



ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil



Caracterização do potencial eólico urbano

O caso de Lisboa

ANA MARGARIDA DE PAIVA TEIXEIRA

(Licenciada em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil,
na Área de Especialização de Edificações (Versão Definitiva)

Orientadores:

Licenciado, João António Antunes Hormigo (Eq. Professor Adjunto do ISEL)

Doutor, Pedro Miguel Matos Soares (Eq. Professor Adjunto do ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor Filipe Manuel Almeida Vasques (Prof. Adjunto do ISEL)

Vogais: Doutora Maria Ana Viana Batista (Prof. Coordenador c/ agregação do ISEL)

Doutor Pedro Miguel Matos Soares (Eq. Professor Adjunto do ISEL)

Licenciado João António Antunes Hormigo (Eq. Professor Adjunto do ISEL)

Dezembro de 2013

Agradecimentos

A realização da presente dissertação apenas foi possível com o apoio e incentivo de pessoas fundamentais, às quais apresento os meus sinceros agradecimentos.

Aos meus orientadores, Eng.º João António Antunes Hormigo e Doutor Pedro Matos Soares, pela oportunidade em realizar uma dissertação sobre um tema inovador e do meu interesse, pelos conhecimentos, sabedoria e conselhos concedidos ao longo do seu desenvolvimento, o qual não seria possível sem a sua orientação.

Ao Eng.º Pedro Ruão, fundador da empresa portuguesa Omniflow, pela sua simpática disponibilidade e paciência, fornecendo toda a informação necessária sobre a turbina eólica, sempre prestável no esclarecimento de dúvidas que foram surgindo ao longo da composição desta dissertação.

Aos meus pais, José e Luísa, pelo seu amor incondicional e apoio demonstrado durante a minha vida, pelo esforço em tornarem possível dedicar-me apenas aos estudos, pela confiança depositada e por nunca deixarem de acreditar mim. Sem vocês não teria sido possível.

Ao meu irmão Pedro, meu pilar, pela motivação e apoio incansável mesmo em momentos difíceis, pelos conselhos e por estar sempre presente. Sabes o quanto significas para mim.

À minha cunhada Maria João, que hoje é como uma irmã para mim, pelas palavras sempre positivas, pelo carinho e pela pequena que vem a caminho.

A toda a minha família, em especial às minhas avós, por serem uma fonte de inspiração e exemplos de força.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo do meu percurso e incentivaram sempre a seguir em frente, pela amizade e pelos momentos de descontração proporcionados.

A todos, o meu grande obrigado.

Resumo

A elevada dependência energética do exterior de grande parte dos países, incluindo dos países europeus, pela fonte de energia que o petróleo representa tem contribuído para a crise económica mundial.

Dado o grande consumo de combustíveis fósseis no mundo, o facto de estes serem limitados e adicionalmente prejudicarem fortemente o meio ambiente do nosso planeta, motivou a importante necessidade de se investir em novas fontes de energias, que se pretendem ser renováveis, limpas e seguras, com grande potencial e que sejam uma real alternativa face aos recursos energéticos tradicionais, baseados na exploração de combustíveis fósseis.

De entre as fontes de energias renováveis disponíveis, a energia eólica apresentou uma grande evolução na última década, sobretudo devido ao seu desenvolvimento tecnológico (instalação de turbinas eólicas em terra, em mar aberto, ou de micro-turbinas em áreas urbanas), à melhoria da eficiência e redução de custos de fabrico dos aerogeradores.

Com esta dissertação pretendeu-se descrever a produção de energia eólica através de sistemas de pequena potência, designados por aerogeradores urbanos, e a sua implementação em ambientes edificados.

Realizou-se um estudo sobre o aproveitamento do potencial eólico na cidade de Lisboa, através de dados recolhidos na estação meteorológica de Lisboa (Instituto Dom Luiz), analisando o regime de ventos no que diz respeito ao seu ciclo anual e sazonal, e a sua variabilidade, apresentando uma medida do potencial de produção de energia eólica.

Como caso de estudo selecionou-se um sistema de microgeração eólica, cuja análise foi objeto de estudo ao longo da presente dissertação. A turbina eólica escolhida para caracterizar a implementação prática de um sistema de microgeração urbana foi a Omniflow, pois trata-se de um produto inovador, muito recentemente desenvolvido por uma empresa nacional, e que possui grande potencial de mercado.

Para esta micro-turbina descrevem-se ainda os sistemas de instalação através da fixação dos equipamentos a coberturas de edifícios, e apresentou-se o respetivo cálculo de estabilidade.

Por último, realizou-se uma avaliação técnico-económica do aerogerador urbano em estudo, um sistema híbrido que produz energia combinada através do sol e do vento, descrevendo os custos associados à instalação completa do equipamento e abordando a respetiva produção energética.

Palavras-chave: Energia eólica, Aerogeradores urbanos, Microgeração, Meio urbano, Turbina Omniflow.

Abstract

The high dependence on external energy of most countries, including European ones', from the energy source that oil represents has contributed to the global economic crisis.

Given the large fossil fuels consumption in the world, the fact that these are limited and additionally the harmful impact that they have on the environment of our planet, motivated an urgent need to invest in new energy sources, renewable, clean and safe, with great potential and that are a real alternative to traditional energy resources, based on fossil fuels exploration.

Among the currently available renewable energy sources, wind power has shown greater progress during the last decade, mainly due to its technological development (i.e. installation of on-shore and off-shore wind turbines, and of small wind turbines in urban areas), to the improved efficiency and manufacturing cost reduction related to wind turbines.

This thesis intended to describe wind power production through small powered systems, so called urban wind turbines, and their implementation on built environments.

A study regarding the use of wind power potential in the city of Lisbon was performed, based on wind data collected in the Meteorological Station of Lisbon (Dom Luiz Institute), analyzing the wind regime in its annual and seasonal cycles, and its variability, and showing the city's potential for wind energy production.

As case study, it was selected a micro generation wind system, subject of study in the present dissertation. The wind turbine selected to characterize the practical implementation of an urban micro generation system was the Omniflow turbine, mainly because it is an innovative product, recently developed by a national company, and that has a great market potential.

For this wind turbine are also described the installation systems by setting the equipment on building's roof top, and it was presented the related stability calculations.

Finally, it was performed a technical and economic assessment of the small wind turbine in study - an hybrid system that produces combined energy through the sun and wind - describing the costs associated with its full installation and addressing energetic production.

Keywords: Wind energy, Small wind turbines, Micro generation, Built environment, Omniflow wind turbine.

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Siglas e Abreviaturas.....	xix
Capítulo 1.....	1
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento do tema	1
1.1.1. A Energia Eólica.....	2
1.2. Objetivos da dissertação	3
1.3. Estrutura e organização da dissertação	4
Capítulo 2.....	7
2. Aproveitamento do potencial eólico urbano	7
2.1. Enquadramento legislativo	7
2.2. Energia Eólica no Mundo, na Europa e em Portugal	10
2.3. Especificidades da energia eólica em meio urbano	14
2.3.1. Microprodução	14
2.3.2. Energia eólica em meio urbano.....	18
2.4. Microgeração na Europa e no Mundo.....	19
2.4.1. Microgeração em Portugal.....	20
2.5. Caracterização de aerogeradores urbanos de nova geração.....	22
2.5.1. Evolução de turbinas eólicas.....	23
2.5.2. Caracterização pormenorizada de aerogeradores urbanos.....	28
2.5.2.1. Turbina eólica Turby	28
2.5.2.2. Turbina eólica Quietrevolution	28
2.5.2.3. Turbina eólica Windspire.....	29
2.5.2.4. Turbina RevolutionAir.....	30
2.5.2.5. Turbina Omniflow	30
2.5.3. Especificações técnicas.....	33
Capítulo 3.....	37
3. Caracterização dos regimes de vento e potencial eólico na cidade de Lisboa	37
3.1. Origem do vento	37

3.2.	Caracterização do escoamento atmosférico à superfície	37
3.2.1.	Ventos locais	38
3.3.	Estações de observação	40
3.3.1.	Fontes de informação / Recolha de dados	41
3.3.2.	Análise e tratamento de dados	43
3.4.	Caracterização da cidade de Lisboa	45
3.4.1.	O clima na cidade de Lisboa.....	46
3.5.	Caracterização temporal do regime de ventos da cidade de Lisboa	47
3.5.1.	Propriedades médias do vento	50
3.5.2.	Análise de frequência e intensidade.....	52
3.5.3.	Variabilidade espacial.....	54
3.6.	Potência disponível pelo vento numa turbina	55
3.6.1.	Coefficiente de potência.....	56
3.6.2.	Determinação da potência da turbina Omniflow.....	56
3.7.	Caracterização do potencial eólico em Lisboa	57
Capítulo 4.....		59
4.	Instalação de aerogeradores urbanos no edificado	59
4.1.	Tipos de coberturas.....	59
4.1.1.	Influência da forma da cobertura	61
4.2.	Limitações na instalação dos equipamentos	62
4.2.1.	Ruído acústico	63
4.2.1.1.	Infrassons.....	65
4.2.2.	Vibração	65
4.2.3.	Isoladores de ruído e vibrações.....	66
4.3.	Instalação de aerogeradores no edificado	67
4.3.1.	Soluções de fixações.....	68
4.3.2.	Aplicação do aerogerador Omniflow.....	68
4.3.2.1.	Descrição do equipamento Omniflow.....	69
4.3.2.2.	Dimensões e características dos elementos constituintes	69
4.3.2.3.	Ruído e Vibração	70
4.3.2.4.	Soluções de estruturas de fixação e suporte	70
4.4.	Ações e dimensionamento	71

