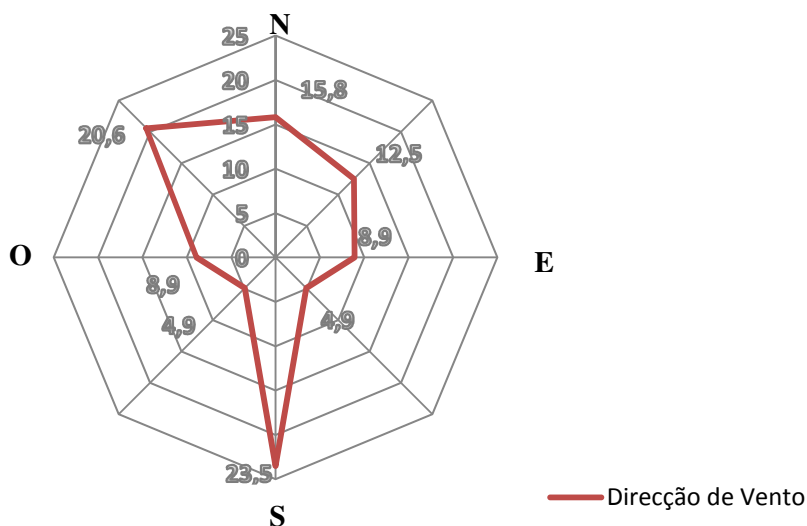


Figura 7.1: Rosa-dos-ventos elaborada em Excel a partir de dados fornecidos pelo IM para o distrito da Guarda (valores em %).

Apesar desta predominância a Sul, os ventos sentidos nesta zona são fracos, com uma média anual de 4,5 m/s (16,3 km/h) como representado na figura 9.2. Apresentando um máximo de 5,3 m/s (19,0 km/h) a Sul.

Os valores de menores velocidades do vento registaram-se nos meses de Junho a Agosto com velocidades abaixo dos 13 km/h (3,6 m/s). Meses estes que coincidem com os de maiores temperaturas médias registadas (entre os 16 e 19 °C).

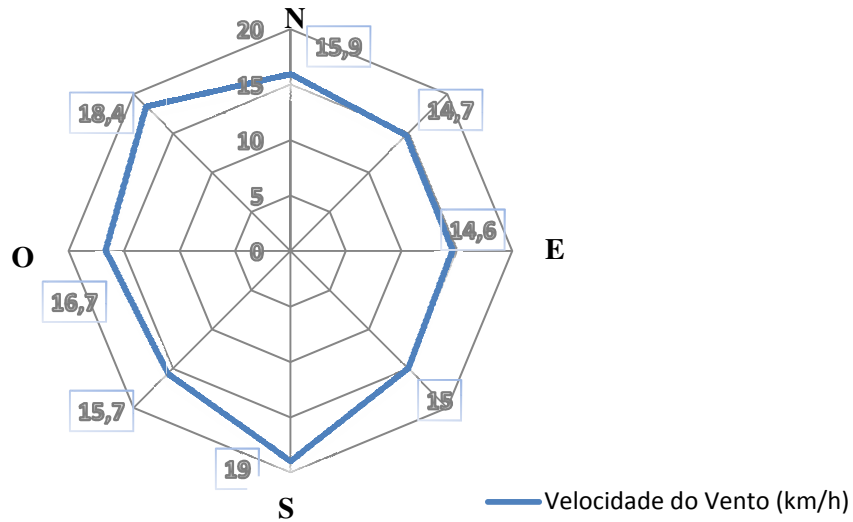


Figura 7.2: Gráfico com a distribuição das velocidades do vento em km/h, para os diferentes pontos cardeais. Elaborado em Excel com base nos dados fornecidos pelo IM para o distrito da Guarda.

Porém os valores médios de velocidade do vento anuais são baixos, como observados na figura 7.3 pela distribuição de Weibull, devem-se a altura a que se encontra o mastro anemométrico (24m), apesar de a uma altitude bastante elevada.

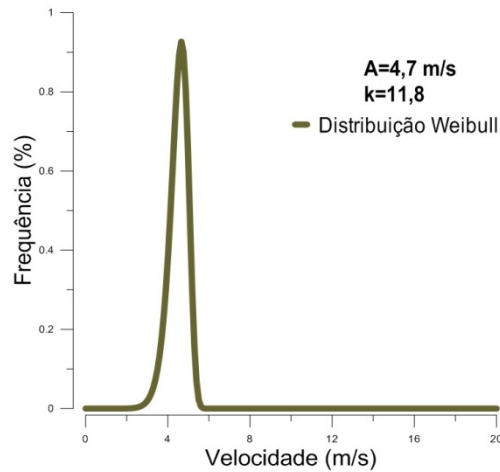


Figura 7.3: Elaboração em GRAFHER8 da Distribuição de Weibull característica da estação meteorológica da Guarda.

7.1.2 Caracterização do distrito de Castelo Branco

Os dados recolhidos pelo IM para a região de Castelo Branco através da estação meteorológica tem de coordenadas (latitude 39°50'N; longitude 7°28'W) a uma altitude de 386 metros, encontrando-se a uma altura de 10 metros. As medições ocorreram de Janeiro de 1986 a Dezembro de 2000.

A rosa-dos-ventos na figura 7.4, elaborada a partir dos dados, permite observar a predominância dos ventos a oeste (23,4%), com ventos de 4m/s (14,9 km/h). Este é quase o valor da velocidade mínima para geração de energia eólica. Apresenta como valor de velocidade média anual, 3,6 m/s (13,05 km/h), como ilustrado na figura 7.5.

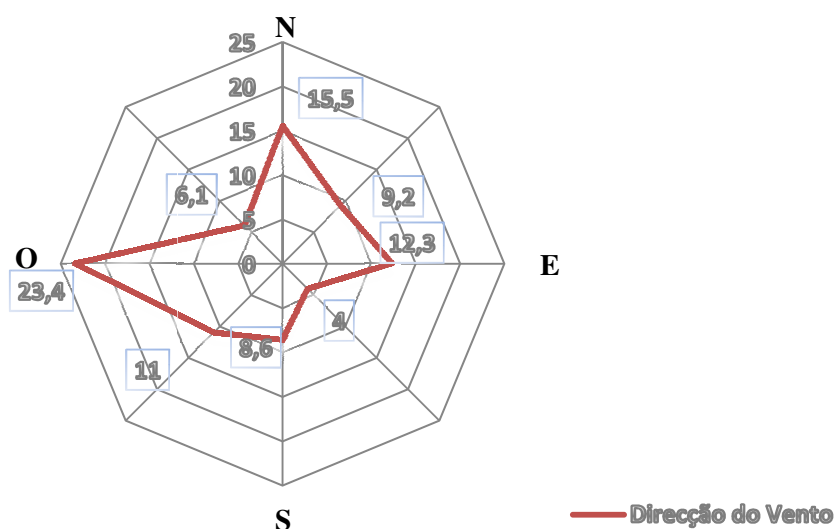


Figura 7.4: Rosa-dos-ventos elaborada em Excel a partir de dados fornecidos pelo IM para o distrito de Castelo Branco (valores em %).

Os valores de menores velocidades do vento registaram-se nos meses de Junho a Setembro com velocidades abaixo dos 15 km/h. Meses este coincidem com os de maiores temperaturas médias registadas (entre os 21 e 25 °C). (falta gráfico com este valores).

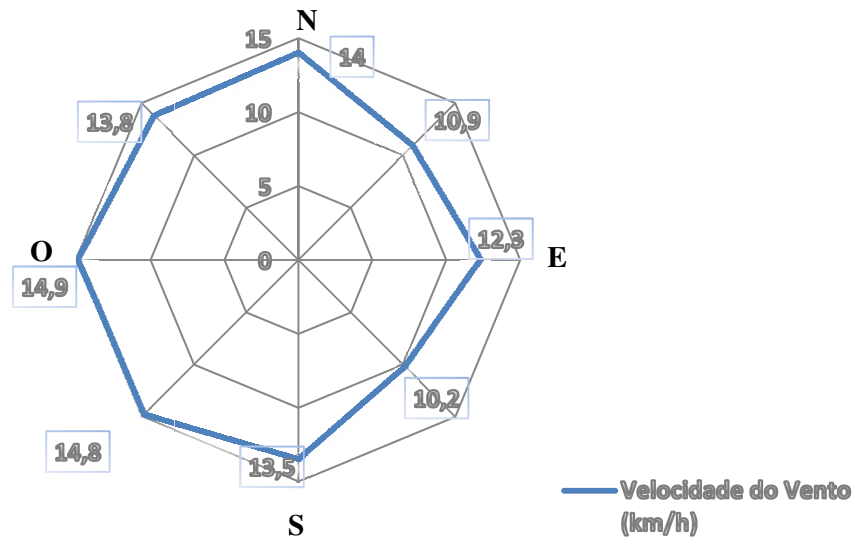


Figura 7.5: Gráfico com a distribuição das velocidades do vento em km/h, para os diferentes pontos cardiais. Elaborado em Excel com base nos dados fornecidos pelo IM para o distrito de Castelo Branco.

Na figura 7.6 está representada a distribuição de Weibull, que apresenta valores médios de velocidade do vento muito fracos, quando comparados com o distrito da Guarda, para isso contribui o facto do mastro anemométrico estar a uma altura de 10 metros, no entanto, aquando do estudo para instalação de um parque eólico as medições do vento e direcção são feitas a uma altura de 60 ou 80 metros, ou seja, à altura do rotor. E neste caso as velocidades do vento serão bem maiores.

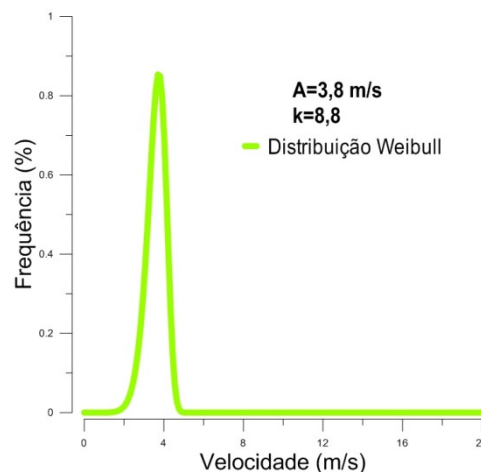


Figura 7.6: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull característica da estação meteorológica de Castelo Branco.

7.2 Análise do Parque eólico da Gardunha

A estação anemométrica do INETI encontra-se situada numa zona montanhosa a 1220 metros de altitude (figura 7.7). Tem como coordenadas (625750,4437825) (m), como representado na figura 7.8, onde se encontram as respectivas curvas de nível. Neste local encontra-se instalado o mastro anemométrico do tipo telescópico, com medições a duas alturas – anemómetro de copos a 10 metros e anemómetro de copos, com sensor de direcção a 20 metros de altura. Na base do mastro está instalado um sistema de aquisição e armazenamento de dados.



Figura 7.7 representação do mastro anemométrico da Gardunha [I14].

O terreno à volta do mastro, é essencialmente caracterizado por vegetação rasteira, condição esta que é favorável ao escoamento das massas de ar. Nas imediações existem apenas antenas de telecomunicações e retransmissões de sinais; longe dos grandes centros urbanos.

A figura 7.9 é uma representação a três dimensões da localização do mastro anemométrico. Aqui é possível observar que este se encontra instalado no cume duma montanha, que como referido anteriormente (ver capítulo 4.4), constitui um local com elevadas potencialidade para a geração de energia eólica.

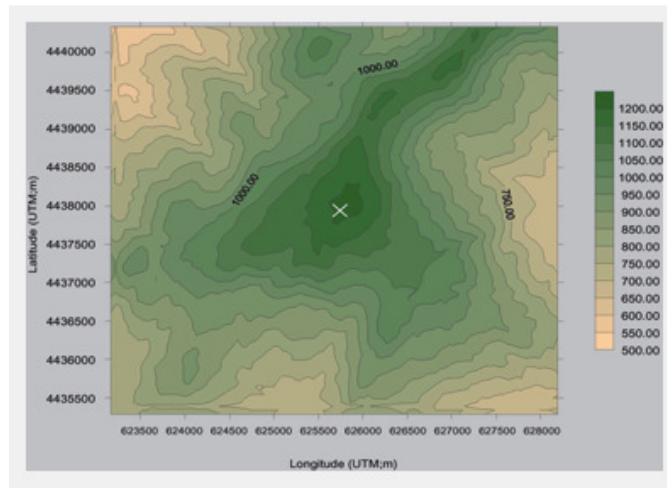


Figura 7.8: Mapa de curvas de nível representativo do local da estação anemométrica – IN32 da Gardunha [17].