4.4.1.	Ações permanentes	72
4.4.2.	Ações variáveis.....	72
4.4.2.1.	Ação do vento (W)	72
4.4.2.2.	Ação da neve (S).....	73
4.4.2.3.	Ação do sismo (E)	73
4.4.3.	Cálculo estrutural.....	74
4.5.	Verificação da segurança da turbina Omniflow OM 3.8.....	74
4.5.1.	Quantificação da ação do vento, de acordo com RSA [69].....	75
4.5.2.	Reações de cálculo.....	76
4.5.3.	Dimensionamento do maciço de apoio	76
4.5.3.1.	Verificação dos estados limites últimos de equilíbrio	77
4.5.4.	Verificação da sobrecarga admissível na laje de cobertura existente	78
Capítulo 5.....		81
5.	Aproveitamento eólico urbano em Lisboa	81
5.1.	Aproveitamento eólico urbano.....	81
5.2.	Aspetos económicos relativos a turbinas urbanas	81
5.2.1.	Custos envolvidos.....	82
5.2.2.	Eletricidade produzida	82
5.3.	Rendimento de um aerogerador urbano	83
5.4.	Estimativa do potencial eólico da Turbina Omniflow.....	83
5.4.1.	Análise do desempenho da turbina OM 3.8 em Lisboa.....	85
5.4.2.	Produção anual estimada OM3.8	86
5.4.3.	Estudo económico do investimento	87
5.4.3.1.	Venda de energia à rede.....	87
5.4.3.2.	Energia produzida para consumo interno	90
5.4.4.	Análise da viabilidade do projeto	92
Capítulo 6.....		95
6.	Conclusões	95
7.	Referências Bibliográficas.....	99
8.	Anexos	105
ANEXO I.....		107
ANEXO II.....		109

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Dependência energética de Portugal nos anos de 2000 a 2010.....	7
Figura 2.2 – Capacidade de produção de energia elétrica (GW)	11
Figura 2.3 – Potência Eólica instalada em Portugal	12
Figura 2.4 – Evolução da Potência Eólica instalada em Portugal Continental nos últimos 12 anos (MW)	12
Figuras 2.5 e 2.6 – Projeto WindFloat: fase de construção (à esquerda) e fase final (à direita) .	13
Figura 2.7 – Capacidade eólica instalada 2011 – 2012 (MW).....	13
Figura 2.8 – Esquema de turbina de eixo horizontal	15
Figura 2.9 – Coeficiente de potência de turbinas eólicas em função da velocidade na ponta da pá	16
Figura 2.10 – Valores de TSR consoante o número de pás	17
Figura 2.11 – Influência do edificado no escoamento do vento.....	18
Figura 2.12 – Influência do edificado no escoamento do vento.....	18
Figuras 2.13 e 2.14 – Número total (acumulado) de unidades instaladas no mundo em 2011 (à esquerda) e Capacidade total (acumulado) instalada no mundo em 2011 (kW) (à direita)	19
Figura 2.15 – Mapa da distribuição de fabricantes de micro-turbinas eólicas no mundo em 2011	20
Figura 2.16 – Metas para incentivo de FER	21
Figura 2.17 – Turbina original de Darrieus	24
Figura 2.18 – Turbina de Darrieus com asas verticais.....	24
Figuras 2.19 e 2.20 – Ciclo-turbina de Darrieus.....	25
Figura 2.21 e 2.22 – Turbinas de Darrieus com asas helicoidais	25
Figura 2.23 – Sistema eólico de Savonius	26
Figura 2.24 – Exemplo de turbina eólico de Savonius em construção.....	26
Figura 2.25 – Turbina HelixWind	27
Figuras 2.26 e 2.27 – Turbina Darrieus-Savonius	27
Figura 2.28 – Turbina eólica Turby.....	28
Figura 2.29 – Turbina eólica Quietrevolution	29
Figura 2.30 – Turbina eólica Windspire	29
Figuras 2.31 e 2.32 – Turbina RevolutionAir WT400W (à esquerda) e WT1kW (à direita)	30

Figura 2.33 – Escoamento do vento do sistema Omniflow	31
Figuras 2.34 e 2.35 – Painéis solares na asa invertida (à esquerda) e instalação da turbina no topo de edifício (à direita)	31
Figuras 2.36, 2.37 e 2.38 – Turbina Omniflow instalada: Beach Bar, Póvoa de Varzim (à esquerda); Edifício NET-Novas Empresas e Tecnologias, Porto (ao centro); Marina da Afurada, Vila Nova de Gaia (à direita)	33
Figura 2.39 – Turbina Omniflow na Douro Marina, em Vila Nova de Gaia.	33
Figura 2.40 – Curva de Potência de uma turbina eólica	34
Figura 3.1 – Aceleração do vento sobre uma elevação	38
Figuras 3.2 e 3.3 – Escoamento do vento em torno de um obstáculo, em zona urbana e zona isolada	39
Figura 3.4 – Variação da velocidade do vento com a altura	40
Figura 3.5 – Torre de medição	40
Figura 3.6 e 3.7 – Anemómetro de copos (à esquerda) e Sensor de direção (à direita).....	42
Figura 3.8 e 3.9 – Equipamentos de medição da velocidade e direção do vento na estação Lisboa/Geofísico (à esquerda) e Lisboa/Gago Coutinho (à direita)	42
Figura 3.10 – Localização das principais estações meteorológicas de Lisboa	43
Figuras 3.11 – Rosa-dos-ventos (à direita)	44
Figura 3.12 – Localização da cidade de Lisboa	45
Figura 3.13 – Área edificada de Lisboa.....	46
Figura 3.14 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2009.....	47
Figura 3.15 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2010.....	47
Figura 3.16 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2011	48
Figura 3.17 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2012.....	48
Figura 3.18 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Maio de 2013.....	48
Figura 3.19 – Ciclo diurno da velocidade do vento nos anos de 2009 a 2013	50
Figura 3.20 – Ciclo diurno da velocidade do vento nas estações do ano	51
Figura 3.21 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação de Inverno.....	52
Figura 3.22 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação da Primavera.....	53
Figura 3.23 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação de Verão	53
Figura 3.24 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação do Outono	54
Figura 3.25 – Movimento do vento ao atravessar uma turbina.....	55

Figuras 4.1 e 4.2 – Turbina Quietrevolution (à esquerda) e Omniflow (à direita), instaladas em coberturas	59
Figuras 4.3 e 4.4 – Cobertura inclinada (à esquerda) e cobertura em terraço (à direita)	60
Figura 4.5 – Variação do fluxo do vento consoante a forma da cobertura, ao longo do plano central	61
Figura 4.6 – Propagação do ruído acústico (turbina eólica), pelo caminho (ar), até ao recetor (edifício).....	63
Figura 4.7 – Alguns exemplos de apoios anti vibração	67
Figura 4.8 – Elementos constituintes da turbina Omniflow.....	69
Figura 4.9 – Pormenor tipo, corte e planta da ligação da base da coluna de suporte da turbina Omniflow	70
Figura 4.10 – Fixação da base da coluna de suporte da turbina Omniflow ao maciço de apoio	71
Figura 4.11 – Área aproximada de exposição do elemento à ação do vento.....	76
Figura 4.12 – Forças aplicadas para o cálculo da dimensão do maciço	77
Figura 4.13 – Estado Limite Último de Derrubamento	78
Figura 5.1 – Produção anual para os diferentes modelos Omniflow 3.8 (Fonte: Omniflow)	84
Figura 5.2 – Velocidade média anual do vento no período em análise	85
Figura 5.3 – Curva de potência da OM 3.8.....	85
Figura 5.4 – Reembolso do investimento inicial para venda de energia à rede.....	89
Figura 5.5 – Reembolso do investimento inicial para consumo interno de energia	91

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Classificação de “SWT” segundo a dimensão do rotor	15
Tabela 2.2 – Vantagens e Desvantagens.....	17
Tabela 2.3 – Unidades de Produção, por ano, ligada à rede.....	22
Tabela 2.4 – Principais características que diferem os 3 modelos Omniflow	32
Tabela 3.1 – Dados estatísticos da velocidade do vento (m/s)	49
Tabela 4.1 – Elementos estruturais constituintes da turbina Omniflow	69
Tabela 5.1 – Modelos Omniflow 3.8: energia anual produzida e investimento inicial	84
Tabela 5.2 – Produção anual do sistema de microprodução Omniflow	86
Tabela 5.3 – Poupança anual do sistema de microprodução Omniflow	88
Tabela 5.4 – Período de retorno do sistema de microprodução Omniflow	89
Tabela 5.5 – Poupança anual do sistema de microprodução Omniflow	90
Tabela 5.6 – Período de retorno do sistema de microprodução Omniflow	91

Siglas e Abreviaturas

CE	Conselho Europeu
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
EDP	Energias de Portugal
EMA	Estação Meteorológica Automática
ENE	Estratégia Nacional para a Energia
EU	União Europeia
EUROSTAT	Estatísticas Europeias
FER	Fontes de Energia Renováveis
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbine</i> (Turbina eólica de eixo horizontal)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Internacional Eletrotécnica)
NZEB	Near Zero Energy Buildings (Edifícios Energéticos Próximo de Zero)
PDF	Probability Density Function (Função Densidade Probabilidade)
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
RCM	Resolução de Conselho de Ministros
REBAP	Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado
REN	Redes Energéticas Nacionais
ROI	Return On Investment (Retorno sobre o Investimento)
RSA	Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes
RUEMA	Rede Urbana de Estações Meteorológicas Automáticas
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SRM	Sistema de Registo de Microprodutores
SWT	<i>Small Wind Turbine</i> (Turbinas eólica de pequenas dimensões)
TSR	<i>Tip-Speed Ratio</i>
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbine</i> (Turbina eólica de eixo vertical)
WWEA	<i>World Wind Energy Association</i> (Associação Mundial de Energia Eólica)

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Enquadramento do tema

Nas últimas décadas tem-se assistido no mundo a uma grande evolução no consumo de energia obtida através de fontes renováveis. Perante a escassez de recursos naturais não renováveis e limitados, as novas formas de captação de energia apareceram como uma alternativa essencial e imprescindível, que com o tempo foram ganhando um lugar de destaque no mercado e conquistando as populações devido às diversas vantagens e potencial que apresentam. [1]

Os recursos energéticos existentes mais utilizados pelo homem na geração de energia são o gás natural, o petróleo e o carvão, o que demonstra a sua dependência por essas matérias-primas. Estes materiais são combustíveis fósseis que devido à sua origem endógena e formação não são renováveis em tempo útil, nem é possível a sua fabricação, como tal são recursos escassos e limitados que devem ser preservados e salvaguardados antes que se esgotem. [2]

Este tipo de recursos não só tem limitações na sua produção como tem fortes impactos no ambiente com efeitos preocupantes, nomeadamente a emissão de gases de dióxido de carbono produzidos pela queima desses materiais que contribuem para o efeito de estufa e consequentemente o aumento da temperatura do planeta. [3]

As energias renováveis surgem assim da necessidade de procurar fontes de energia ilimitadas, que não se esgotem e ao mesmo tempo contribuam beneficentemente para o meio ambiente, sendo correntemente denominadas de energias verdes. É então possível produzir energia elétrica através de recursos naturais renováveis, inesgotáveis, como alternativa aos recursos já utilizados.

O Parlamento Europeu e o Conselho da Europa aprovaram a Diretiva 2001/77/CE, de 27 de Setembro de 2001, conhecida por Diretiva das Renováveis, a qual considera que as energias renováveis não estão a ser devidamente aproveitadas e como tal defende como prioridade o aumento de energia elétrica produzida a partir das mesmas, focando a necessidade de cada

estado-membro definir os seus objetivos nacionais para que todos colaborem no cumprimento dos compromissos internacionais, assumidos pela Comunidade Europeia [4].

Mais recentemente, segundo a Diretiva 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e o Conselho da Europa, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios, estes representam cerca de 40% do consumo de eletricidade na UE, sendo necessário implementar medidas inovadoras para reduzir o seu consumo bem como parte dessa energia derivar de fontes renováveis, reduzindo assim a emissão de gases com efeito de estufa até 2020. Impõe ainda que até ao fim do referido ano, todos os edifícios novos da UE sejam de balanço energético zero, ou próximo de zero, os chamados edifícios NZEB (*Near Zero Energy Buildings* - em português: edifícios energéticos próximo de zero), com forte necessidade de implementação de produção de energia a partir de fontes renováveis. [5]

De entre os diversos recursos naturais à disposição do homem, destacam-se a energia solar, eólica, hídrica, das marés e geotérmica, produzida respetivamente através do sol, vento, água, ondas do mar, e calor do interior da terra. Devido às diversas vantagens que apresentam, hoje em dia são utilizadas em grande escala, sobretudo porque as empresas cada vez mais optam por investir no consumo de energia de forma limpa.

1.1.1. A Energia Eólica

A energia eólica é umas das fontes de energia renovável que vem contribuir para a diminuição da utilização de combustíveis sólidos, não só pelos problemas ambientais que o uso destes provoca globalmente, mas também devido ao facto de estes terem sofrido um aumento significativo no seu preço nos últimos anos, fatores que contribuem visivelmente para a procura de outros meios de produção de energia. [6]

Hoje em dia, a energia eólica é uma das energias renováveis mais utilizadas em todo o mundo, ultrapassando a energia solar. É uma energia em constante evolução e com enorme potencial de crescimento, sendo considerada uma das mais promissoras fontes de energia. [2]

O vento é um recurso natural, infinito, abundante e disponível para o seu aproveitamento de forma sustentável na produção de energia limpa, sendo uma excelente alternativa face aos recursos convencionais.

Sendo uma fonte de energia 100% limpa, obtida através da captação do vento, a produção de energia eólica é realizada através de turbinas eólicas, também conhecidas por aerogeradores, compostas por um rotor e pás, instaladas em locais específicos para o efeito, após um estudo

detalhado das características do regime de vento favorável nesse mesmo local. A forma mais conhecida de captação de vento é através de turbinas-torre, colocadas em grupo ou de apenas uma, formando parques eólicos, com pás de grande comprimento que permite uma grande área varrida pelas mesmas e logo maior capacidade de incidência do vento.

Uma nova forma de aproveitamento do vento que constitui atualmente um avanço nesta tecnologia é através de parques eólicos *offshore*, isto é, instalação de turbinas no mar. Apesar de em geral requererem um maior investimento, pois nestes sistemas as torres são mais altas, com fundações especiais no mar e os equipamentos necessitarem de maior manutenção devido ao contacto com a água, é uma tecnologia em crescimento e que tem vindo a ser aproveitada pelos países europeus [2], principalmente situados no Norte da Europa, tais como Inglaterra, Dinamarca, Bélgica e Alemanha [7].

Para além da instalação de turbinas-torre em parques *onshore* (em terra) e parques *offshore* (em mar), nos últimos anos muitos foram os que desenvolveram sistemas de pequena produção de energia eólica, especialmente indicadas para uso doméstico, investindo num novo mercado conhecido por microgeração de energia.

As turbinas-torre apenas podem ser instaladas em locais com características específicas de vento, espaços amplos e com reduzida turbulência. Os aerogeradores urbanos são micro-turbinas adaptadas para a possibilidade de se instalarem em telhados ou jardins e assim contribuir para a produção de eletricidade no sector doméstico. No entanto esta nova tendência enfrenta algumas dificuldades, nomeadamente na captação de vento em meio urbano. O edificado induz um escoamento complexo e muitas vezes turbulento gerando fluxos de ar muito irregulares, mudanças de direção, redução ou aumento significativo da velocidade do vento, o que dificulta o seu processo de captação. A capacidade de aproveitamento do vento diminui e provoca maior desgaste nas turbinas. [8]

1.2. Objetivos da dissertação

A realização desta dissertação tem como objetivo contribuir para a divulgação e conhecimento de uma área de especialização pouco divulgada no país.

A energia elétrica produzida através do vento encontra-se em grande desenvolvimento, e é de uma grande potencialidade relativamente a outras formas de produção de energia. Com os diversos avanços ao qual está associada, destaca-se nesta dissertação o potencial da instalação

de pequenos aerogeradores em cidades e meios urbanos, que contribuam para a geração de eletricidade ao nível do consumidor doméstico.

Com a realização deste trabalho pretende-se fazer a caracterização do potencial eólico urbano e sua aplicação, recorrendo às mais recentes tecnologias de micro-turbinas eólicas. O estudo efetuado permite caracterizar o recurso eólico e a sua eventual exploração em meio urbano, para além da análise da componente de engenharia civil no que diz respeito às estruturas de suporte e de fixação de aerogeradores a edifícios.

Pretende-se ainda refletir sobre os conhecimentos adquiridos na pesquisa associada ao potencial eólico urbano implementando na cidade de Lisboa, através de um estudo detalhado sobre o regime de ventos ao longo da cidade.

1.3. Estrutura e organização da dissertação

A dissertação está organizada em 6 capítulos:

- O primeiro e presente capítulo diz respeito a considerações gerais para a introdução ao tema em estudo, referindo os seus objetivos, importância e descrição da estrutura dos vários capítulos que o compõem.
- No segundo capítulo é desenvolvido um enquadramento das energias renováveis no Mundo e na Europa, e uma caracterização do potencial eólico urbano no Mundo e na Europa, analisando de uma forma sucinta a evolução e avanços da energia do vento, nomeadamente a instalação de micro-turbinas em meios urbanos, referenciando e comparando alguns aerogeradores urbanos de nova geração existentes no mercado.
- No capítulo seguinte, terceiro capítulo, apresenta-se um estudo detalhado sobre as características do escoamento do vento à superfície, analisando o seu aproveitamento energético. Realiza-se a caracterização temporal dos regimes de vento presentes na cidade de Lisboa, sendo este o caso de estudo escolhido, de forma a proceder a uma análise do recurso eólico e potencial disponível na cidade.
- No quarto capítulo descreve-se o estudo realizado sobre as estruturas de suporte e de fixação dos aerogeradores a edifícios, analisando diversos tipos de instalação da turbina eólica selecionada, Omniflow, e detalhe de especificações e considerações técnicas necessárias para proceder à sua instalação.

-
- O quinto capítulo refere-se ao aproveitamento eólico na cidade de Lisboa, com destaque para uma análise da viabilidade técnico-económica do sistema de microprodução eólica em análise, Turbina Omniflow 3.8.
 - No sexto capítulo apresenta-se uma síntese das conclusões relevantes, obtidas com o trabalho realizado.
 - Por último seguem-se os Anexos: o Anexo I inclui uma tabela comparativa das especificações técnicas de alguns aerogeradores urbanos existentes no mercado; o Anexo II refere-se ao estudo do escoamento do vento na cidade de Lisboa, de acordo com dados disponíveis entre Janeiro de 2009 e Maio de 2013, com gráficos detalhados sobre as suas características.

Capítulo 2

2. Aproveitamento do potencial eólico urbano

2.1. Enquadramento legislativo

Portugal é um país que aparentemente não tem a capacidade de gerar combustíveis de origem fóssil, como o petróleo e o carvão, dada a inexistência de reservas no subsolo do seu território. Estas matérias são fundamentais para assegurar a produção de energia elétrica, sendo então evidente a necessidade de importação de combustíveis fósseis com a elevada dependência energética do exterior que isso representa.

Nos últimos anos verificou-se que o consumo energético português a partir de fontes convencionais fósseis tem vindo a reduzir-se, e tal se deve ao investimento e aposta nas energias renováveis. Segundo dados do EUROSTAT, em 2005 Portugal atingiu o pico mais alto de dependência energética com cerca de 89% (Figura 2.1), e desde então esse valor tem diminuído atingindo 77,4% em 2011, ano em que ocupava o sétimo lugar dos países mais dependentes de importação de energia. [9]

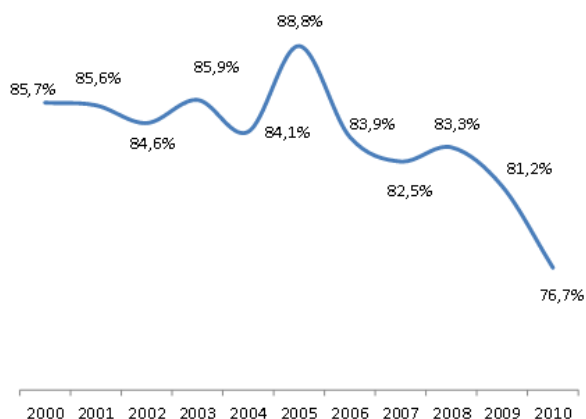


Figura 2.1 – Dependência energética de Portugal nos anos de 2000 a 2010

(Fonte: Planeamento Energético (2012). Seminário Internacional Portugal-Brasil. Universidade do Minho)

De facto, os combustíveis fósseis são matérias-primas de tal ordem importantes e fundamentais para diversos sectores, como o sector dos transportes, o que torna difícil a sua substituição por

outro tipo de recursos. Contudo, apesar da grande dependência mundial pelos combustíveis fósseis, estes apresentam inconvenientes. São extremamente prejudiciais para o meio ambiente e devido à sua origem demoram centenas de anos a formarem-se de novo. As energias renováveis ilimitadas são a grande alternativa face a estes recursos tradicionais, introduzindo no mercado da energia: segurança ambiental, competitividade e eficiência.