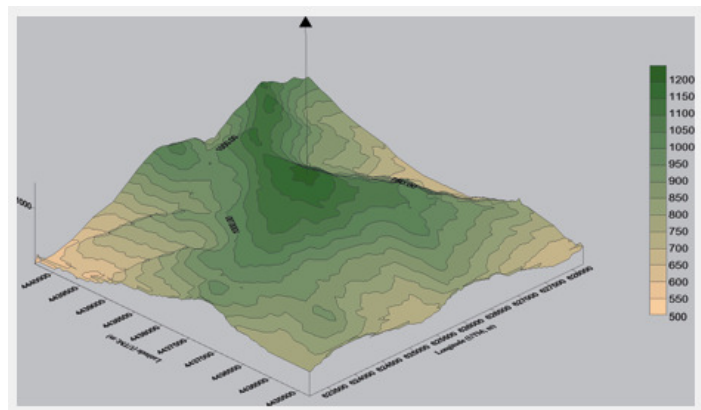


Figura 7.9: Maquete tridimensional representativa do local da estação anemométrica da Gardunha [17].

Na tabela 7.1, encontram-se os dados fornecidos pelo INETI, com as medições: da velocidade média do vento, para 10 e 20 metros de altura; fluxo de potência e os respectivos parâmetros da distribuição de Weibull (A e k) entre Abril de 1999 e Maio de 2000

Tabela 7.1: Valores médios mensais obtidos pela estação anemométrica do INETI, na Serra da Gardunha

Mês	Vel. média a 10 m [m/s]	Vel. média a 20 m [m/s]	Fluxo de potência a 20 m [W/m ²]	A a 20 m [m/s]	k a 20 m
Abril (1999)	7	7,7	551	8,7	1,94
Maio	5,8	6,4	227	7,1	2,85
Junho	5,4	5,9	207	6,6	2,32
Julho	4,7	4,9	123	5,5	2,26
Agosto	4,6	4,9	135	5,6	2,08
Setembro	5,4	5,9	297	6,6	1,7
Outubro	6,5	7	435	7,9	1,88
Novembro	7,3	8,3	581	9,4	2,3
Dezembro	7,9	8,4	743	9,4	1,85
Janeiro (2000)	5,1	5,4	218	6	1,69
Fevereiro	4,8	5,3	187	6	1,87
Março	5,4	6	275	6,7	1,83
Abril	8,8	9,6	735	10,7	3,17
Maio	3,9	4,3	106	4,8	1,77
MÉDIA	5,9	6,4	344	7,2	2,11

Os gráficos das figuras 7.10, 7.11 e 7.12 foram construídos a partir dos dados obtidos a 20 metros de altura no período de medições referido.

A velocidade do vento não é constante, esta sua intermitência é observada na figura 7.13. Como já verificado anteriormente, a velocidade do vento aumenta com a altura (ver capítulo 4.2.1). Para a altura de 20 metros, a velocidade média do vento ao longo do dia, é sempre superior, em relação à altura de 10 metros. O mesmo acontece ao longo do ano, como verificado na tabela 7.1.

A velocidade da massa de ar atinge o seu pico máximo às 19 horas, e valor mínimo às 12 horas. Isto pode dever-se em parte aos ventos de montanha, em que o ar frio e de maior densidade é deslocado encosta abaixo até atingir os vales. Por volta das 19 horas a temperatura começa a baixar, iniciando-se o período da noite, em que os planaltos arrefecem mais rapidamente, devido às perdas por radiação terrestre

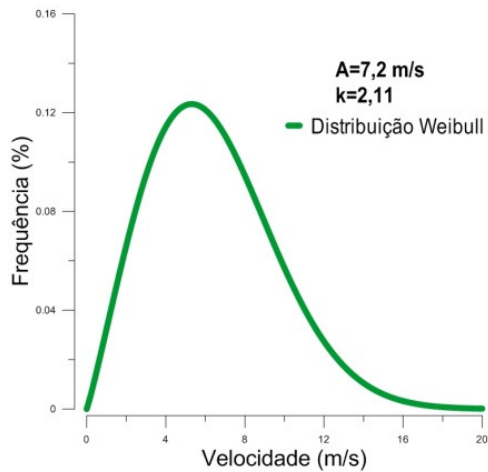


Figura 7.10: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull característica da estação anemométrica da Gardunha.

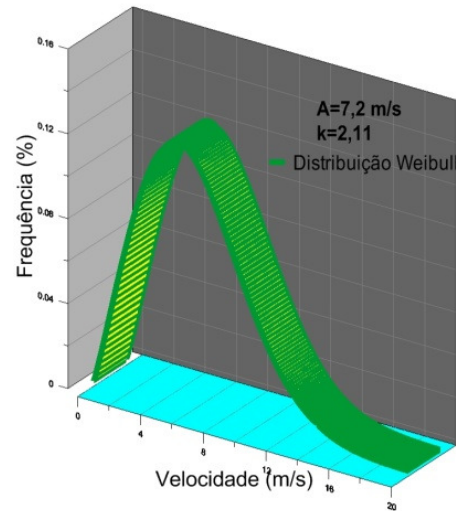


Figura 7.11: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull em perspectiva, característica da estação anemométrica da Gardunha.

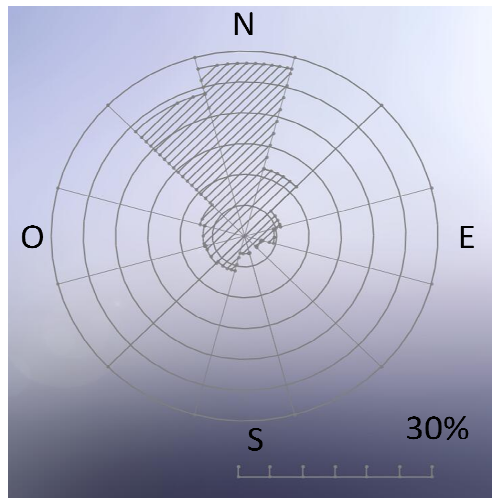


Figura 7.12: Rosa-dos-ventos característica da estação anemométrica da Gardunha.

No período da noite ocorre novamente o processo inverso, os planaltos arrefecem mais rapidamente, devido às perdas por radiação terrestre. Surgem assim os ventos de montanha, em que o ar frio e denso é deslocado encosta abaixo até atingir os vales.

As fases de menos vento ocorrem quando as temperaturas das zonas montanhosas e vales são semelhantes.

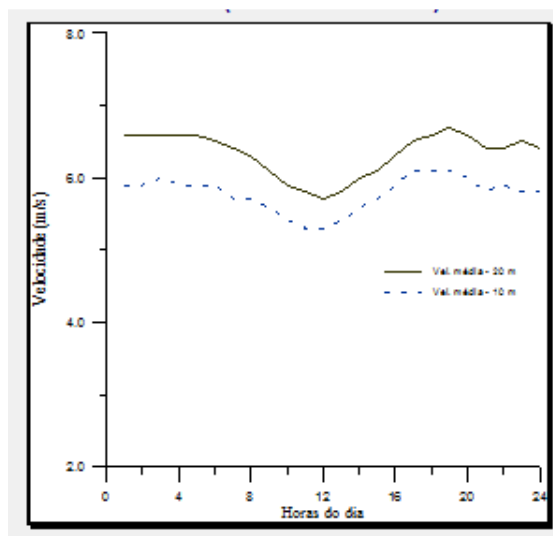


Figura 7.13 Velocidade do vento ao longo do dia na estação anemométrica da Serra da Gardunha, para alturas de 10 e 20 metros [17]

Para o parque eólico da Gardunha foram seleccionadas as 57 turbinas eólicas de potência nominal de 2MW.

Tendo em conta que o número de horas equivalentes à potência nominal neste período, foi de 2593,5 horas, então:

A energia produzida anualmente por este parque eólico é de 295659 MWh/ano, e o valor mensalmente produzido é de 24628 MWh/mês

A estação anemométrica da Serra da Gardunha encontra-se no interior duma área abrangida pela Rede Natura 2000 (uma área de 5892 hectares, com uma altitude máxima de 1227 metros) [17]. No Anexo P encontram-se as directivas das espécies protegidas a nível da fauna e flora

A nível de impacto ambiental, é uma área com grande potencialidade para a conservação, uma vez que resguarda espécies de grande importância. Esta zona encontra-se ainda vulnerável à actividade agrícola; incêndios florestais e destruição do coberto vegetal natural.

O impacto sonoro, é observado na figura 7.14, que representa o estudo efectuado para um parque de 4 MW na estação anemométrica da Serra da Gardunha, onde podem ser observadas isolinhas de nível sonoro. Este estudo permite assim ter uma noção do impacto sonoro que os 4 aerogeradores podem provocar na região seleccionada.

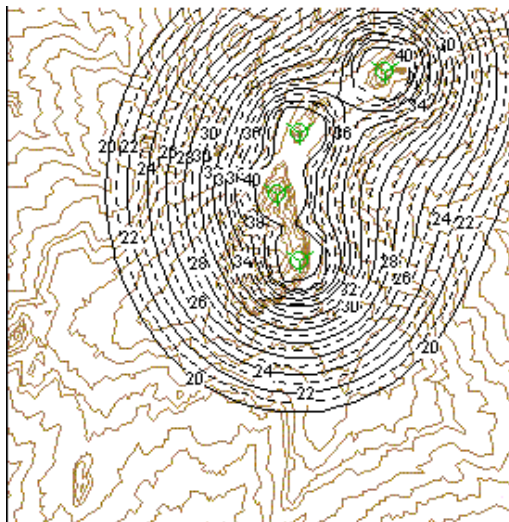


Figura 7.14: Impacto sonoro do funcionamento das turbinas eólicas [17].

7.3 Análise do Parque eólico do Vergão

O parque eólico do Vergão possui uma potência nominal máxima de 13 MW.

Os terrenos afectados pelo parque eólico, não se encontram incluídos em qualquer zona considerada ambientalmente sensível (como parques naturais ou Rede Natura 2000). Nas zonas envolventes, a este parque eólico, encontram-se áreas incluídas na Reserva Ecológica Natural, no entanto estas não foram alvo de intervenção.

O parque eólico é constituído por dez aerogeradores. Estes equipamentos são todos iguais, com uma potência nominal de 1,3 MW, cada um. Este parque está ligado à Rede Eléctrica Nacional, através de uma linha de média tensão de 60 kV, que o liga à sub-estação da Sertã.

O potencial eólico desta zona foi estimado a partir de dados cedidos pela entidade GENERG, que correspondem aos registos do mastro anemométrico localizado com

base nos critérios: de máxima cobertura espacial; de maior densidade energética e afastado de obstáculos e turbulência local.

O mastro anemométrico como localizado no mapa tem de coordenadas (586202;4400925) [m], a uma altitude de 631 metros.

O período de medições considerado para a realização dos cálculos decorreu entre 01/08/2000 e 31/07/2002. Na tabela 7.2 encontram-se as características resultantes das medições a 60 metros, para a localização e período de tempo definidos.

Tabela 7.2: representação dos valores do vento em função dos 12 sectores da rosa-dos-ventos, cada um com 30° (Parque eólico do Vergão).

Velocidade Média 6,9 m/s		Parâmetros de Weibull	
Sector(º)	Frequência (%)	A (m/s)	k
0	11	7,5	2,74
30	5	6,3	2,18
60	5	7,2	2,08
90	9	8,9	2,51
120	11	8,8	2,36
150	6	7,1	1,97
180	6	7,5	2,17
210	5	7,9	2,26
240	6	7,2	2,16
270	8	7,3	2,13
300	12	7,9	2,29
330	17	8,3	2,88
Média		7,8	2,32

O aerogerador utilizado é o Nordex N62 de 1300 kW, com uma altura de eixo de 60 metros. Em seguida procedeu-se à construção da rosa-dos-ventos (figura 7.17) e elaboração do gráfico da distribuição de Weibull (7.15 e 7.16).

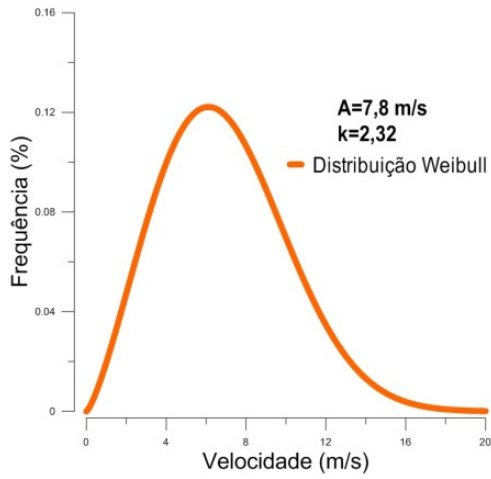


Figura 7.15: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull característica do Parque eólico do Vergão.

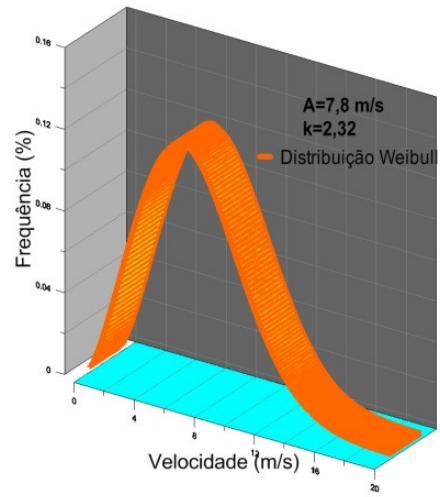


Figura 47.16: Elaboração em GRAFHER8 da distribuição de Weibull em perspectiva, característica do Parque eólico do Vergão.