Nas últimas décadas o consumo de combustíveis fósseis tem constituído uma preocupação para as comunidades, sobretudo devido ao custo e ao impacto negativo que têm no meio ambiente, com as consequências que tal acarreta. Tem-se assim como prioridade, a necessidade de reduzir a dependência por esses materiais, a nível mundial, enaltecendo a importância de investir em novas fontes de produção de energia limpa.

A 27 de Setembro de 2001, a UE aprovou a Diretiva 2001/77/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, na qual assegura a necessidade de incentivar e impulsionar a utilização de recursos renováveis na produção de eletricidade, reconhecendo que não está a ser devidamente aproveitado todo o potencial da exploração das fontes renováveis. Descreve as vantagens da utilização de fontes de energia renováveis na produção de eletricidade, pois *“contribui para a proteção do ambiente e o desenvolvimento sustentável”* e *“poderá criar postos de trabalho a nível local, ter um impacto positivo na coesão social e económica”*, e declara prioritário o incentivo à sua utilização. [4]

Reconhece ainda que seria benéfico a utilização de energia renovável a fim de ajudar a cumprir os objetivos ambientais estabelecidos no Protocolo de Quioto, elaborado pela Convenção-Quadro das Nações Unidas relativamente às preocupantes alterações climáticas no planeta e o impacto que as emissões de determinados gases com efeito de estufa provocam no mesmo. Tendo isto em conta, os países industrializados comprometeram-se a colaborar na redução das emissões de gases nocivos (GEE), entre 2008 e 2012, em cerca de 5% em relação a dados registados em 1990. [4]

A referida Diretiva determina que cada Estado-Membro, dos 15 Estados-Membros que até então faziam parte da Comunidade da UE, deverá estabelecer metas nacionais reais de consumo de eletricidade a partir de fontes de energia renováveis (FER), de modo a poderem contribuir para os objetivos assumidos pela Comunidade, isto é, cerca de 22% do consumo total de eletricidade da Comunidade Europeia em 2010 deverá ser proveniente de FER. O objetivo definido para Portugal foi o de atingir 39% de produção de energia elétrica através de recursos renováveis até 2010 (Anexo da referida diretiva), verificando-se a necessidade de garantir elevados investimentos nessa área. [4]

Embora o objetivo fosse ambicioso e requeresse um grande apoio financeiro por parte dos governos e empresas, tanto a UE como Portugal poderiam não atingir as metas estabelecidas no tempo necessário. No caso de Portugal, a produção de energia elétrica através de centrais hidroelétricas é até hoje, e continuará a ser, a que mais contribui para o quadro energético renovável português, com uma participação de cerca de 75% [10] na produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis no ano 2002. Embora Portugal tenha grande potencial, especialmente no norte e centro do país, não se pode simplesmente construir barragens e usufruir do seu potencial de produção de energia, e como tal não se verificava um crescimento desta energia que satisfizesse os objetivos a longo prazo. Assume-se assim a necessidade de diversificar a produção de eletricidade, promovendo maior competitividade do mercado, e utilizar outras fontes renováveis, sobretudo energia eólica e solar que têm grande potencial de desenvolvimento e que contribuem eficazmente para o panorama energético sustentável. [10]

A Comissão da Comunidade Europeia, de 19 de Outubro de 2006, que apresenta o Plano de Ação com medidas que visam contribuir para a melhoria da Eficiência Energética e da economia em geral na UE, considera que se deverá poupar pelo menos 20% da energia primária total na UE até 2020, traduzindo-se numa poupança de cerca de 100 mil milhões de euros em combustíveis fósseis anualmente, e assim colaborando para alcançar com sucesso os compromissos assumidos pela Comunidade no Protocolo de Quioto. [11]

Em Março de 2007, foi elaborada pelo Conselho Europeu uma nova proposta de metas ambientais mais ambiciosas face ao estabelecido previamente no Protocolo de Quioto de 1997, com o intuito de combater as alterações climáticas, conhecida pela “meta europeia dos três 20’s” (20-20-20), que consiste em [12]:

- Redução em 20% da emissão de gases com efeito de estufa até 2020, em relação a 1990;
- Aumentar a utilização de energia a partir de fontes renováveis, atingindo 20% no total do consumo energético até 2020;
- Poupar 20% do consumo de energia primária total da UE até 2020, aumentando a eficiência energética.

Este pacote Clima-Energia inclui ainda uma meta de 10%, para todos os estados-membros, na utilização de biocombustíveis no consumo total de combustível para transportes na UE até 2020 [12]. Esta proposta foi aprovada em Dezembro de 2008 pelo Parlamento Europeu, sendo o referido pacote posto em ação pelos estados-membros e seus governantes. [13]

Perante o objetivo comunitário global de 20% de melhoria de eficiência energética até 2020, a Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis, afirma que cada estado-membro, dos 27 países que fazem parte da comunidade, deverá apresentar à Comissão Europeia um Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) até 30 de Junho de 2010. Estabelece ainda metas nacionais para cada estado de modo a poder cumprir o objetivo, sendo que a quota de energia obtida através de fontes renováveis no consumo final bruto de energia definida para Portugal até 2020 é de pelo menos produzir 31% de renováveis, considerando o valor registado em 2005 de 20,5 % (Anexo I da referida diretiva). [14]

De acordo com o PNAER 2010, ao abrigo da Diretiva 2009/28/CE, mais de 40% da energia elétrica produzida em Portugal deve-se ao aproveitamento de FER e cerca de 20% do consumo final de energia é obtida através de recursos renováveis [15], o que demonstra a capacidade de aproveitamento das novas tecnologias por parte do nosso país e o potencial para poder alcançar as metas europeias definidas.

A 15 de Abril de 2010, foi aprovada a Resolução de Conselho de Ministros nº 29/2010 em que se estabelece a Estratégia Nacional para a Energia para o horizonte 2020 (ENE 2020) que tem como principal objetivo manter Portugal na liderança europeia nas energias renováveis, assegurando um lugar nos cinco primeiros lugares com vista ao cumprimento dos objetivos de 2020. Para tal, define estratégias segundo cinco eixos fundamentais em que o segundo eixo é o principal e que atribuiu especial importância na aposta nas energias renováveis promovendo a sua utilização e desenvolvimento. [16]

2.2. Energia Eólica no Mundo, na Europa e em Portugal

Segundo estatísticas apresentadas na Comissão Europeia, pelo EUROSTAT, em 2010 a percentagem de energia consumida a partir de FER nos 27 estados-membros da UE era de 12,5%. Considerando as metas definidas para 2020 que entraram em vigor no ano 2005, com um intervalo de 15 anos para poderem ser atingidas, de acordo com os valores registados no ano base de 8,1%, verifica-se que após 5 anos um terço foi obtido, o que significa que a comunidade se encontrava no bom caminho para poder alcançar o objetivo final. [17]

Portugal também satisfazia a sua meta indicativa nacional (31% em 2020), com uma percentagem de 24,6% de consumo final bruto de energias renováveis em 2010, mais 4,1% que os dados de 2005. [17]

A partir de 2000 houve um forte aumento na capacidade de produção de energia eólica na Europa, e entre 2005 e 2010 essa capacidade renovável duplicou, passando de cerca de 40 GW para mais de 80 GW, como se pode verificar na Figura 2.2. Em 2010 a energia eólica representava cerca de 24% da energia elétrica renovável na UE, atrás da hídrica que detinha a grande fatia, 53%. [17]

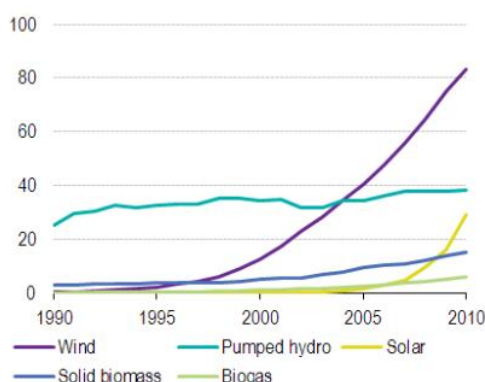


Figura 2.2 – Capacidade de produção de energia elétrica (GW)

(Fonte: Eurostat, Statistics in focus, 44/2012)

Em Portugal, até ao início do novo milénio a aposta nas energias renováveis resumia-se essencialmente ao aproveitamento da água para geração de energia elétrica (energia hidroelétrica), e tal representa a maior parte da percentagem de geração de eletricidade produzida através de FER. A partir de 2000, e dada a necessidade premente de avançar por outros caminhos, abriu portas a outro tipo de energias e houve um grande investimento nos dez anos seguintes na utilização do vento para produção de energia elétrica.

Tanto o sol como o vento são duas fontes de energia ilimitadas e disponíveis em todo o país, apesar de determinados locais não terem capacidade suficiente, do ponto de vista técnico e económico, para produção de energia eólica ou fotovoltaica.

A energia eólica destaca-se dos restantes recursos renováveis disponíveis no mercado pois é a que apresenta maior potencial de crescimento e participação ativa na sustentabilidade energética e ambiental. Isto se deve ao fato de associar os desenvolvimentos tecnológicos, estruturais e de captação da energia do vento (construção de torres mais altas e turbinas com pás maiores), com a elevada rentabilidade económica a curto e médio prazo, e a consequente recuperação do investimento financeiro mais rápido comparando a outras energias [18].

Analisando a seguinte figura (Figura 2.3), verifica-se que em 2001, Portugal tinha apenas 114 MW de potência eólica instalada que representavam 1,5% na produção total de energia renovável. Em 2004 tinha 537 MW, quatro vezes mais em três anos, que representavam 6,3% notando-se um crescimento considerável desta energia. No final de 2007 a capacidade eólica

instalada ultrapassava 2000 MW (Figura 2.4), mais de 24% na produção total de FER, revelando o seu grande potencial e contributo para o sector da energia elétrica nacional. [18]

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008*
Potência instalada (MW)	114	175	253	537	1047	1681	2108	2556
Prod. Energia eólica (GWh)	239	341	468	787	1741	2892	4007	4850
% na produção total de energia renovável	1,5	3,4	2,6	6,3	20,1	17,9	24,6	33,8

(*) Até Julho de 2008.

Fonte: DGEG, Estatísticas Rápidas, nº 41, Julho

Figura 2.3 – Potência Eólica instalada em Portugal

(Fonte: Ventos de mudança. A Energia Eólica em Portugal. Universidade Nova de Lisboa)

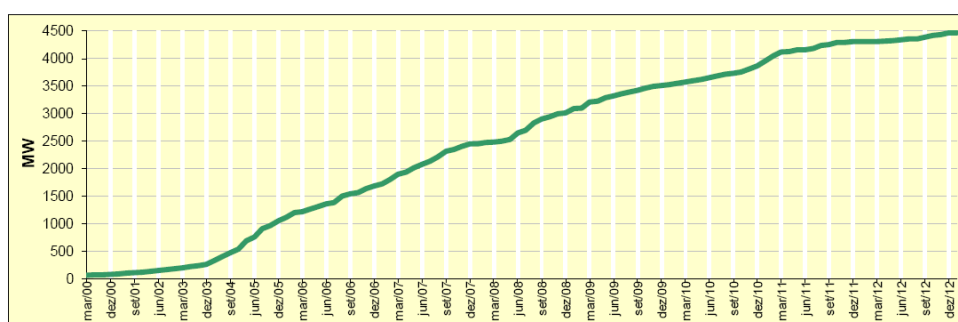


Figura 2.4 – Evolução da Potência Eólica instalada em Portugal Continental nos últimos 12 anos (MW)

(Fonte: www.dgeg.pt: Renováveis, Estatísticas Rápidas, Janeiro 2013)

Segundo o centro de informações da REN (Redes Energéticas Nacionais, SA) em 2011 registaram-se valores históricos no quadro da energia elétrica em Portugal em que as FER representam 54% da potência de energia total ligada ao Sistema Elétrico Nacional (SEN), e a parcela respeitante à energia eólica é de 22%. [19]

Ainda nesse ano, Portugal deu um grande passo numa nova tecnologia da energia eólica com a instalação da primeira plataforma eólica portuguesa *offshore*, a cargo da EDP – Energias de Portugal – e seus parceiros, para aproveitamento do vento em mar aberto. O sistema pioneiro a nível mundial, denominado por *WindFloat* (Figuras 2.6), teve instalação, em Dezembro de 2011, ao largo da costa da Aguçadoura, na Póvoa de Varzim, de um aerogerador com uma capacidade de 2 MW de energia [20], entrando em funcionamento experimental em Maio de 2012.

Este projeto português de exploração de potencial eólico em mar (eólica *offshore*) consiste numa plataforma flutuante semi-submersível, independente da profundidade do mar, e a inovação assenta na construção e montagem da estrutura e turbina em terra firme (Figura 2.5) dispensando barcos, gruas e qualquer equipamento de carga pesada de construção. Após a

finalização da construção, seguiu-se o reboque da *Windfloat* por mar, cerca de 400 km. A sua monitorização é feita à distância, 24 horas por dia. [21]



Figuras 2.5 e 2.6 – Projeto WindFloat: fase de construção (à esquerda) e fase final (à direita)
(Fonte: XIX Congresso da Ordem dos Engenheiros (2012) - Projeto WindFloat. Lisboa)

O grupo EDP é uma empresa portuguesa com forte presença mundial, nomeadamente no sector eólico, sendo atualmente considerada o terceiro maior operador mundial de energia eólica, através da EDP Renováveis. Com uma capacidade mundial instalada de 7,5 GW [21], distribui-se pela Europa (Portugal, Espanha, França, Bélgica, Itália, Reino Unido, Polónia e Roménia), América do Norte (Estados Unidos da América e Canadá), América do Sul (Brasil) e África (África do sul).

No primeiro semestre de 2012, Portugal encontrava-se na 10^a posição no ranking mundial de capacidade energética eólica instalada, segundo dados da *World Wind Energy Association* (WWEA), com uma potência de 4 398 MW instalados, mais 19 MW que em 2011, numa lista liderada pela China, seguida dos Estados Unidos e Alemanha (Figura 2.7). [22]

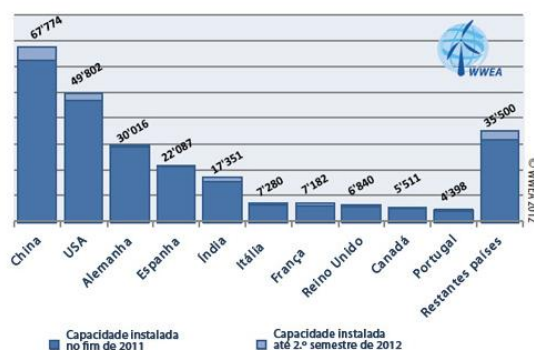


Figura 2.7 – Capacidade eólica instalada 2011 – 2012 (MW)

(Fonte: <http://expresso.sapo.pt/portugal-continua-no-top-10-mundial-da-energia-eolica=f76123>)

No final de 2012, Portugal detém um total de 4 525 MW de potência instalada dos quais 2 MW pertencem a eólicas *offshore*. [23]

2.3. Especificidades da energia eólica em meio urbano

2.3.1. Microprodução

A microgeração é uma área de energias renováveis que visa a produção de energia elétrica, em pequena escala, através de instalações de pequena potência. A energia solar é a mais conhecida fonte de microgeração, no entanto outras existem como a mini-hídrica, e mais recentemente, a energia eólica em meio urbano.

A energia solar é a grande força no mercado da microgeração pois é uma energia bastante evoluída, com alguns anos de desenvolvimento. A energia eólica na área da microprodução ainda se encontra bastante afastada da implementação do solar fotovoltaico. [24]

A utilização de turbinas eólicas de pequena dimensão (aerogeradores urbanos) em meio urbano, quando comparadas às convencionais turbinas eólicas, é uma área inovadora no sector eólico e relativamente recente em Portugal. Trata-se da oportunidade de aproveitar o vento em meios urbanos através de instalação de micro-turbinas eólicas no topo de residências/edifícios ou no solo, em locais com considerável disponibilidade de vento, e contribuir para a produção de energia elétrica doméstica.

É uma tecnologia em desenvolvimento que permite adaptar o funcionamento de pequenas turbinas em ambiente urbanos e construídos, com uma capacidade até 100 kW (dependendo do país) e a área de captação do vento incidente inferior a 200 m², promovendo uma elevada eficiência energética e baixo custo de produção. [25]

A norma internacional em vigor, IEC-61400 (*International Electrotechnical Commission Standards*), estabelece requisitos sobre Sistemas Geradores de Turbinas eólicas. A segunda parte da referida norma diz respeito aos requisitos de projeto para turbinas eólicas de pequeno porte, com áreas de captação inferior a 200 m².

Segundo a norma IEC-61400-2, os aerogeradores urbanos são denominados por SWT's "*Small Wind Turbines*" (em português: turbinas eólicas de pequenas dimensões) e classificados segundo a dimensão e orientação do rotor.

A Tabela 2.1 classifica as turbinas eólicas de pequenas dimensões segundo o diâmetro do rotor, área varrida pelas pás, intervalo de potência nominal e as respetivas aplicações.

Tabela 2.1 – Classificação de “SWT” segundo a dimensão do rotor

	Diâmetro do rotor (m)	Classificações normativas Área varrida (m²)	Classificações comuns Potência nominal (kW)	Aplicações
Micro-turbina	$D < 1,6$	$A > 2$	$P_u < 5$	Doméstico
Mini turbina	$1,6 < D < 5$	$2 < A < 78,5$	$5 < P_u < 50$	Urbanizações e pequenas empresas
Pequena turbina	$5 < D < 16$ m	$78,5 < A < 200$	$50 < P_u < 500$	Grandes urbanizações e PME's consumo significativo

(Fonte: Aproveitamento de Eólica em ambiente urbano e construído. Artigo Renováveis Magazine, LNEG)

Como as micro-turbinas têm uma área de captação da energia incidente inferior a 2 m^2 , não é necessário projetar a torre da estrutura. [25]

Quanto à orientação do rotor, os aerogeradores são classificados segundo dois tipos, eixo de rotação horizontal, denominado por HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine* - em português: turbina eólica de eixo horizontal), e eixo de rotação vertical VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine* - em português: turbina eólica de eixo vertical). [25]

As turbinas eólicas de eixo horizontal (Figura 2.8) são tradicionalmente mais utilizadas por o rotor estar alinhado segundo o eixo horizontal, ou seja, paralelo à direção do vento, o que permite um melhor posicionamento da turbina face ao escoamento do vento. No entanto só entram em funcionamento quando orientadas na direção do vento, logo algumas necessitam de um mecanismo de alinhamento aerodinâmico (“leme”) [8]. São indicadas para cenários afastados de populações devido à produção de ruído e vibrações.

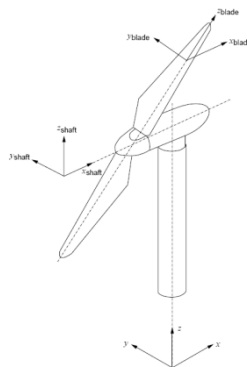


Figura 2.8 – Esquema de turbina de eixo horizontal

(Fonte: IEC 61400-2:2006 (E) - Wind Turbines, Part 2: Design requirements for small wind turbines)

O sistema eólico de eixo vertical apresenta algumas vantagens como o facto de não precisar de estar orientado na direção do vento para ser eficiente, pois são omni-direcionais e captam o vento em qualquer direção, dispensando qualquer mecanismo de orientação direcional; simplicidade de conceção; e o apoio pode ser instalado mais perto do solo, facilitando operações de manutenção dos equipamentos. Têm melhor comportamento em meio urbano e não produzem tanto ruído como as turbinas de eixo horizontal. [24]

Na figura 2.9 observa-se que o coeficiente de potência de turbinas eólicas varia consoante a velocidade atingida nas pás em rotação. A noção sobre coeficiente de potência de uma turbina será analisada em detalhe no Capítulo 3 (3.2.1).