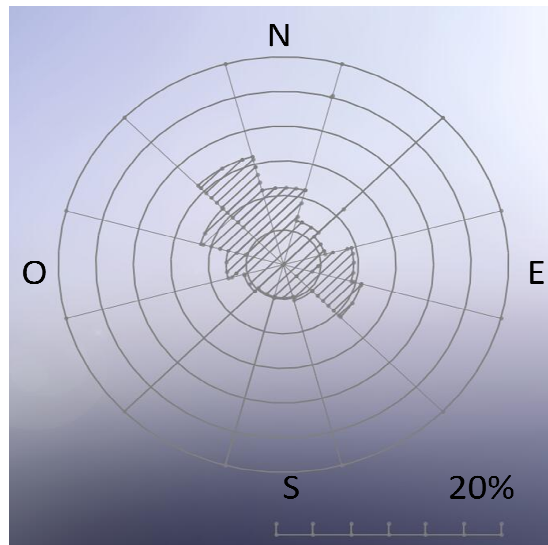


Figura 7.17: Rosa-dos-ventos característica do Parque eólico do Vergão.

Os dados obtidos para o período completo de 24 meses, e posteriormente analisado, permitiram uma representação do regime do vento para esta zona.

A velocidade média do mastro a 40 metros de altura foi de 6,7 m/s e para a altura de 60 metros (altura do rotor) foi de 6,9 m/s. Este incremento a dever-se à altura, como já analisado anteriormente.

A tabela 7.3 fornece os valores médios de produção de energia eléctrica, (MWh) e as horas equivalentes de funcionamento (h) longo do período de medições para cada turbina. Em média cada aerogerador produziu por ano 2595 MWh e em média trabalhou durante 2021 horas. Ou seja, a produção do parque eólico é de 25,95 GWh/ano (2021h). A tabela também refere a % de eficiência de cada turbina, com valores entre 96 e 99%: A turbina eólica caso esteja operacional, apenas começa a funcionar para velocidades acima de 2,5 m/s, o que nem sempre acontece daí que os valores, não atingem 100% de eficiência. A turbina nº5 é a que apresenta menor eficiência (96%), que poderá dever-se à sua localização menos privilegiada em relação às outras turbinas do parque eólico.

Tabela 7.3: Parâmetros calculados do parque eólico do Vergão.

Nº turbina	Eficiência (%)	Produção total (MWh)	Horas equivalentes (h)
1	98.8	2906,5	2236
2	96.2	2814,4	2165
3	96.3	2717	2090
4	96.3	2641,1	2032
5	96.0	2887,1	2221
6	96.1	2726,8	2098
7	96.6	2378,4	1830
8	96.3	2286	1758
9	96.4	2277,8	1784
10	98.5	2319,6	1997
Média		2595,47	2021,1
Total		25954,7	2021,1

Este parque encontra-se ligado á rede desde 2003, é dos mais antigos ligados á rede na Beira Interior, pelo que os seus aerogeradores têm uma potência unitária baixa.

Tendo em conta os valores de velocidade do vento, e as horas de funcionamento das turbinas ao ano; um aumento da potência unitária das turbinas eólicas possibilitaria um aumento bastante significativo na produção da energia eléctrica deste parque.

Para 2 MW, como foi estudo no caso anterior, em velocidades médias de aproximadamente 7 m/s atinge-se um bom rendimento.

No caso de estas turbinas terem uma potência de 2MW, permitiria um aumento de 50% na energia total produzida.

No entanto a substituição destas turbinas, implicaria custos elevadíssimos, que levaria anos a obter tal retorno. Apenas um estudo detalhado, poderia dizer se seria rentável ou não, a substituição dos aerogeradores, nesta fase ainda precoce de funcionamento (aproximadamente 7 anos)

CAPÍTULO

8

Conclusões

No Anexo Q, encontra-se o artigo publicado no ICREPQ'10 (*International Conference on Renewable Energies and Power Quality*), em Granada, que decorreu de 23 a 25 de Março de 2010. Nesse artigo consta o estudo desenvolvido até à data. Em Março os resultados ainda não eram tão conclusivos como agora.

Portugal tem acompanhado a tendência internacional de crescimento da Energia Eólica.

As medidas levadas a cabo nos últimos anos, por parte das entidades governamentais portuguesas, no que diz respeito ao sector energético, em geral e à energia eólica em particular. Permitiu o crescimento exponencial da potência instalada em Portugal.

E a região da Beira Interior não é excepção, pelo contrário, Castelo Branco é o 2º distrito nacional com maior potência instalada, apenas superado pelo distrito de Viseu. O levantamento dos Parques Eólicos elaborados no Capítulo 3 permite afirmar que Castelo Branco possui 432,5 MW e a Guarda 162,5 MW de potência instalada.

A região da Beira Interior, possui encostas com grandes desníveis de altitude, planaltos (de elevadas altitudes) e vales de grandes extensões, acompanhados de baixas temperaturas, sem grandes barreiras como o elevado índice de construção. Esta região caracteriza-se por uma actividade agrícola importante, mas com muitos campos incultos.

A Beira Interior apresenta assim potenciais condições ao aproveitamento da energia proveniente do vento. Porém, a distribuição da rede eléctrica é desigual, concentrando-se, na sua maioria, nas regiões do litoral. Esta limitação constitui um problema, uma vez que incrementa o custo do projecto (pela necessidade de construir linhas de grande extensão) e diminui a fiabilidade do serviço.

A nível ambiental, a crescente necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa, veio assim estimular o sector eólico. No entanto, as principais limitações residem nas zonas com algum tipo de restrição ambiental. O impacte ambiental consequente da implementação de parques eólicos não pode ser desprezado, e é aos promotores destes parques que se exige um estudo prévio das consequências ambientais.

Os diversos tipos de impactos ambientais abordados no Capítulo 6, são minimizados na região alvo deste estudo, devido ao facto de ter uma baixa densidade populacional, extensas áreas sem qualquer tipo de ocupação humana. Isto aliado ao facto de aerogeradores com uma potência unitária cada vez maior e com a actividade agrícola a funcionar harmoniosamente com a geração de energia eólica.

Os valores de A e k da Distribuição de Weibull elaborada neste trabalho com base nos dados fornecidos pelo IM, demonstram que a zona em causa não possui condições aceitáveis à produção de energia eólica. Com velocidades médias de 4 m/s (Castelo Branco) e 4,5 m/s (Guarda) a oscilarem entre os 2 e os 6 m/s são velocidades baixas que não tornam viável a implementação de um parque eólico. Porém é preciso levar em conta que estas medidas de velocidade do vento foram recolhidas a 10 metros (Castelo Branco) e a 24 metros (Guarda). Assim estes valores podem induzir em erro, uma vez que os aerogeradores possuem alturas de 60 e 80 metros.

Como foi visto no Capítulo 4, a velocidade do vento varia proporcionalmente com a altura. Ou seja se as medições tivessem ocorrido a 80 metros de altura, haveria ganhos na velocidade do vento.

No caso do Parque Eólico da Gardunha, apesar de os dados fornecidos terem sido recolhidos a uma altura semelhante (20 metros), foram alcançados valores de A e k bem mais satisfatórios. Com as velocidades do vento a concentrarem-se entre os 6 e 8 m/s. Por seu lado, o Parque Eólico do Vergão apresenta uma velocidade média do vento ligeiramente superior (a 60 metros de altura), e conseqüentemente um valor de A da Distribuição de Weibull igualmente superior.

O Parque Eólico da Gardunha leva vantagem em relação ao Parque Eólico do Vergão, nos números de horas de funcionamento equivalentes à potência nominal (2593,5 *versus* 2021,1 h).

O Parque Eólico da Gardunha produz aproximadamente num mês o que o do Vergão produz num ano, apesar de ter uma potência instalada 9 vezes superior (aproximadamente).

Avaliação do potencial eólico exige um estudo prévio rigoroso das condições locais: velocidade média; a faixa de frequência das velocidades; direcção predominante dos ventos e o ajuste dos dados à Distribuição de Weibull. E dadas as dificuldade de armazenamento desta energia seria uma mais valia, o projecto ser pensado em conjunto com a energia hídrica.

Consideram-se assim atingidos os objectivos inicialmente propostos para esta dissertação. Acreditando-se ter neste trabalho uma contribuição positiva e estimulante no aproveitamento dos ventos na Beira Interior.

Uma autêntica relação de simbiose pode ser criada entre a Beira Interior – com problemas cada vez mais acentuados na criação de postos de trabalho e riqueza local – e o Sector Eólico – na procura contínua de espaços cada vez maiores, melhores e imunes de críticas sociais.

Para trabalhos futuros, recomenda-se uma recolha de medições mais vasta, destinada à análise de locais potenciais de produção eólica, visando a determinação mais exacta de zonas da Beira Interior melhor adequadas à geração deste tipo de energia. Esta recolha deverá respeitar altura ideal à medição (altura do rotor).

Referências
Bibliográficas

Tradicional

1. MEI, *Políticas Energéticas*. 2008, Ministério da Economia e Inovação.
2. WWEA, *World Wind Energy Report 2009*. 2010, World Wind Energy Association WWEA 2010
3. DGEG, *Estatísticas rápidas*, in *Energias Renováveis*, D.G.d.E.e. Geologia, Editor. 2009.
4. INEGI, *Energia Eólica*. Dezembro 2007, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial: Leça do Balio.
5. Flórez, J.S., *A ENERGIA RENOVÁVEL É O FUTURO*, in *Departamento de Geodésia – IG/UFRGS*. 2005, Instituto de Geociências.
6. EDP, *Relatório e contas 2008*.
7. DWTMA, *Danish Wind Turbine Manufacture´s Association*. 1995.
8. Álvarez, C., *Energia Eólica*. 2006.
9. Castro, R.M.G., *Energias Renováveis e Produção Descentralizada*, in *DEEC / Área Científica de Energia*. 2009, UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA.
10. MEI, *Eficiência Energética e Energias Endógenas*. 2001, Ministério da Economia e Inovação.
11. MARTINS, J.R.F.e.F.R., *VENTOS DE MUDANÇA. A ENERGIA EÓLICA EM PORTUGAL.*, in *Faculdade de Ciências Sociais e Humanas*. 2005, Universidade Nova de Lisboa.
12. Marques, C.A., *A Serra da Estrela : estudo geográfico*. Peninsulares. Especial 44. 1996, Lisboa: Assírio & Alvim. 124 p.
13. Raposo, F.H., *Beira Alta : com um abraço total à Serra da Estrela*. Mobil nos caminhos de Portugal vol. 4. 1987, Mem Martins: Mobil Oil Portuguesa.
14. Gomes, P., *Seia : porta aberta para a Serra da Estrela*. 2a. ed. 2002, Paços de Ferreira Portugal: Héstia editores. 136 p.
15. Simões, V., *A Serra da Estrela e as suas beiras*. 1979, Lisboa: Simões. 95 p., 2 fold. leaves of plates.
16. Pina, I.C., *A encosta ocidental da Serra da Estrela : um espaço rural na Idade Média*. Patrimonia historica. Dissertações. 1998, Cascais: Patrimonia. 136 p.
17. INETI, *Base de Dados do Potencial Energético do vento em Portugal 2000*: Unidade de Energia Eólica e dos Oceanos
18. Ferreira, A., *Caracterização de Portugal Continental*. 1998.
19. Ribeiro, C.M.F., *Circuito de Interface para Ligação de um Gerador Eólico à Rede*, in *Escola de Engenharia*. 2008, Universidade do Minho.

20. Mendes, L., *A Energia Eólica e o Ambiente*, 2002, Alfragide.
21. Gipe, P., *Wind power : renewable energy for home, farm, and business*. Rev. and expanded ed. 2003, White River Junction, Vt.: Chelsea Green Pub. Co. xii, 496 p.
22. *Circulação Geral da Atmosfera. Circulação Média à Superfície. Circulações Locais*. 2007, Proclira - Clima e Ambiente.
23. Johansson, T.B., *The Potentials of Renewable Energy*, in *International Conference for Renewable Energies*. 2004: Bonn.
24. Johansson, T.B. and L. Burnham, *Renewable energy : sources for fuels and electricity*. 1993, Washington, D.C.: Island Press. 1160 p.
25. Vianna, A., *Manual de Aplicação de Sistemas Descentralizados de Geração de Energia Elétrica para projetos de Eletrificação Rural – Energia Eólica – versão 1*. 2000, CEPEL - EMPRESA DO SISTEMA ELETROBRÁS.
26. Dutra, R.M., *Técnico-Económica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro*. 2001, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro.
27. Blessman, J., *O vento na engenharia estrutural*. 1995, Porto Alegre.
28. Troen, I., E.L. Petersen, and Commission of the European Communities. Directorate-General for Science Research and Development., *European wind atlas*. 1989, Roskilde, Denmark: Published for the Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research, and Development, Brussels, Belgium by Risø National Laboratory. 656 p.
29. Wegley, H.L., J.V. Ramsdell, M.M. Orgil, R.L. Drake, *A Siting Handbook for Small Wind Energy Conversion Systems*. 1980, Washigton.
30. Hiester, T.R.e.W.T.P., *The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems*. 1983, New York.
31. Gipe, P., *Wind power for home & business : renewable energy for the 1990s and beyond*. A real goods independent living book. 1993, Post Mills, VT: Chelsea Green Pub. Co. xviii, 413 p.
32. Elliot, D., *Renewable Energy and Sustainable Futures 2000*: Great Britain. p. 261-274.
33. Plate, E.J., *Engineering meteorology : fundamentals of meteorology and their application to problems in environmental and civil engineering*. Studies in wind engineering and industrial aerodynamics 1. 1982, Amsterdam ; New York
34. Meroney, R.N., *Fluid Dynamics of Flow over Hills/Mountains – Insigths Obtained trough Physical Modeling*, in *Seminário de Escoamentos em Terrenos Complexos, Universidade de Coimbra*. 1991: Coimbra.