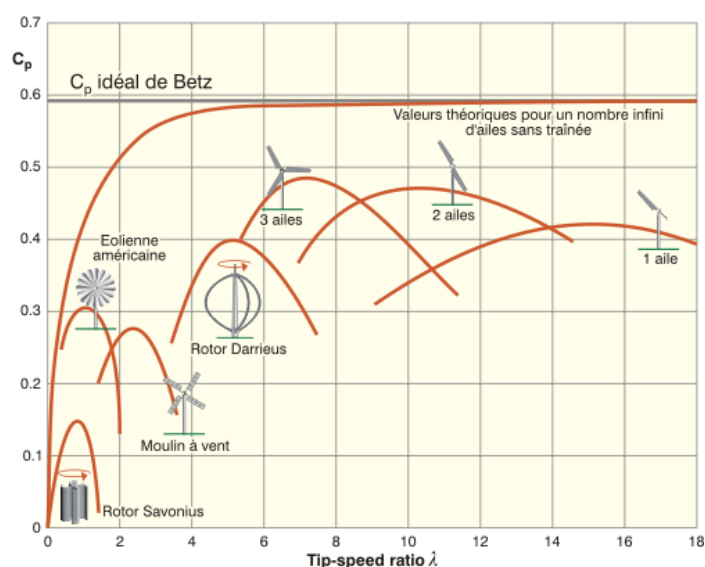


Figura 2.9 – Coeficiente de potência de turbinas eólicas em função da velocidade na ponta da pá
(Fonte: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657>)

Alguns inconvenientes são apontados na utilização de micro-turbinas em meio urbano nomeadamente a possibilidade de gerarem ruído e vibrações durante o seu funcionamento.

O ruído emitido por uma turbina eólica relaciona-se com uma escala TSR (*Tip-Speed Ratio*) que mede a relação da velocidade de rotação da ponta da pá e a velocidade real do vento. Este índice depende não só do *design* da turbina eólica e das lâminas, como do número de lâminas do rotor. Quanto menor o número de pás, maior será a velocidade das lâminas (Figura 2.10), e maior será o coeficiente de potência e eficiência da turbina, no entanto corresponde a valores de TSR elevados. [26]

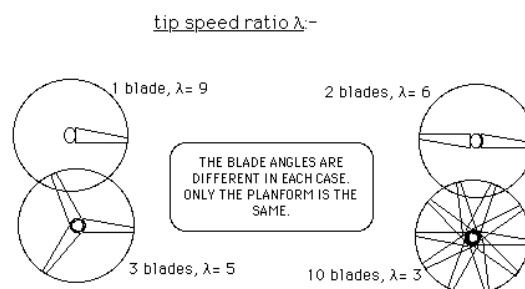


Figura 2.10 – Valores de TSR consoante o número de pás

(Fonte: http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_tip_speed_ratio.html)

As turbinas de eixo horizontal têm valores de TSR aproximadamente 7, o que significa que emitem algum ruído indesejado e devem ser instaladas em locais afastados de zonas residenciais e aglomerados populacionais [8]. As turbinas de eixo vertical têm valores de TSR mais baixos, não emitem ruído significativo embora tenham uma quebra de eficiência na captação da energia do vento. [24]

Na tabela 2.2 apresentam-se as principais vantagens e desvantagens dos dois sistemas de eixo de turbinas eólicas.

Tabela 2.2 – Vantagens e Desvantagens

	Vantagens	Desvantagens
HAWT	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência (20-40%) 	<ul style="list-style-type: none"> • Algum ruído perturbador (TSR elevado) • Vibrações • Sombreamento • Não são indicadas para ambientes urbanos
VAWT	<ul style="list-style-type: none"> • Omni-direcional • Não emitem ruído (TSR baixo) • Bom funcionamento em ambiente urbano 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência (10-20%) • Sombreamento

O efeito sombreamento deve-se aos componentes móveis visíveis, isto é, ao movimento de rotação das pás das turbinas eólicas. Devido a este movimento provocam-se sombras intermitentes que podem ter efeito desagradável e perturbador na vizinhança.

2.3.2. Energia eólica em meio urbano

Um dos grandes desafios de turbinas eólicas em meios urbanos é a tipologia do terreno e o edificado construído. Estes obstáculos afetam o normal escoamento do vento, reduzem a sua velocidade, criam fluxos de ar irregulares e várias correntes de vento em torno de edifícios (Figura 2.11), e dificultam a caracterização do potencial eólico urbano. [8]

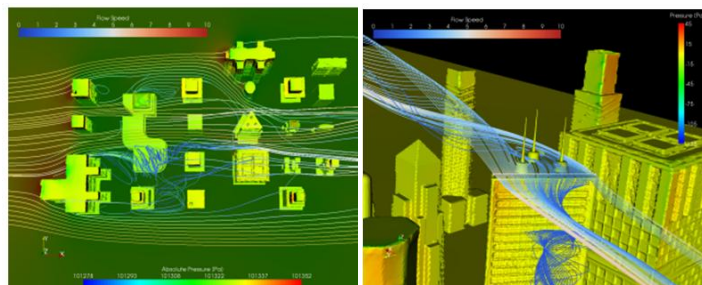


Figura 2.11 – Influência do edificado no escoamento do vento

(Fonte: Apresentação Pedro Ruão - Turbina Omniflow, Workshop Sustentabilidade e Eficiência Energética, APFM e EDP, 2013)

Adicionalmente, o escoamento é muito turbulento o que diminui a capacidade de aproveitamento total da energia do vento numa turbina e pode provocar desgaste e rotura da mesma. [27]

A melhor localização para instalação de uma micro-turbina eólica deve ser tal que na zona circundante não existam obstáculos nem entraves ao seu aproveitamento, principalmente na direção do vento dominante. Interessa portanto um local onde não existam nas proximidades edifícios mais altos, que interfiram fortemente com a direção do vento, nem edifícios de altura semelhante ao edifício a instalar, sendo que o ideal seria a instalação em edifícios isolados. Tendo isto em conta, as turbinas a instalar devem ter uma estrutura com uma altura que seja suficiente para ultrapassar a zona de maior turbulência no topo do edifício. Essa altura deve ser superior a metade da largura do edifício (Figura 2.12), e assim captar mais eficazmente o vento incidente. [24]

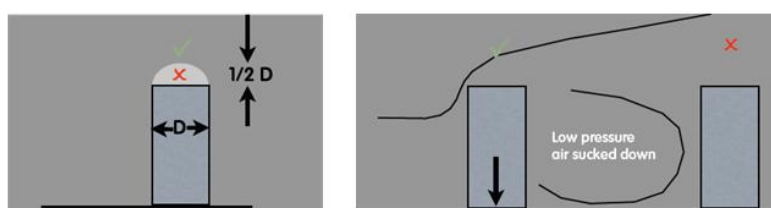


Figura 2.12 – Influência do edificado no escoamento do vento

(Fonte: Apresentação Pedro Ruão - Turbina Omniflow, Workshop Sustentabilidade e Eficiência Energética, APFM e EDP, 2013)

A turbina deve ser instalada num local com grande disponibilidade de vento, e uma avaliação do regime de vento é fundamental para aferir a viabilidade do local. Apesar da elevada importância para o bom funcionamento e desempenho da unidade, esse tipo de avaliação e os programas necessários podem ser dispendiosos. [28]

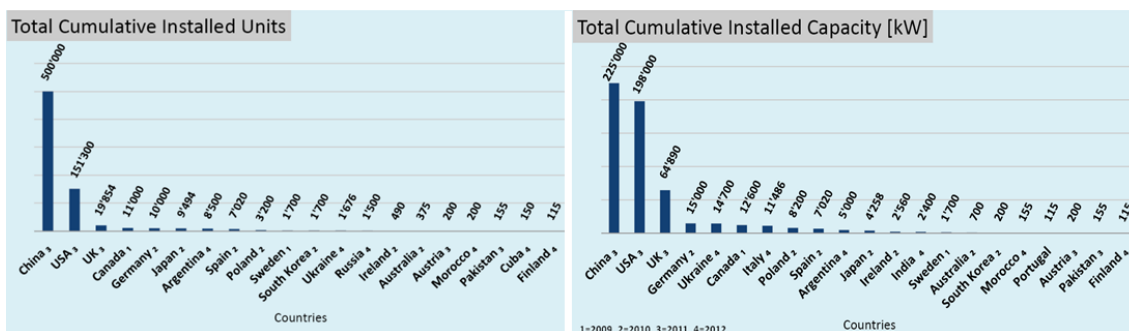
2.4. Microgeração na Europa e no Mundo

O mercado global de micro-turbinas eólicas encontra-se em crescimento.

Segundo dados fornecidos pela *World Wind Energy Association* (WWEA), em 2009 foram instaladas mais de 60 000 micro-turbinas no mundo, pertencente a um total acumulado de 521102 micro-turbinas. Em 2010, houve um aumento de 26% em relação ao ano anterior, com mais de 656 000 turbinas em funcionamento que representavam cerca de 382 GWh em produção anual de energia. No final de 2010, a microprodução eólica tinha uma capacidade total instalada de mais de 440 MW. [29]

Em 2011, o número de instalações continuou a aumentar em cerca de 11%, com um total acumulado de 730 000 micro-turbinas instaladas no mundo. No final do ano, devido às novas instalações que introduziam mais de 120 MW, quase o dobro que em 2010, a capacidade mundial de microprodução eólica instalada atingiu valores acima de 570 MW. [28]

Segundo as figuras 2.13 e 2.14, conclui-se que os países que mais contribuem para a evolução deste sector são: China, Estados Unidos e Reino Unido. O país asiático é, mais uma vez, uma grande potência e líder de mercado, e em 2010 tinha 450 000 micro-turbinas instaladas, apesar de apenas cerca de 250 000 estarem a produzir eletricidade [29]. Em 2011 esse valor foi aumentado com mais 50 000 unidades instaladas e o total das suas unidades em funcionamento representava cerca de 68% do mercado global. Os Estados Unidos e o Reino Unido apresentam mais de 150 000 e 19 000 unidades, respetivamente. [28]



Figuras 2.13 e 2.14 – Número total (acumulado) de unidades instaladas no mundo em 2011 (à esquerda) e Capacidade total (acumulado) instalada no mundo em 2011 (kW) (à direita)
(Fonte: WWEA *Small Wind Report* - 2013 Small Wind World Report Update)

A falta de regulamentação, de apoio financeiro e entraves governamentais são os principais obstáculos à evolução da microprodução eólica. Alguns países não estão familiarizados com a tecnologia e como tal ainda não contribuem para o seu desenvolvimento e expansão.

Quanto ao fabrico de pequenas turbinas eólicas, a produção encontra-se maioritariamente concentrada na América do Norte e na China, com alguma influência da Europa (Reino Unido e Alemanha) (Figura 2.15).