35. Marques da Silva, F., *Caracterização do Recurso Eólico*, T.e.I.-I. Instituto Nacional de Engenharia, Editor. 1996: Lisboa.
36. Meroney, R.N. and B. Bienkiewicz, *Computational wind engineering 2 : proceedings of the 2nd International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE 96), Fort Collins, Colorado, USA, August 4-8, 1996*. 1997, Amsterdam ; New York: Elsevier. xvii, 998 p.
37. Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação (Portugal), *Energia Eólica: Identificação e Caracterização do Recurso*. 2003, INETI: Lisboa.
38. Terciete, R., *A Energia Eólica e o meio Ambiente* in *Departamento de Energia*. 2002, UNICAMP - Faculdade de Engenharia Mecânica.
39. Lopes, A.M., *Produção Eólica e Enquadramento Técnico-Económico em Portugal*. 2009, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.
40. Pinho, A.M., *Gestão de Projectos de Parques Eólicos – Contributos para a melhoria do processo*, in *Especialização em Construções*. 2008, FEUP.
41. ENERCON, *Technical Description E-82*. 2005.
42. Justus, C., *Vent et performances des éoliennes*. 1980, Paris.
43. Pinheiro, L.d.M.G., *Estudos da geração eólico-eléctrica levando em consideração as características dos ventos.*, in *Centro de Tecnologia Programa de Graduação em Engenharia Eléctrica*. 2009, Universidade Federal do Ceará.
44. Estanqueiro, P.R.e.A., *Guia de Projecto Eléctrico de Centrais Eólicas*. 2003: Recife.
45. DEWI, *Environmental Aspects and Acceptance of Wind Energy*, D.W. Institut, Editor. 1996.
46. Oliveira, D.P.d.R.G.S.d.S.L.G.P.C.d.S.d., *Energia Eólica*. Maio 2008, Fundação Escola Técnica Liberato Salzano Vieira da Cunha: Novo Hamburgo.
47. McGowan, J.G., Connors, S.R., *Windpower: A Turn os the Century Review*. 2000, Annual Review Energy and the Environment. p. 147-197.
48. Miranda, A.S.d.C.R., *"O PAPEL DA AIA NA MELHORIA DA QUALIDADE DOS PROJECTOS NO CASO DOS PARQUES EÓLICOS"* 2007, Instituto Superior Técnico.
49. Manwell, J.F., J.G. McGowan, and A.L. Rogers, *Wind energy explained : theory, design, and application*. 2nd ed. 2009, Hoboken, NJ: John Wiley.
50. Renewable Energy Strategy Group (Ireland), *Strategy for intensifying wind energy deployment*. 2000, Dublin: Stationery Office. vi, 124 p.
51. Pereira, E.J.C., *Motores e Geradores*. 2002.

52. IEEE, *Efficiency Motors with InproSeal*, in *IEEE 841™ 2001*, WEG, Editor. 2001: USA.
53. Blanca, U.t.n.-F.B., *Curso de Energía Eolica*. 2007: Buenos Aires, Argentina.
54. Gasch, R. and J. Twele, *Wind power plants : fundamentals, design, construction and operation*. 2002, Berlin
55. Pereira, F.R.M., *O aproveitamento da energia eólica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2008.
56. INEGI, *Parques eólicos em portugal 2009*, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial.
57. EUREC Agency., *The future for renewable energy : prospects and directions*. 1996, London: James & James. xiv, 209 p.
58. Serrano, J.M.R.e.M.L.T., *Identificación de Impactos Ambientales Significativos en la Implantación de Parques Eólicos* in *Instituto Universitario de Geografía*, Universidad de Alicante.
59. Surugiu, L.P., I., *37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC)*. 2002, Piscataway, NJ: Institute of Electrical and Electronics Engineers. xvi, 814 p.
60. Antunes, P., *ESTUDO sobre SECTOR ELÉCTRICO e AMBIENTE*. 2003, Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos: Lisboa.

Internet

- [I1] <http://www.canwea.ca/>
- [I2] <http://www.mme.gov.br/programas/proinfra/>
- [I3] <http://www.irena.org/>
- [I4] www.snig.pt
- [I5] <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/meio-ambiente-energia-eolica/energia-eolica-4.php>
- [I6] www.reuk.co.uk/Darrieus-Wind-Turbines.htm
- [I7] <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrieus-windmill.jpg>
- [I8] <http://engambiente3.blogspot.com/2007/08/turbina-de-eixo-vertical.html>
- [I9] <http://scienceservice.si.edu/pages/100001.htm>
- [I10] http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutoriallogsm1/pagina_3.asp
- [I11] http://www.enercon.de/en/_home.htm

[I12] <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=222671&page=42>

[I13] <http://plataformadefensagistreo.blogspot.com/2009/02/durante-su-visita-valencia-de-don-juan.html>

[I14] http://www.ineti.pt/projectos/descricao_projecto.aspx?tab=pag12159&id=299&t
=

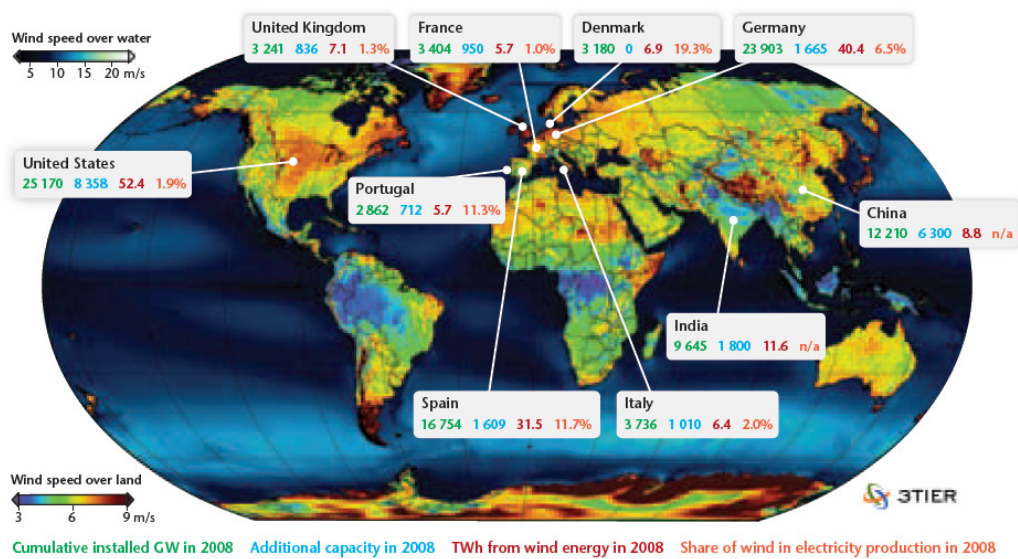
[I15] <http://www.ammonit.com/es/productos/sensores/anemometro>

[I16] <http://e-eolica.blogspot.com/>

[I17] <http://www.ren.pt>

Anexos

Anexo A - Representa a situação do mercado de energia eólica, no final de 2008 nos principais países produtores desta energia no Mundo. Analisa-se a capacidade acumulada e adicionada nesse mesmo ano, bem como a energia eólica produzida (em TWh) e a percentagem equivalente de energia eléctrica de origem eólica.



Anexo B – Representa a capacidade total instalada no final de 2009, 2008, 2007 e 2006 (MW). Para o ano de 2009, apresenta ainda a capacidade adicionada (MW) e a taxa de crescimento nesse mesmo ano (%) [2].

Position 2009	Country / Region	Total capacity end 2009 [MW]	Added capacity 2009 [MW]	Growth rate 2009 [%]	Position 2008	Total capacity end 2008 [MW]	Total capacity end 2007 [MW]	Total capacity end 2006 [MW]
1	USA	35.159,0	9.922,0	39,3	1	25.237,0	16.823,0	11.575,0
2	China	26.010,0	13.800,0	113,0	4	12.210,0	5.912,0	2.599,0
3	Germany	25.777,0	1.880,0	7,9	2	23.897,0	22.247,4	20.622,0
4	Spain	19.149,0	2.460,0	14,7	3	16.689,0	15.145,1	11.630,0
5	India	10.925,0	1.338,0	14,0	5	9.587,0	7.850,0	6.270,0
6	Italy	4.850,0	1.114,0	29,8	6	3.736,0	2.726,1	2.123,4
7	France	4.521,0	1.117,0	32,8	7	3.404,0	2.455,0	1.567,0
8	United Kingdom	4.092,0	897,0	28,1	8	3.195,0	2.389,0	1.962,9
9	Portugal	3.535,0	673,0	23,5	10	2.862,0	2.130,0	1.716,0
10	Denmark	3.497,0	334,0	10,6	9	3.163,0	3.125,0	3.136,0
11	Canada	3.319,0	950,0	40,1	11	2.369,0	1.846,0	1.460,0
12	The Netherlands	2.240,0	5,0	0,2	12	2.235,0	1.747,0	1.559,0
13	Japan	2.056,0	176,0	9,4	13	1.880,0	1.528,0	1.309,0
14	Australia	1.877,0	383,0	25,6	14	1.494,0	817,3	817,3
15	Sweden	1.579,0	512,0	48,0	16	1.066,9	831,0	571,2
16	Ireland	1.260,0	233,0	22,7	15	1.027,0	805,0	746,0
17	Greece	1.109,0	119,0	12,0	18	989,7	873,3	757,6
18	Austria	995,0	0,0	0,0	17	994,9	981,5	964,5
19	Turkey	796,5	463,1	138,9	25	333,4	206,8	64,6
20	Poland	666,0	194,0	41,1	19	472,0	276,0	153,0
21	Brazil	600,0	261,5	77,3	24	338,5	247,1	236,9
22	Belgium	555,0	171,0	44,6	22	383,6	286,9	194,3
23	New Zealand	497,0	172,0	52,9	26	325,3	321,8	171,0
24	Chinese Taipei	436,0	78,0	21,8	23	358,2	279,9	187,7
25	Norway	431,0	2,0	0,5	20	429,0	333,0	325,0
26	Egypt	430,0	40,0	10,3	21	390,0	310,0	230,0
27	Mexico	402,0	317,0	372,9	34	85,0	85,0	84,0
28	Korea (South)	364,4	86,4	31,1	27	278,0	192,1	176,3
29	Morocco	253,0	129,0	104,0	32	124,0	125,2	64,0
30	Bulgaria	214,2	56,7	36,0	28	157,5	56,9	36,0
31	Hungary	201,0	74,0	58,3	31	127,0	65,0	60,9
32	Czech Republic	191,0	41,0	27,3	29	150,0	116,0	56,5
33	Finland	147,0	4,0	2,8	30	143,0	110,0	86,0
34	Estonia	142,3	64,0	81,8	36	78,3	58,6	33,0
35	Costa Rica	123,0	49,5	66,9	37	74,0	74,0	74,0
36	Lithuania	91,0	37,0	68,0	38	54,4	52,3	55,0
37	Ukraine	90,0	0,0	0,0	33	90,0	89,0	85,6
38	Iran	82,0	0,0	0,0	35	82,0	66,5	47,4
39	Chile	78,0	58,0	288,6	47	20,1	20,1	2,0
40	Nicaragua	40,0	40,0	new	new	0,0	0,0	0,0
41	Luxembourg	35,3	0,0	0,0	39	35,3	35,3	35,3
42	Philippines	33,0	8,0	31,8	42	25,2	25,2	25,2
43	Argentina	29,8	0,0	0,0	41	29,8	29,8	27,8
44	Jamaica	29,7	9,0	43,5	44	20,7	20,7	20,7
45	Latvia	28,5	1,6	5,9	40	26,9	26,9	26,9

Position 2009	Country / Region	Total capacity end 2009 [MW]	Added capacity 2009 [MW]	Growth rate 2009 [%]	Position 2008	Total capacity end 2008 [MW]	Total capacity end 2007 [MW]	Total capacity end 2006 [MW]
46	Croatia	27,8	9,6	52,9	50	18,2	17,2	17,2
47	Netherlands Antilles	24,3	12,0	97,6	54	12,3	12,3	12,0
48	South Africa	21,8	0,0	0,0	43	21,8	16,6	16,6
49	Guadeloupe	20,5	0,0	0,0	45	20,5	20,5	20,5
49	Uruguay	20,5	0,0	0,0	46	20,5	0,6	0,2
51	Colombia	20,0	0,0	0,0	49	19,5	19,5	19,5
51	Tunisia	20,0	0,0	0,0	48	20,0	20,0	20,0
53	Switzerland	17,6	4,0	29,0	52	13,8	11,6	11,6
54	Russia	16,5	0,0	0,0	51	16,5	16,5	15,5
55	Romania	14,0	7,0	100,0	56	7,0	7,8	2,8
56	Guyana	13,5	0,0	0,0	53	13,5	13,5	13,5
57	Vietnam	8,8	7,5	600,0	66	1,3	0,0	0,0
58	Cuba	7,2	0,0	0,0	55	7,2	2,1	0,5
59	Israel	6,0	0,0	0,0	57	6,0	6,0	7,0
59	Slovakia	6,0	0,0	0,0	58	6,0	5,0	5,0
59	Pakistan	6,0	0,0	0,0	58	6,0	0,0	0,0
62	Faroe Islands	4,1	0,0	0,0	60	4,1	4,1	4,1
63	Cape Verde	2,8	0,0	0,0	62	2,8	2,8	2,8
64	Ecuador	2,5	0,0	0,0	61	4,0	3,1	0,0
65	Mongolia	2,4	0,0	0,0	63	2,4	0,0	0,0
66	Nigeria	2,2	0,0	0,0	64	2,2	2,2	2,2
67	Belarus	1,9	0,9	77,3	68	1,1	1,1	1,1
68	Antarctica	1,6	1,0	165,0	73	0,6	0,0	0,0
69	Jordan	1,5	0,0	0,0	65	1,5	1,5	1,5
70	Indonesia	1,4	0,2	16,7	67	1,2	1,0	0,8
71	Martinique	1,1	0,0	0,0	68	1,1	1,1	1,1
72	Falkland Islands	1,0	0,0	0,0	70	1,0	1,0	1,0
73	Eritrea	0,8	0,0	0,0	71	0,8	0,8	0,8
74	Peru	0,7	0,0	0,0	72	0,7	0,7	0,7
75	Kazakhstan	0,5	0,0	0,0	74	0,5	0,5	0,5
75	Namibia	0,5	0,0	0,0	74	0,5	0,5	0,3
75	Syria	0,5	0,1	22,5	76	0,4	0,3	0,3
78	Dominican Republic	0,2	0,0	0,0	77	0,2	0,0	0,0
79	Dominica	0,2	0,0	0,0	77	0,2	0,0	0,0
80	North Korea	0,2	0,0	0,0	77	0,2	0,0	0,0
81	Algeria	0,1	0,0	0,0	80	0,1	0,0	0,0
82	Bolivia	0,01	0,0	0,0	81	0,01	0,01	0,01
Total		159.213,3	38.312,0	31,7		120.902,9	93.926,8	59.024,1

Anexo C – Tabelas características das energias renováveis, com especial relevo para a energia eólica, para o panorama nacional [3].

Tabela C1: Comparação internacional entre países da OCDE, com a % que Portugal detém de energias renováveis.

						Peso (%) em 2007			
	Total 2007	FER 1999	FER 2007	% FER	% FER	Hídrica	Eólica	Biomassa + Biogás	Outros
	TWh	GWh	GWh	1999	2007				
Austria	70,3	43.823	39.929	74,9	56,8	85,0	5,1	9,9	0,0
Suécia	150,6	74.953	75.873	50,8	50,4	87,0	1,9	11,1	0,0
Portugal Continental	53,0	8.860	18.854	21,4	29,9	63,0	25,3	11,5	0,2
Dinamarca	38,2	4.860	10.478	13,3	27,4	0,3	68,4	31,3	0,0
Finlândia	93,7	21.525	24.961	26,7	26,6	56,8	0,8	42,4	0,0
Espanha	300,7	30.660	59.231	14,3	19,7	46,3	45,5	7,3	0,8
Itália	360,4	58.423	48.842	19,0	13,6	68,5	8,5	11,5	11,5
Alemanha	620,1	37.211	89.506	6,7	14,4	22,7	44,1	29,3	3,9
França	513,0	80.827	66.427	17,5	12,9	87,6	6,1	5,5	0,8
Irlanda	29,0	1.368	2.664	6,1	9,2	25,0	70,4	4,6	0,0
Grécia	68,8	5.187	4.952	10,4	7,2	59,6	37,3	3,1	0,0
Holanda	120,9	4.873	7.489	4,6	6,2	1,5	45,9	52,2	0,5
Reino Unido	402,7	13.076	22.937	3,4	5,7	22,2	26,9	50,9	0,0
Bélgica	96,0	2.703	3.341	3,2	3,5	11,1	15,6	73,2	0,1
Luxemburgo	7,9	816	262	12,6	3,3	44,3	24,4	23,3	8,0
Total UE 15	2.925,3	389.165	472.746	15,2	16,2	57,7	21,9	18,2	2,2
Nova Zelândia	43,9	26.747	28.698	70,2	65,4	81,9	3,3	2,7	12,1
Canadá	600,4	353.538	381.285	64,5	63,5	96,8	0,7	2,6	0,0
Turquia	189,5	34.930	36.491	29,5	19,3	98,1	1,0	0,5	0,4
México	256,0	38.955	37.247	20,2	14,5	72,8	0,7	6,6	19,9
Austrália	259,2	18.118	22.121	8,9	8,5	76,1	12,5	11,0	0,4
Japão	1.154,5	121.972	98.464	11,4	8,5	76,5	2,8	17,5	3,1
Estados Unidos	4.419,6	389.079	364.237	9,8	8,2	68,8	8,9	17,5	4,8
Coreia	438,8	6.470	4.227	2,4	1,0	85,9	8,7	4,7	0,7

Tabela C2: - Evolução histórica da Potência Instalada total de renováveis por distrito (MW)
Portugal Continental (exclui pequena fotovoltaica)

Distritos	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Total Continente	4.818	4.932	4.994	5.562	6.264	6.959	7.719	8.331	9.036
Aveiro	74	74	79	81	81	118	118	118	140
Beja	1,4	1,4	1,4	261	261	271	282	348	367
Braga	295	298	300	324	598	601	611	636	646
Bragança	986	986	986	992	992	992	992	1.001	1.063
Castelo Branco	153	153	166	170	170	327	554	602	622
Coimbra	451	464	464	505	643	685	691	755	949
Évora	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,2	1,0	1,2	1,2
Faro	13	13	23	23	24	36	40	50	146
Guarda	293	304	307	326	326	360	399	444	466
Leiria	50	50	50	61	111	160	202	235	283
Lisboa	65	66	79	129	192	250	265	312	361
Portalegre	152	152	152	152	153	153	152	152	153
Porto	284	284	285	301	332	337	377	382	407
Santarém	305	310	310	330	389	449	436	434	469
Setúbal	103	103	103	107	124	124	124	124	138
Viana do Castelo	722	748	729	763	780	819	1.080	1.080	1.080
Vila Real	482	492	521	572	585	627	629	690	743
Viseu	386	430	437	462	502	650	766	968	1.003

Tabela C3: Evolução da Potência Instalada total de renováveis, excluindo a grande hídrica >30 MW e pequena fotovoltaica (MW) Portugal Continental

Distritos	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Total	1.035	1.149	1.211	1.519	2.030	2.668	3.484	4.097	4.802
Aveiro	74	74	79	81	81	118	118	118	140
Beja	1	1	1	1	2	12	23	89	108
Braga	47	50	51	76	158	161	171	196	206
Bragança	25	25	25	31	31	31	31	39	102
Castelo Branco	43	43	56	60	60	203	444	492	513
Coimbra	184	197	197	238	376	408	424	488	682
Évora	1,2	1,2	1,2	1,2	1,0	1,2	1,0	1,2	1,2
Faro	13	13	23	23	24	36	40	50	146
Guarda	92	102	106	125	125	159	197	242	265
Leiria	0	0	0	11	61	95	153	185	233
Lisboa	65	66	79	129	192	236	265	312	361
Portalegre	19	19	19	19	19	19	18	18	19
Porto	45	45	46	63	93	98	138	143	168
Santarém	27	32	32	52	110	171	158	156	191
Setúbal	103	103	103	107	124	124	124	124	138
Viana do Castelo	57	83	64	98	115	154	415	415	415
Vila Real	102	112	141	192	205	247	249	310	363
Viseu	135	180	187	212	252	397	515	718	753

Tabela C4: Evolução histórica da energia eléctrica produzida através de renováveis (GWh) Portugal Continental

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Hídrica Total	14.240	8.096	15.894	10.053	5.000	11.323	10.351	7.102	8.717
Grande Hídrica (>30MW)	12.887	6.896	14.303	9.065	4.454	9.897	9.406	6.190	7.547
PCH (>10 e <=30 MW)	690	615	822	487	265	702	504	478	618
PCH (<= 10 MW)	663	585	769	501	281	724	441	434	552
Eólica	239	341	468	787	1.741	2.892	4.007	5.720	7.440
Biomassa (c/ cogeração)	1.065	1.166	1.069	1.206	1.286	1.302	1.361	1.381	1.390
Biomassa (s/ cogeração)	21	42	43	52	64	78	149	146	311
Resíduos Sólidos Urbanos	511	518	523	475	545	532	498	441	458
Biogás	2,2	2,5	2,3	14	31	33	55	67	80
Fotovoltaica	1,6	1,8	2,6	2,9	3,0	4,1	23,6	41,4	159,9
Ondas/Marés									
Total	16.080	10.167	18.002	12.590	8.671	16.164	16.445	14.898	18.556
IPH (ano base da Directiva - 1997)	0,975	0,623	1,115	0,680	0,336	0,800	0,631	0,461	0,634
Hídrica Total Corrigida (IPH da Directiva)	14.605	12.995	14.255	14.784	14.881	14.154	16.404	15.406	13.749
Total Corrigido	16.445	15.066	16.363	17.321	18.552	18.995	22.498	23.202	23.588
Produção Bruta + Saldo Imp. (GWh)	45.484	46.652	48.220	50.017	51.729	52.749	52.952	53.558	52.808
% de renováveis (Real)	35,4%	21,8%	37,3%	25,2%	16,8%	30,6%	31,1%	27,8%	35,1%
% de renováveis (Directiva)	36,2%	32,3%	33,9%	34,6%	35,9%	36,0%	42,5%	43,3%	44,7%

Tabela C5: Caracterização da potência eólica instalada em Portugal Continental) TCMA – taxa de crescimento media anual entre 2001 e 2009

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TCMA
Potência instalada (MW)	114	175	253	537	1.047	1.681	2.446	3.012	3.566	53,8%
Nº parques instalados	16	24	42	71	103	139	152	174	195	36,7%
Nº de aerogeradores instalados	173	213	276	441	702	1.003	1.137	1.609	1.879	34,7%
Potência média (MW)										
dos parques	7,1	7,3	6,0	7,6	10,2	12,1	16,1	17,3	18,3	12,5%
dos aerogeradores instalados	0,7	0,8	0,9	1,2	1,5	1,7	2,2	1,9	1,9	14,1%
dos aerogeradores instalados em cada ano	0,5	1,5	1,2	1,7	2,0	2,1	5,7	1,2	2,1	19,3%

Tabela C6: Caracterização dos parques por potência instalada em Portugal Continental

MW	Nº de parques					Potência (MW)				
	2006	2007	2008	2009	% 2009	2006	2007	2008	2009	% 2009
Total	139	152	174	195	100%	1.681	2.446	3.012	3.566	100%
≤ 1	23	22	22	23	13%	16	15	15	15	0%
> 1 ≤ 10	63	62	67	73	39%	296	278	311	337	9%
> 10 ≤ 25	40	47	56	66	32%	599	701	842	1.016	28%
> 25 ≤ 50	8	13	20	19	11%	264	440	678	647	18%
> 50	5	8	9	14	5%	506	1.013	1.166	1.551	43%

Tabela C7: Caracterização da produção e horas de produção equivalente

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	TCMA
<i>Totalidade dos parques</i>										
Produção (GWh)	239	341	408	787	1.741	2.892	4.007	5.720	7.740	54,4%
Potência instalada (MW)	114	175	253	537	1.047	1.681	2.446	3.012	3.566	53,8%
Horas de produção equivalente	2.090	1.956	1.848	1.465	1.663	1.720	1.638	1.899	2.170	
<i>Parques com potência instalada estabilizada</i>										
Produção (GWh)	177	271	420	594	1.405	2.119	3.587	5.034	6.358	56,5%
Potência instalada (MW)	71	111	183	266	611	999	1.736	2.215	2.850	58,5%
Horas de produção equivalente	2.470	2.439	2.299	2.234	2.301	2.120	2.066	2.273	2.231	