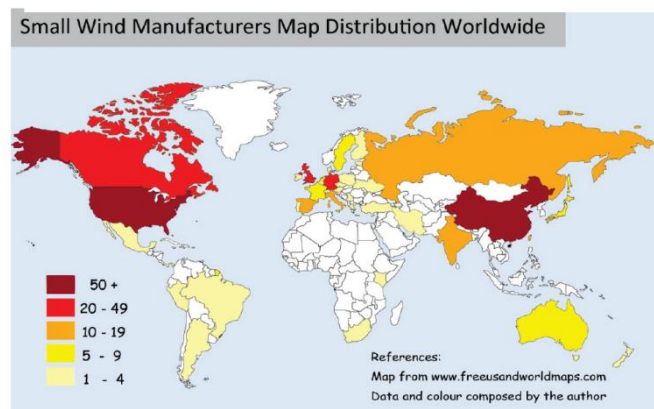


Figura 2.15 – Mapa da distribuição de fabricantes de micro-turbinas eólicas no mundo em 2011

(Fonte: WWEA *Small Wind Report* - 2013 Small Wind World Report Update)

A microprodução eólica, em comparação com a energia solar e a grande energia eólica, ainda se encontra em desenvolvimento mas é esperado que até 2020 tenha uma evolução semelhante, e possa ajudar no cumprimento dos objetivos da Diretiva Europeia 31/EU/2010 para 2020. É necessário que governos e organizações internacionais percebam o potencial de energia eólica em ambientes urbanos, que se interessem por esta tecnologia e incentivem o seu desenvolvimento com políticas, regimes de apoio e financiamento. [28]

2.4.1. Microgeração em Portugal

Segundo Estanqueiro e Simões (2010), Portugal foi dos primeiros países no mundo a publicar legislação e regulamento de tarifas no sector da microgeração, que incluía não só a microgeração fotovoltaica como também a eólica. [8]

A 2 de Novembro de 2007 surge o Decreto-Lei nº 363/2007, conhecido por “Lei da Microgeração”, que regula a microprodução de energia elétrica em baixa tensão e pequena potência a partir de FER, ligada à rede local e para consumo residencial. O documento estabelece um regime de licenciamento simplificado através de uma plataforma da internet de

interação com produtores e administração pública, identificada por *Sistema de Registo de Microprodutores (SRM)*, no sítio *Renováveis na hora*. Este sistema, gerido pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), facilita o processo de licenciamento com a criação de uma base de dados. Para a microprodução eólica, assenta a obrigatoriedade de os produtores possuírem um seguro de responsabilidade civil, certificando o cumprimento das normas legais e regulamentares aplicáveis à instalação de geradores eólicos. [30]

O Decreto-Lei no 26/2010, de 30 de Março, estabelece o Regime Jurídico da Urbanização e Edificação com o objetivo de simplificar a instalação, acesso e utilização de FER, e define que a instalação de geradores eólicos em edifícios cumpra alguns requisitos, isto é, a instalação não deve exceder em 4m a cêrcea da cobertura da edificação e o equipamento gerador não deve ter raio superior a 1,5 m. [31]

A Resolução de Conselho de Ministros nº 54/2010, publicada a 4 de Agosto em Diário da República, apresenta as vantagens que a produção de energia por particulares pode ter nos objetivos fixados na ENE 2020, contribuindo para o seu cumprimento. Estabelece ainda que a microprodução é um interesse público e que deve ser incentivada. [32]

A primeira alteração à Lei da Microprodução surge com o Decreto-Lei 118-A/2010, de 25 de Outubro. Afirma a necessidade e elevada importância de incentivar a produção descentralizada de energia elétrica em baixa tensão por particulares, e revê o programa de microprodução iniciado em 2007 enaltecendo o seu sucesso até à data. Em dois anos tinham mais de 5 400 unidades de microprodução instaladas que representavam cerca de 19 MW de potência instalada. [33]

O programa Renováveis na Hora pretende incentivar à microprodução de energia, permitindo alcançar as metas estabelecidas no PNAEE, indicadas na seguinte figura.

Plano Nacional Acção Eficiência Energética									
Programas e Medidas			Impactos (tep)		Metas				
Designação da medida	Código da medida	Descrição	Sector	Cenário intermédio		Indicadores	Actual	2010	2015
				2010	2015				
Micro-produção	R&SBM1	Incentivo à micro-produção (foto-voltaico, eólico, hídrico, biomassa, ...)	Residencial	8.793	23.447	Potência instalada Nº instalações		62 21788	165 58100

Figura 2.16 – Metas para incentivo de FER

(Fonte: Resolução de conselho de Ministros 80/2008)

Segundo o Sistema de Registo de Microprodução, com dados referentes ao período de 2008 a 2012, existem 164 unidades de produção eólica em Portugal correspondentes a uma potência de ligação de 564,53 MW (Tabela 2.3). No ano de 2009 verificou-se um maior número de

instalações de micro-turbinas no país. Os distritos que mais contribuem para a microprodução de energia eólica são Lisboa, Leiria e Santarém. [34]

Tabela 2.3 – Unidades de Produção, por ano, ligada à rede

Anos	Unidades de Produção	Potência Ligada à rede (MW)
2008	15	52,28
2009	90	310,00
2010	29	98,16
2011	25	84,83
2012	5	19,26
Total	164	564,53

(Fonte: <http://www.renovaveisnatura.pt/web/srm/estatisticas1>)

2.5. Caracterização de aerogeradores urbanos de nova geração

As turbinas convencionais de eixo horizontal são caracterizadas pelo seu alto desempenho e eficiência, no entanto são dispendiosas e necessitam de um mecanismo externo que as oriente na direção do vento, o que torna a sua instalação mais complexa. Devido a estes fatores houve uma forte procura de um produto mais simples e com materiais menos dispendiosos, surgindo assim os primeiros aerogeradores de eixo vertical no mercado.

Para a instalação em meio urbano as turbinas de eixo vertical são as mais adequadas devido às diversas vantagens apresentadas. Não necessitam de torre pois esta funciona ao mesmo tempo como eixo de rotação, não precisam de apontar na direção do vento e sofrem menos desgaste. [35]

Hoje em dia o mercado de turbinas para meio urbano é vasto, com diversos sistemas inovadores de turbinas eólicas de pequena dimensão que visam a produção de energia elétrica renovável em meios urbanos. Serão estudadas algumas turbinas em termos de projeto, desenvolvimento/evolução, características e especificações técnicas.

2.5.1. Evolução de turbinas eólicas

Algumas turbinas eólicas conhecidas foram pioneiras no sistema de eixo vertical, como é o caso da turbina de Darrieus e a de Savonius.

A **turbina de Darrieus** (Figura 2.17), patenteada por Georges Jean Marie Darrieus, Engenheiro Aeronáutico Francês, em 1927, foi uma das primeiras turbinas eólicas de eixo vertical a ser desenvolvida para a captação de vento e geração de eletricidade. A referida turbina, conhecida pelas suas asas terem uma forma semelhante a uma “batedeira”, é uma turbina aerodinâmica constituída por duas ou três lâminas curvas colocadas na vertical e com as extremidades ligadas ao eixo principal, que giram sobre o mesmo com um movimento circular. É uma turbina omnidirecional que não necessita de estar direcionada na direção do vento mais intenso, logo capta o vento de todas as direções. [36]

Algumas desvantagens estão associadas à turbina de Darrieus. Uma delas é o facto de não ter a capacidade de auto arranque, isto é, em períodos de pouco vento e com velocidades baixas a turbina cessa e não funciona, até que exista uma força externa que a faça girar. Para se poder ligar será necessário um dispositivo, como um motor de indução de rotação, que inicie a turbina à velocidade de rotação mínima. Não só aumenta a complexidade do projeto, como o sistema adicional necessita estar ligado à rede elétrica e consome energia da mesma. [37]

Outra desvantagem conhecida é a limitação a grandes variações da intensidade do vento pois opera de forma eficiente enquanto a velocidade do vento for pouco variável, contudo se a velocidade do vento variar muito, em caso de ventos fortes ou condições atmosféricas extremas, pode-se tornar instável, fletir ou danificar a estrutura. Necessita então de correntes e cabos de fixação que permitam maior estabilização da estrutura, o que a torna menos apelativa. [36]

As vibrações, o elevado ruído e a baixa eficiência são características do aerogerador de Darrieus, que resultam do fluxo de ar que circula em torno das lâminas ser diferente com a altura, uma vez que a distância entre a lâmina e o eixo vertical varia consoante a altura. [38]



Figura 2.17 – Turbina original de Darrieus

(Fonte: <http://www.webalice.it/acecere48/finalreport.pdf>)

A turbina eólica de Darrieus serviu de base para o desenvolvimento de outras turbinas. Sofreu uma grande e considerável evolução nas décadas seguintes, com muitos investigadores a tentarem ultrapassar alguns inconvenientes e limitações da turbina original, com o objetivo de melhorar a sua produtividade e eficiência.

A primeira variação da turbina de Darrieus é conhecida por *Giromill*. Esta turbina em forma de letra “H” (Figura 2.18) substitui as lâminas curvas em forma de batedeira do modelo original por asas verticais, paralelas ao eixo, ligada por suportes a uma torre. A sua configuração permite um relativo bom funcionamento com ventos turbulentos, simplicidade de construção e portanto traduz-se num preço mais baixo relativamente à turbina convencional. [39]



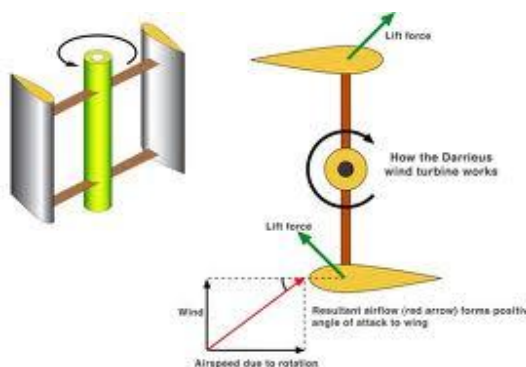
Figura 2.18 – Turbina de Darrieus com asas verticais

(Fonte: <http://www.reuk.co.uk/Giromill-Darrieus-Wind-Turbines.htm>)

Outra evolução da turbina de Darrieus é conhecida por *Ciclo-turbina* (Figura 2.19). Esta variante também adota asas verticais, em forma da letra “H”, distanciadas igualmente entre si e ligadas a um eixo central de rotação por suportes horizontais, contudo a secção transversal das asas tem a forma de palheta (Figura 2.20). Esta forma angular das asas permite orientar

mecanicamente a inclinação das pás, com um ângulo de ataque em relação ao vento, por forma a aproveitar a máxima eficiência da turbina.