Tabela C8: Caracterização dos parques por horas de produção equivalente Com potência instalada estabilizada

Horas	Pot. instalada (MW)					Produção (GWh)				
	2006	2007	2008	2009	% 2009	2006	2007	2008	2009	% 2009
Total	999	1.736	2.215	2.850	100%	2.119	3.579	5.034	6.358	100%
> 3000	10	19	89	76	3%	32	67	292	245	4%
> 2750 ≤ 3000	26	31	64	193	7%	73	89	190	558	9%
> 2500 ≤ 2750	86	118	501	297	10%	228	309	1.301	765	12%
> 2250 ≤ 2500	219	349	510	728	26%	537	805	1.202	1.719	27%
> 2000 ≤ 2250	262	334	519	586	21%	570	716	1.083	1.244	20%
> 1750 ≤ 2000	221	713	365	846	30%	423	1.333	698	1.628	26%
≤ 1750	175	171	167	124	4%	255	259	268	199	3%

Tabela C9: Evolução da potência instalada eólica, produção e horas de produção equivalente

Distritos	Potência (MW)			Produção (GWh)			2009 (corrigido ¹)		
	2007	2008	2009	2007	2008	2009	Potência MW	Produção GWh	Horas Equiv.
TOTAL Continente	2.446	3.012	3.566	4.007	5.720	7.440	2.850	6.357	2.231
Aveiro	41	41	41	85	93	97	41	97	2.377
Beja		27	27		10	52	27	52	1.955
Braga	118	143	151	227	260	294	151	292	1.939
Bragança	6	14	73	22	30	113	14	32	2.370
Castelo Branco	383	431	470	497	855	1.038	470	1.038	2.207
Coimbra	269	332	465	457	645	900	276	635	2.300
Évora									
Faro	38	47	144	70	97	237	40	92	2.312
Guarda	84	128	150	133	299	366	128	339	2.655
Leiria	151	184	231	288	380	485	210	442	2.102
Lisboa	203	250	287	455	601	683	258	645	2.497
Portalegre					0				
Porto	92	96	105	120	205	220	99	211	2.133
Santarém	137	135	157	342	391	396	135	382	2.840
Setúbal	19	19	19	28	38	36	19	36	1.895
Viana do Castelo	351	351	351	186	513	704	351	704	2.003
Vila Real	171	232	272	387	392	551	172	386	2.251
Viseu	383	583	624	710	911	1.268	460	974	2.117

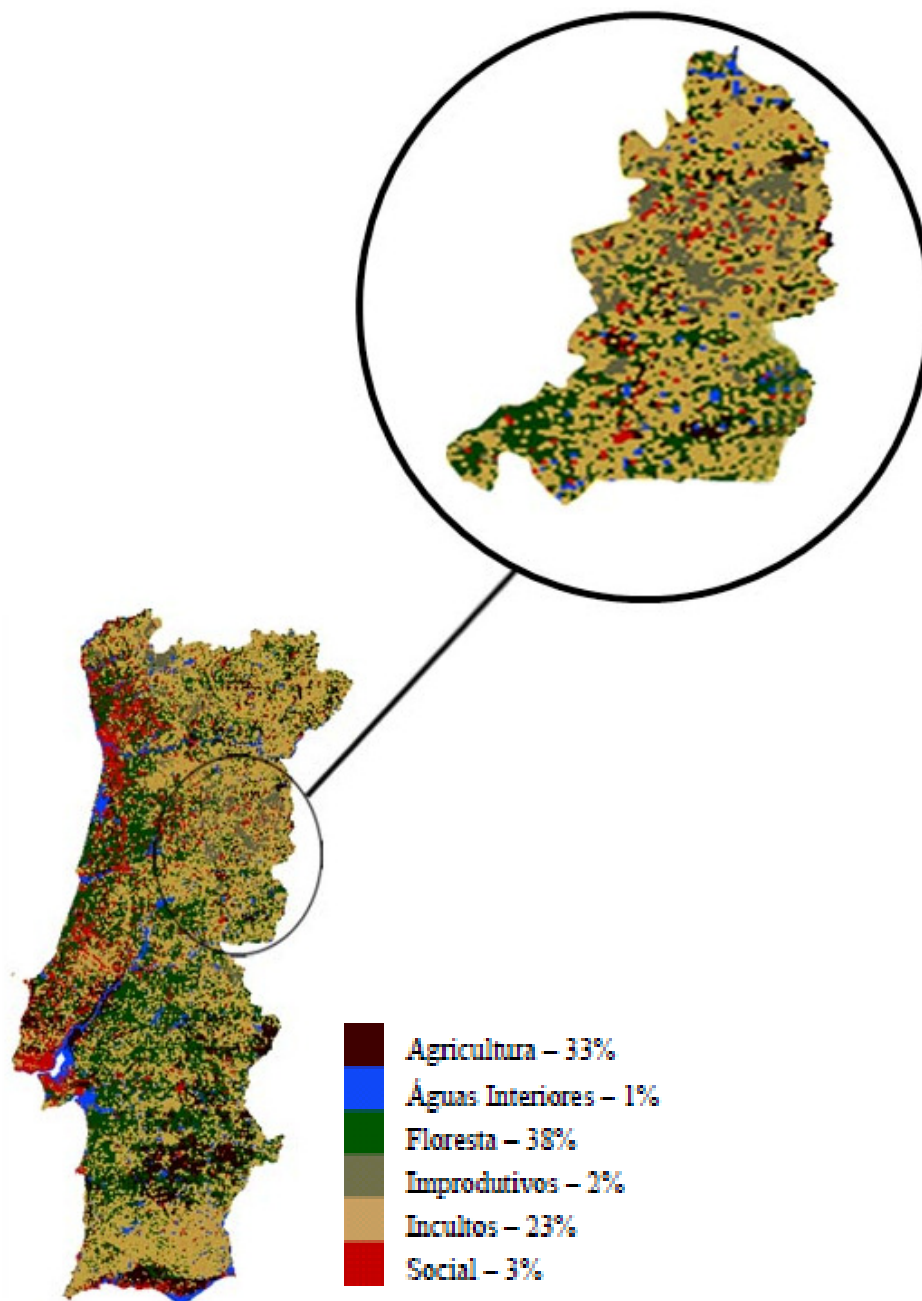
Tabela C10: Potência licenciada (desde atribuição de Ponto de Recepção)

	Até 2007	1ºTri 2008	2ºTri 2008	3ºTri 2008	4ºTri 2008	1ºTri 2009	2ºTri 2009	3ºTri 2009	4ºTri 2009	Total
Grande Hidrica (> 10MW)	4.513									4.513
Hidrica (PCH <= 10MW)	453	1,6	2,4		0,1	2,7	1,8	1,4		463
Eólica	3.284	187,1	165,5	30,6	26,8	244,1	303,6			4.242
Biomassa (c/cogeração)	481	0,3	64,5			2,6				548
Biomassa (s/cogeração)	100	25,0	3,0	37,8		6,0	2,3	1,1		175
Resíduos Sólidos Urbanos	88									88
Biogás	43	4,9	1,6				6,0	5,1		61
Fotovoltaica	106		0,1		1,3		16,6		1,1	125
Ondas/Marés	4,2									4,2
Total	9.071	218,9	237,1	68,4	28,2	255,4	330,3	7,6	1,1	10.218

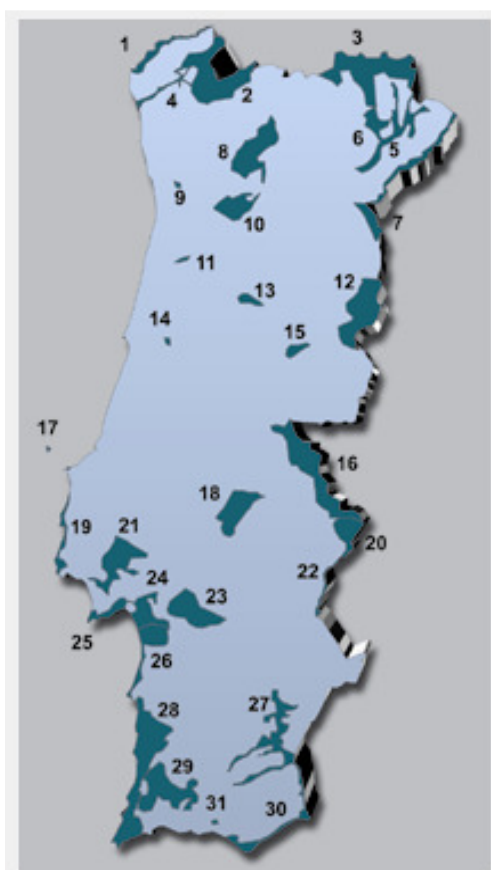
Tabela C11: Evolução da potência acumulada licenciada por distrito em MW

Distritos	Grande Hidrica	Eólica				Total			
		2006	2007	2008	2009	2006	2007	2008	2009
TOTAL Continente	4.513	3.063	3.284	3.694	4.242	8.666	9.146	9.689	10.218
Aveiro	0	75	75	75	75	165	166	180	186
Beja	269	27	27	27	27	370	390	391	407
Braga	451	147	147	147	147	653	665	667	666
Bragança	981	14	73	73	73	1.022	1.086	1.087	1.087
Castelo Branco	110	454	454	478	478	632	654	682	694
Coimbra	330	262	345	480	577	694	851	1.077	1.180
Evora	0	0	0	0	0	0	6	6	6
Faro	0	143	143	143	224	159	215	216	255
Guarda	271	119	121	142	142	439	441	461	457
Leiria	0	223	244	244	244	227	248	249	251
Lisboa	50	246	246	309	308	402	405	470	434
Portalegre	134	0	0	0	0	144	144	144	144
Porto	239	143	143	143	162	447	461	466	489
Santarém	279	123	129	129	151	432	456	456	486
Setúbal	0	18	18	18	18	124	127	139	147
Viana do Castelo	686	334	334	334	351	1.111	1.113	1.114	1.135
Vila Real	440	202	243	387	486	716	767	911	1.009
Viseu	274	535	544	567	779	930	951	974	1.185

Anexo D – Mapa com distribuição espacial dos usos do solo em Portugal Continental [18]

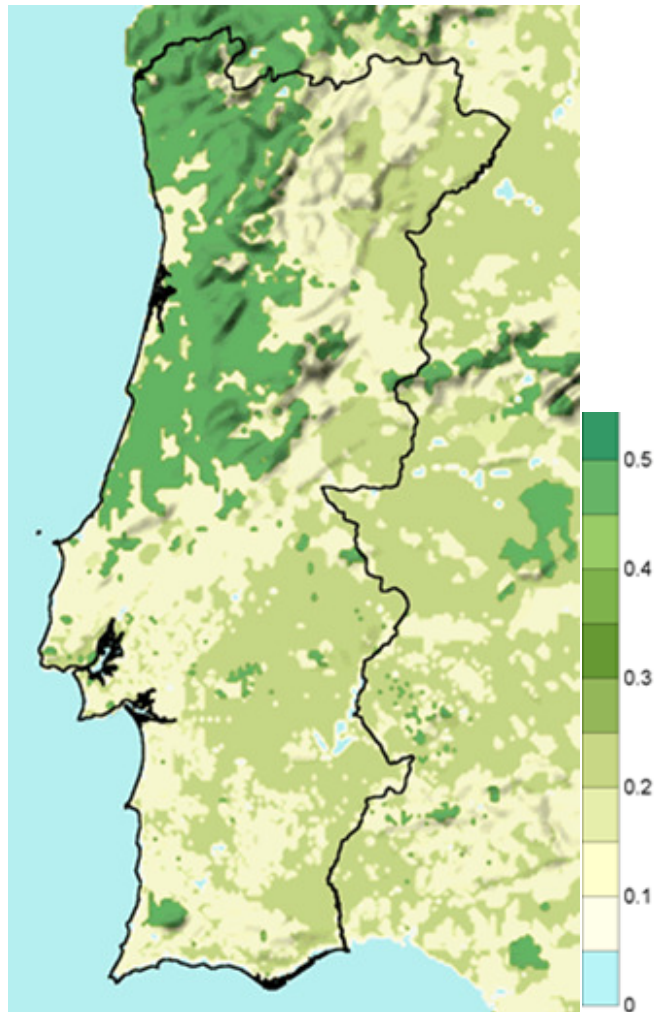


Anexo F – Rede nacional de áreas protegidas, salientando-se a Serra da Gardunha e Malcata [17].

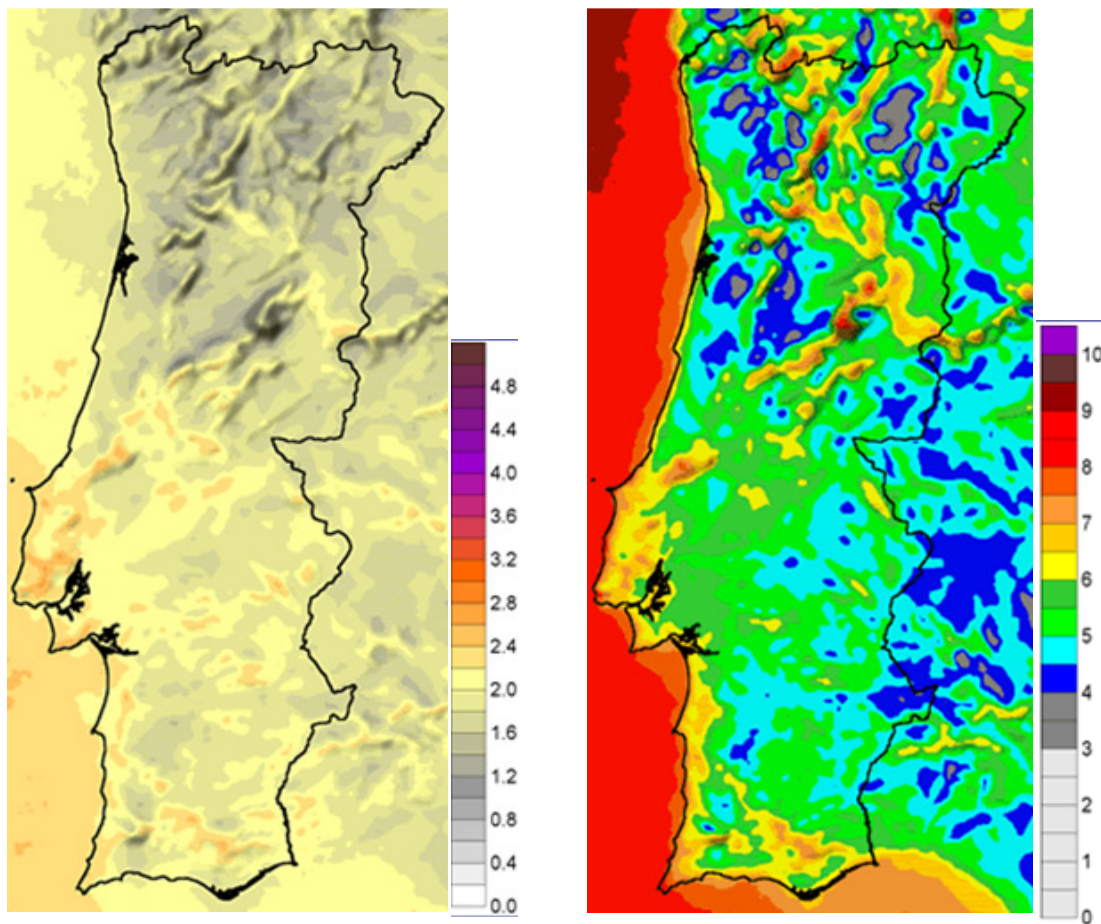


- | | |
|-------------------------|---------------------------|
| 1 Rio Minho | 17 Arquipélago de Berlega |
| 2 Gerês | 18 Cabeção |
| 3 Montesinho / Nogueira | 19 Sintra / Cascais |
| 4 Rio Lima | 20 Caia |
| 5 Rios Sabor e Macas | 21 Estuário do Tejo |
| 6 Morais | 22 Rio Guadiana |
| 7 Douro Litoral | 23 Cabreia |
| 8 Alvão/ Marão | 24 Estuário do Sado |
| 9 Valongo | 25 Arrábida |
| 10 Montemuro | 26 Comporta / Gale |
| 11 Rio Vouga | 27 Guadiana |
| 12 Malcata | 28 Costa Sudoeste |
| 13 Carregal do Sal | 29 Castro Marim |
| 14 Paúl de Arzila | 30 Ria Formosa |
| 15 Gardunha | 31 Ribeira de Quarteira |
| 16 S. Mamede | |

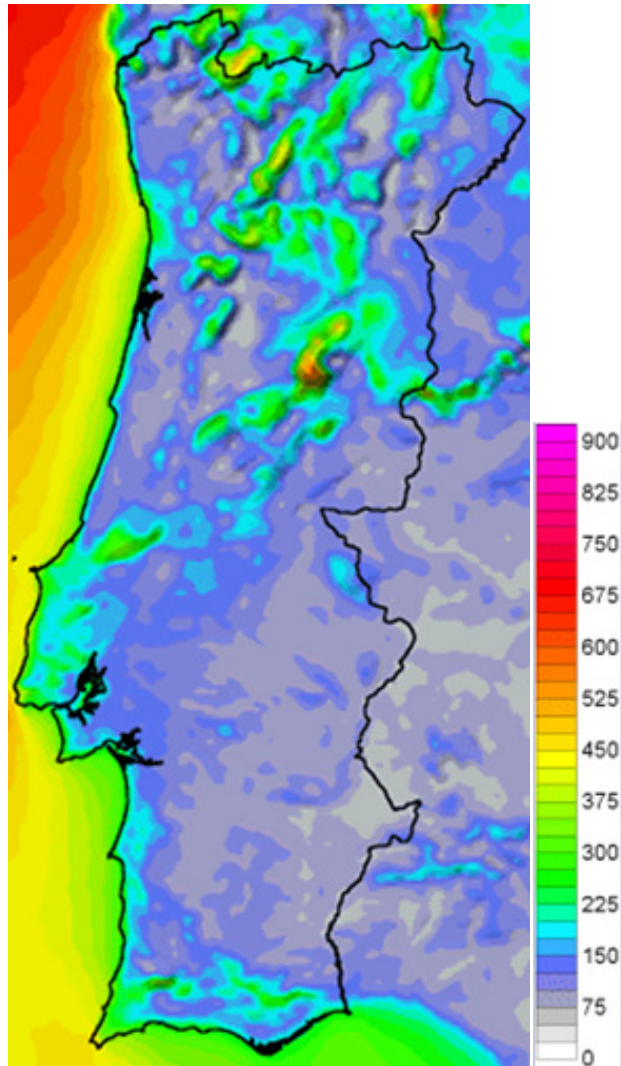
Anexo G – Rugosidade média da superfície em metros. O interior do País a apresentar valores bastante baixos, quando comparados com o litoral norte[18].



Anexo H – Distribuição de Weibull da intensidade do vento: parâmetro de forma (à esquerda) e a distribuição de Weibull da intensidade do vento: parâmetro de escala (m/s) (à direita) [17].



Anexo I – Fluxo de potência eólica (W/m^2), para Portugal Continental (média anual para 60 m) [17].



Anexo J – Caracterização dos materiais que compõem as torres e pás dos aerogeradores.

Quanto ao material, as torres podem ser de aço ou betão, em treliças ou tubulares. A torre suporta a massa da nacela e das pás; estas por sua vez, em rotação, excitam cargas cíclicas em conjunto, com a frequência de rotação. A primeira geração de turbinas eólicas, consideradas modernas, foi concebida com torres rígidas, com frequências naturais projectadas acima das forças de rotação do rotor. O que conduziu a torres desnecessariamente pesadas e caras [34].

O facto de as fundações possuírem formas cilíndricas traz algumas vantagens em relação à estabilidade, esforços e a nível económico. A acção da força é igual em todas as direcções de vento; as fundações em forma de cruz ou poligonais provocam pressões no terreno, que conduzem a sobre-esforços nas áreas dos cantos. O volume de betão e de aço de reforço que será utilizado para fabrico é comprovadamente reduzido pela forma cilíndrica; esta forma também proporciona áreas de dimensões mais reduzidas. O enchimento da fundação com a terra escavada da vala entra como carga no cálculo estático. Desta forma, reduz-se a quantidade de betão armado utilizado para garantir a estabilidade da fundação[54].

Os diferentes materiais que compõem as pás são:

Laminados de madeira/epoxi, esta fibra natural, que também constitui um material composto, evoluiu ao longo dos anos para suportar cargas de fadiga introduzidas pelo vento, que têm muito em comum com aquelas a que são submetidos os rotores dos aerogeradores []. Caracterizam-se por serem leves, não terem problemas de corrosão e pela facilidade na construção de formas complexas. Em contrapartida, têm alto custo de fabricação, baixa rigidez e problemas com a humidade (que enfraquece a estrutura das pás e pode causar rupturas na estrutura) e radiação ultravioleta.

Alumínio, a maior parte dos aerogeradores do tipo Darrieus usam pás feitas de ligas de alumínio, na forma de perfil aerodinâmico.

Fibra de vidro reforçada com epoxi apresenta as mesmas vantagens das pás de madeira/epoxi e ainda tem uma tecnologia de construção bem desenvolvida e um bom conhecimento do seu comportamento à fadiga. Também tem alto custo de fabricação, baixa rigidez e problemas com a humidade e radiação ultravioleta. É o material mais utilizado na maior parte das pás dos aerogeradores dos parques eólicos da Califórnia (EUA), e já foi utilizado em rotores de até 78 m de diâmetro [7]. As pás em materiais compósitos permitem uma geometria aerodinâmica aperfeiçoada e com grande precisão. As fibras são colocadas estruturalmente nas principais direcções de predominância das tensões quando em funcionamento [53].

O aço estrutural é disponível a custo relativamente baixo no mercado interno de alguns países e há bastante experiência na sua utilização em estruturas aeronáuticas de todos os tamanhos. As desvantagens do aço trazem consequências mais significativas nos aerogeradores de grande porte, já que as pás desse material tendem a ser pesadas, o que acarreta aumentos de peso e custo de toda a estrutura de suporte (problemas sobretudo de fadiga, devido ao peso das próprias pás). Estes inconvenientes fazem com que este material seja cada vez menos utilizado.

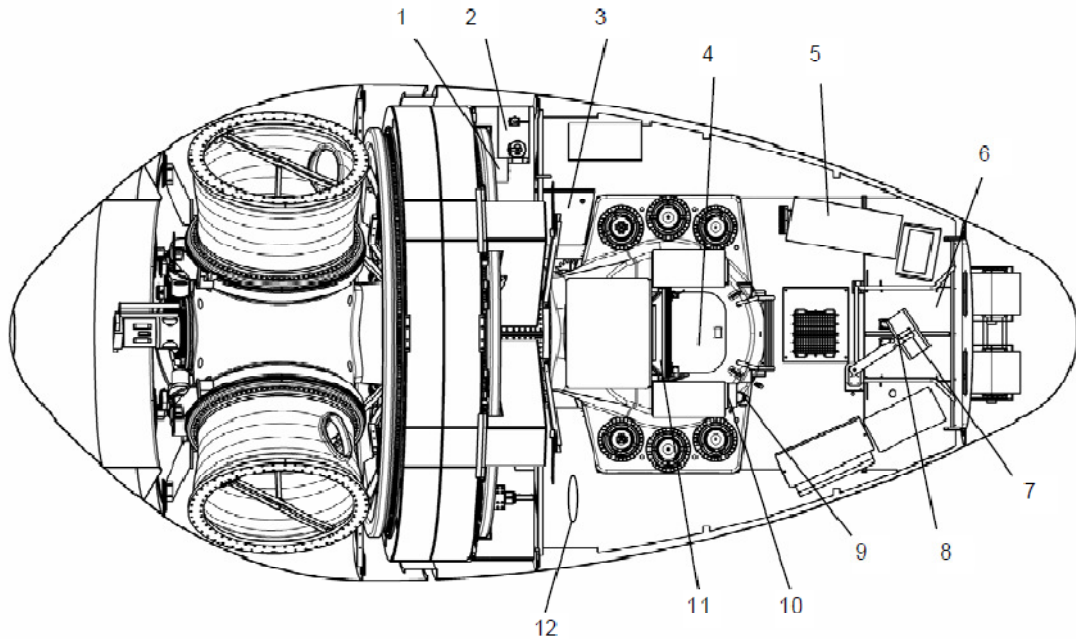
Fibras de carbono são materiais de compósitos mais modernos, que podem ser utilizados em áreas críticas, sujeitas a maiores esforços. Têm sido utilizados experimentalmente, mas estes materiais devido ao facto de ainda não terem muita presença no mercado, têm preços muito elevados para serem utilizados nos aerogeradores economicamente mais competitivos [55].

Anexo K – Distinção do controlo de passo fixo (sistema passivo) e passo variável (sistema activo.)

O controlo de passo fixo é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor encontram-se fixas no seu ângulo de passo e não podem girar em torno do eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores à velocidade nominal, seja possível deslocar, pelo menos parte do escoamento em torno do perfil da pá do aerogerador, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto, actuando contra um aumento da potência do rotor [21]

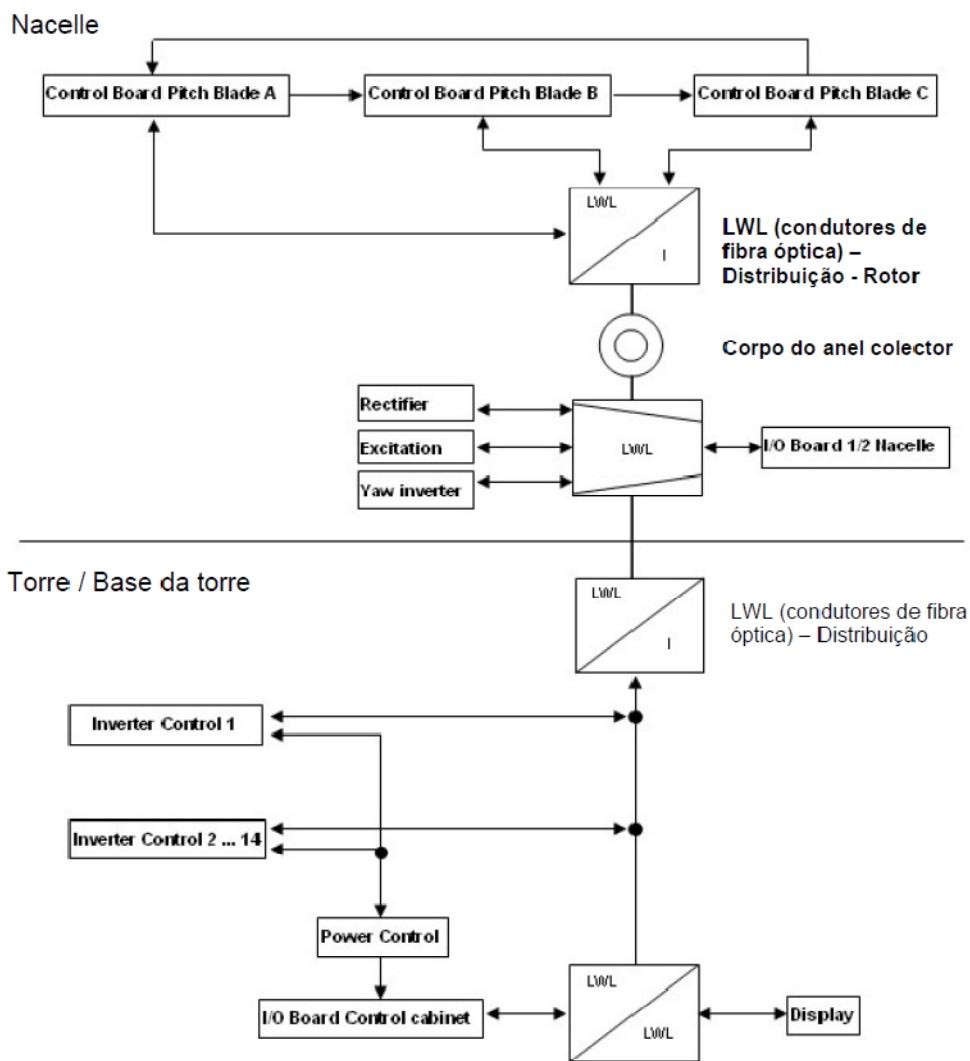
Por outro lado, o controlo de passo variável, é um sistema activo que faz girar as pás do rotor em torno do seu eixo longitudinal, sempre que a potência nominal do gerador seja ultrapassada, devido a um aumento da velocidade do vento. Isto é, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque permite diminuir as forças aerodinâmicas actuantes e, por conseguinte, a extracção da potência. No caso em que as velocidades do vento são superiores à velocidade nominal, o ângulo adapta-se de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Assim, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto [54].

Anexo L – Visão geral do equipamento da tecnologia de segurança do E-82, de forma a minimizar os danos causados pelas falhas [41].



- 1 Painel de controlo – bloqueio do rotor
- 2 Agregado hidráulico do bloqueio do rotor
- 3 Escotilha do porão da nacelle
- 4 Escotilha de acesso
- 5 Painel de operações da nacelle
- 6 Escotilha do guincho
- 7 Guincho
- 8 Ponto de fixação para equipamento de descida por cabo
- 9 Extintor
- 10 Equipamentos de Primeiros Socorros
- 11 Escada para tecto da nacelle
- 12 Iluminação da nacelle inferior

Anexo M – Descrição da operação do sistema de controlo, bem como as funções de cada operação. O sistema de controlo do E-82 trata-se de um sistema de multiprocessadores, no qual cada processador controla uma determinada área de operação [41].



“**Control Board Pitch**” - tem como funções: medição do ângulo da pá; accionamento do motor Pitch; carregar e monitorizar o condensador; regulação do aquecimento do condensador; controlo do entreferro do gerador; medição da rotação; controlo de outros valores medidos.

“Rectifier” - tem como funções: rectificação da tensão alternada do gerador; protecção do gerador contra sobre carga; controlo do isolamento.

“Excitation” - tem como funções: ajuste da corrente de excitação; reconhecimento da corrente de falha; limite de sobre corrente.

“Yaw-Inverter ” - tem como funções: controlo azimutal; controlo dos motores azimutais;

“I/O Board 1/2 Nacelle” - tem como funções: alimentação dos sensores da nacelle; medição e avaliação de valores medidos análogos e digitais (p. ex. direcção e velocidade do vento); accionamento de relés, p.ex. para controlo azimutal, funções de segurança;

“Inverter Control” - tem como funções: accionamento e controlo do inversor e do chopper de amplificação; controlo da protecção da rede; ajuste do ventilador; medição da temperatura; controlo dos sensores.

Power Control - tem como funções: verificação do campo rotativo; controlo da rede; accionamento do contactor da alimentação da rede;

“Display” - tem como funções: indicação dos dados de operação; indicação do estado de funcionamento e falhas através de LEDs; transmissão de mensagens de estado em números codificados ou em texto; alteração dos parâmetros de operação; memorização das falhas e dados de funcionamento.

“I/O Board Control cabinet” - tem como funções: organização da transmissão de dados entre os processadores, controlo do bus de dados, cálculo do valor teórico da potência através da curva característica; ajuste da corrente de excitação; classificação e processamento das mensagens de falha; arranque e paragem do aerogerador; medição e controlo da energia injectada; comunicação com o computador do parque para a

monitorização à distância; alimentação de todos os sensores no armário de controlo; medição e classificação dos valores medidos analógicos e digitais.

Anexo N – Descrição das funções dos parâmetros indicados no display do E-82 [41].

a) Display (Display)

Aqui é indicado o actual estado operacional do aerogerador. A indicação do display é activada pressionando uma das teclas de funções (F1-F5) e desliga automaticamente após alguns minutos. Através das teclas de função é possível verificar e alterar alguns parâmetros do aerogerador. Alguns dos parâmetros do aerogerador só podem ser alterados com a prévia introdução de um código de serviço.

b) Wind speed (Velocidade do vento)

Aqui é indicada a velocidade do vento, medida pelo anemómetro situado no topo da nacelle. A velocidade do vento é indicada em metros por segundo (m/s).

c) Rotational speed (Velocidade de rotação)

Indica a rotação do aerogerador medida em rotações por minuto (rpm).

d) Power (Potência)

Indica a presente potência produzida em kilowatts (kW).

e) Operating hours (Horas de operação)

Indica o tempo de operação acumulado até o momento (h). Isto só diz respeito às horas nas quais a produção do aerogerador é superior a 0 kW. Mesmo que ocorra falta de energia (o aerogerador seja desligado) o contador permanece registado continuamente (durante vários anos).

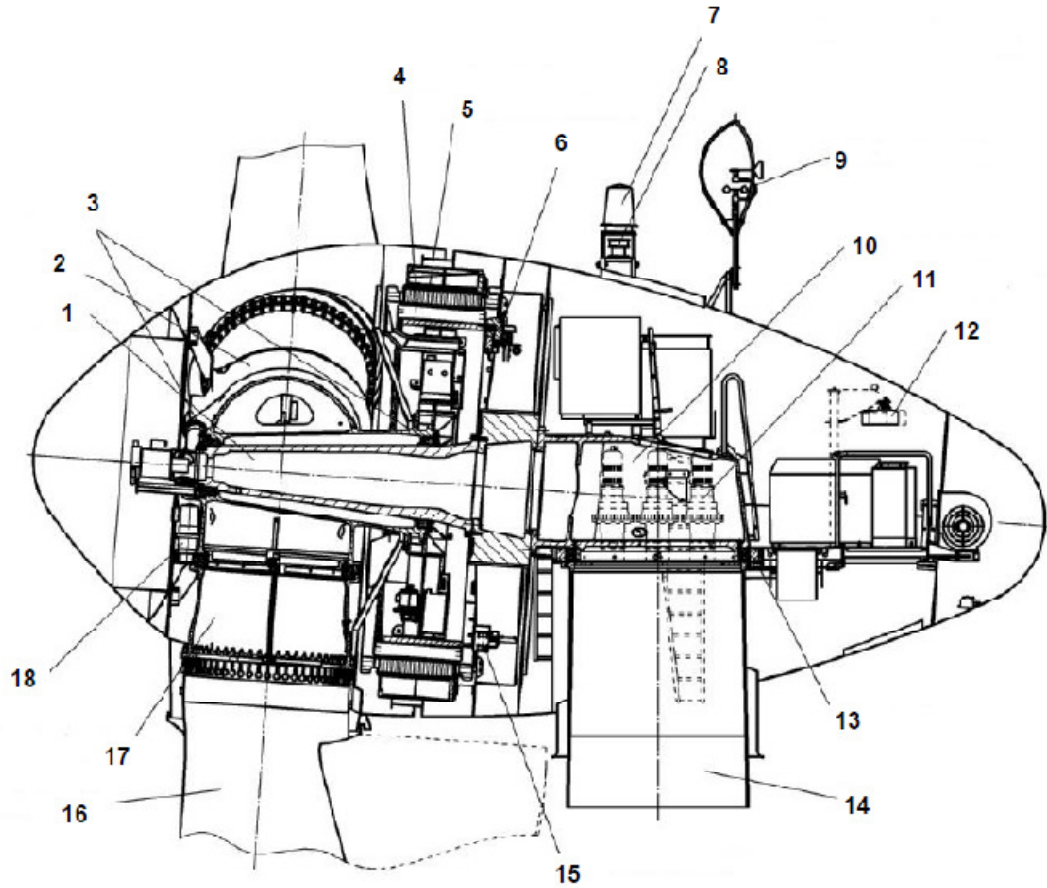
f) Electrical energy (Energia eléctrica)

Indica a energia produzida até o momento em kilowatt-horas (kWh). No caso de haver uma queda de tensão (desligamento do aerogerador), o valor indicado no mostrador é armazenado.

g) Painel de LEDs

Este campo possibilita uma visão conjunta das falhas importantes, indicadas por LEDs vermelhos. Os LEDs verdes indicam o estado operacional e de controlo do aerogerador em funcionamento normal.

Anexo O – Aspecto geral dos componentes no interior e no exterior da nacelle (corte transversal) do E-82 [41]



- | | |
|--|---|
| 1 Pino do eixo | 10 Suporte da máquina |
| 2 Cubo do rotor | 11 Accionamento do controlo azimutal |
| 3 Rolamento do rotor | 12 Guincho |
| 4 Rotor do gerador | 13 Rolamento do azimute |
| 5 Estator do gerador | 14 Torre |
| 6 Travão de rotor | 15 Bloqueio do rotor |
| 7 Sinalização do dia opcional | 16 Pá do rotor |
| 8 Sinalização da noite opcional | 17 Adaptador da pá |
| 9 Anemómetro | 18 Accionamento do pitch |

Anexo P – Directivas das espécies protegidas a nível de fauna e flora, para o parque eólico da Gardunha [17]

MAMÍFEROS DO ANEXO II (Directiva 92/43/CEE)				
Código	Nome	Residente	Reprod.	Invern. Passagem
1355	Lutra lutra		P	

ANFÍBIOS E RÉPTEIS DO ANEXO II (Directiva 92/43/CEE)				
Código	Nome	Residente	Reprod.	Invern. Passagem
1172	Chioglossa lusitanica		P	
1259	Lacerta schreiberi		C	

PEIXES DO ANEXO II (Directiva 92/43/CEE)				
Código	Nome	Residente	Reprod.	Invern. Passagem
1125	Rutilus lemmingii		P	

INVERTEBRADOS DO ANEXO II (Directiva 92/43/CEE)				
Código	Nome	Residente	Reprod.	Invern. Passagem
1065	Euphydrias aurinia			

AVES DO ANEXO I (Directiva 79/409/CEE)				
NOME	Residente	Nidif.	Invern	Passagem
Anthus campestris		P		
Calandrella brachydactyla		C		
Circaetus gallicus		P		
Emberiza hortulana		P		
Hieraaetus pennatus		P		
Lullula arborea	C			
Milvus migrans		P		
Sylvia undata	C			

AVES MIGRADORAS NÃO INCLUÍDAS NO ANEXO I				
NOME	Residente	Nidif.	Invern	Passagem
Hippolais polyglotta		C		
Luscinia megarhynchos		C		
Oenanthe hispanica		P		
Oriolus oriolus		P		
Phylloscopus bonelli		P		
Streptopelia turtur		C		
Sylvia cantillans		C		
Sylvia communis		P		

Anexo Q – Artigo publicado no ICREPQ'10 (*International Conference on Renewable Energies and Power Quality*), em Granada, de 23 a 25 de Março de 2010