A grande vantagem da *Ciclo-turbina*, face o modelo convencional de Darrieus e à variante *Giromill*, é a capacidade de auto arranque e assim permite que perante ventos com baixa intensidade se gerem forças de arrasto que iniciam a rotação da turbina. [39]



Figuras 2.19 e 2.20 – Ciclo-turbina de Darrieus

(Fontes: <http://www.reuk.co.uk/Giromill-Darrieus-Wind-Turbines.htm>

<http://www.nationmaster.com/encyclopedia/Darrieus-wind-turbine>)

Uma outra evolução da turbina de Darrieus é a torção das asas modificando-as para a forma helicoidal (Figura 2.22). Este novo *design* teve grande impacto e sucesso em áreas urbanas e residenciais, pois tem como principal vantagem ser mais silenciosa durante a sua operação devido à velocidade de rotação ser mais baixa na ponta das asas, sendo ideal para meio urbano. A forma das asas, com uma torção de 60° (Figura 2.21), dispersa uniformemente a força do vento incidente sobre toda a lâmina, o que permite ultrapassar outro inconveniente da turbina original de Darrieus, e diminui a possibilidade de danificar a estrutura. [40]

Estas turbinas possibilitam a instalação no solo ou no topo de edifícios/telhados, captam vento de qualquer direção e podem ser colocadas em zonas com ventos de grande intensidade. [41]

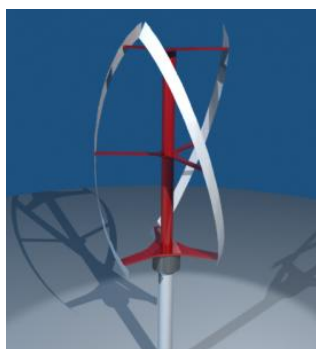


Figura 2.21 e 2.22 – Turbinas de Darrieus com asas helicoidais

(Fontes: <http://www.energybeta.com/windpower/windmill/helical-wind-turbine/>)

A **turbina de Savonius**, desenvolvida pelo Engenheiro Finlandês Sigurd Johannes Savonius em 1922, é uma turbina de eixo vertical que esteve na origem do desenvolvimento de outro tipo de turbinas urbanas. Esta turbina tem semelhanças à turbina de Darrieus na estrutura mecânica, mas difere quanto ao modo de funcionamento. A turbina de Savonius, conhecida pela sua forma da letra “S” (Figura 2.23), é composta por duas ou três asas com a forma arredondada, metades cilíndricas afastadas lateralmente sobre o plano central de corte, que cobrem toda a área varrida e que giram segundo um movimento circular sobre um eixo vertical. [42]

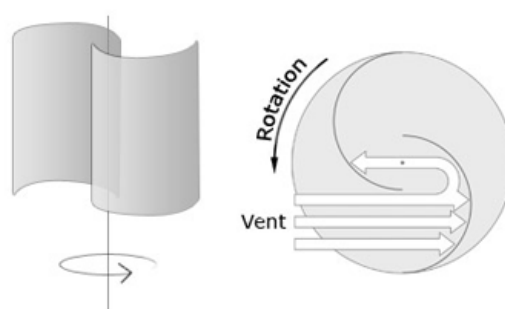


Figura 2.23 – Sistema eólico de Savonius

(Fontes: http://www.ecosources.info/en/topics/Savonius_vertical_axis_wind_turbine)

O vento incidente origina forças de arrasto que, a par da forma das asas, implicam uma velocidade de rotação relativamente lenta e portanto de baixa eficiência, comparativamente à turbina de Darrieus, no entanto a turbina de Savonius inicia o seu funcionamento com velocidades de vento baixas ao contrário da turbina original de Darrieus. É um modelo simples e económico, fácil de construir (Figura 2.24), que exige pouca manutenção, de dimensões pequenas, que funciona bem com ventos turbulentos com um risco mínimo da estrutura e com aproveitamento da eficiência suficiente para uso doméstico e independente, o que torna a turbina ideal para meio urbano. [43]



Figura 2.24 – Exemplo de turbina eólico de Savonius em construção

(Fontes: <http://www.reuk.co.uk/Savonius-Wind-Turbines.htm>)

Tal como a turbina de Darrieus, também a turbina de Savonius pode ser torcida sobre o seu eixo (Figura 2.25). A torção das asas para a forma helicoidal é mais vantajosa para o seu funcionamento, contribuindo para uma potência mais elevada, mas o *design* é mais complexo e dispendioso que o original devido à necessidade de materiais e maquinaria especializada. [35]



Figura 2.25 – Turbina HelixWind

(Fonte: <http://www.helixwind.com/en/S322.php>)

Algumas turbinas existentes no mercado basearam-se no sistema de Darrieus, tal como a Quietrevolution e a Turby, e outras basearam-se no sistema de Savonius, tal como a PCon e a HelixWind. Uma tecnologia inovadora partilhada por estas duas turbinas é a combinação das mesmas, Darrieus-Savonius (Figuras 2.26 e 2.27).



Figuras 2.26 e 2.27 – Turbina Darrieus-Savonius

(Fonte: <http://www.orcoastalwindenergy.com/wp-content/uploads/2011/07/DarOrSavOr.pdf>
<http://www.wrapwind.com/download/vawt/Gupta.pdf>)

As turbinas convencionais eram alvo de críticas em relação ao seu aspeto estético nas paisagens urbanas, pois algumas delas teriam um aspeto rudimentar. Mas, acompanhando a evolução do sistema operativo, também a aparência estética foi tida em conta e aperfeiçoada, desenvolvendo-se aerogeradores urbanos cada vez mais elegantes e esbeltos, facilitando a sua integração em meio urbano.

2.5.2. Caracterização pormenorizada de aerogeradores urbanos

Segue-se uma breve descrição de alguns sistemas de aerogeradores urbanos modernos existentes no mercado.

2.5.2.1. Turbina eólica Turby

O aerogerador Turby (Figura 2.28), de origem holandesa, fundamenta-se no sistema de Darrieus, especialmente desenvolvido para ambientes urbanos. É composto por uma turbina de eixo vertical e três asas simétricas com uma torção helicoidal de 60° que permite diminuir vibrações e risco de danificação da estrutura. [38]

O local de fixação da turbina deve ser apropriado com pontos de fixação específicos. É indicada para instalação na cobertura de edifícios, em caixas de elevador e estruturas semelhantes adequadas para esse efeito, que servem como base de fixação e apoio da turbina e conferem resistência suficiente e altura adicional. As forças exercidas pelo vento na turbina e as forças exercidas pela turbina na base (topo de edifício) são baixas. [44]



Figura 2.28 – Turbina eólica Turby

(Fonte: Turby, The wind turbine for the built-up environment)

2.5.2.2. Turbina eólica Quietrevolution

A turbina Quietrevolution resulta de um projeto britânico que recebeu o Prémio Inovação Sustentável em 2006. Funciona bem em ambientes urbanos em que as velocidades de vento são mais baixas e este muda constantemente de direção. É um aerogerador eólico urbano constituído por um eixo vertical e três lâminas ligadas a si com uma torção helicoidal de 120° que, tal como

a Turby, dispersa de forma uniforme a força do vento incidente na lâmina, diminui vibração e ruído, e evita desgaste da estrutura. [38]

Com uma aparência mais apelativa que facilita a integração nos edifícios (Figura 2.29), é composta por materiais leves e duráveis, como a fibra de carbono, capta melhor o vento e é ideal próxima de habitações [47]. É um modelo compacto de apenas uma peça móvel com as pontas seladas para minimizar manutenção. [45]



Figura 2.29 – Turbina eólica Quietrevolution

(Fonte: <http://www.quietrevolution.com/qr5/gallery.htm>)

2.5.2.3. Turbina eólica Windspire

A turbina de eixo vertical Windspire (Figura 2.30), criada pela empresa Mariah Power, recebeu o prémio *Best of What's New* em 2008, atribuído pela revista *Popular Science*. Indicada para edifícios/casas ou colocação em solo, é caracterizada pela sua capacidade de auto arranque e ruído quase nulo. [46]

Este modelo eólico tem um aspeto único, mais atraente e muito eficiente, composto por secções simples sobre o eixo central de rotação. Todos os componentes trabalham em conjunto como um todo assegurando máxima eficiência a baixo custo. [48]



Figura 2.30 – Turbina eólica Windspire

(Fonte: http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Mini-turbina_e%3%B3lica_arranca_sem_a_ajuda_de_motor)

2.5.2.4. Turbina RevolutionAir

O aerogerador urbano RevolutionAir foi apresentado no início de 2010 por Philippe Starck, um conhecido *designer* francês de interiores e de objetos, após dois anos de investigação e pesquisa, e concebido pela empresa italiana *Pramac*. A turbina destaca-se de outras turbinas existentes no mercado pelo seu aspeto visual elegante e moderno com um conceito de *design* único. [49]

Os dois modelos residenciais disponíveis são o WT400W, com a forma quadrangular de duas pás de policarbonato transparente e capacidade de produção até 400W, e o WT1kW, composto por 3 pás com forma helicoidal e produção média de 1000W (Figuras 2.31 e 2.32). [50]



Figuras 2.31 e 2.32 – Turbina RevolutionAir WT400W (à esquerda) e WT1kW (à direita)
(Fonte: Pramac Wind, Small Wind Generators)

O eixo vertical existente entre as pás da turbina helicoidal confere maior estabilidade à estrutura e é ideal para ambientes urbanos e ventos turbulentos.

A turbina RevolutionAir baseada no rotor de Darrieus capta vento de qualquer direção, o seu funcionamento provoca pouco ruído e a sua instalação é simples. [49]

2.5.2.5. Turbina Omniflow

A turbina eólica Omniflow é um conceito revolucionário no mercado de microgeração eólica nacional pois é um sistema híbrido que combina a captação de energia eólica com energia solar para aproveitamento elétrico. Desenvolvida por Pedro Ruão, Engenheiro de Materiais que em 2009 ficou entre os três finalistas no premio inovação EDP-Fundação Richard Brandson ao qual concorreu com um protótipo energético inovador com o projeto Omniflow. [51]

A turbina de eixo vertical, com uma estrutura fixa em forma de cúpula em seu torno, é constituída por uma asa invertida que direciona o vento de qualquer direção para uma turbina eólica central com cinco pás no interior da estrutura. O seu sistema opera com dois escoamentos do vento (superior e inferior) que elevam o seu nível de eficiência (Figura 2.33). [52]

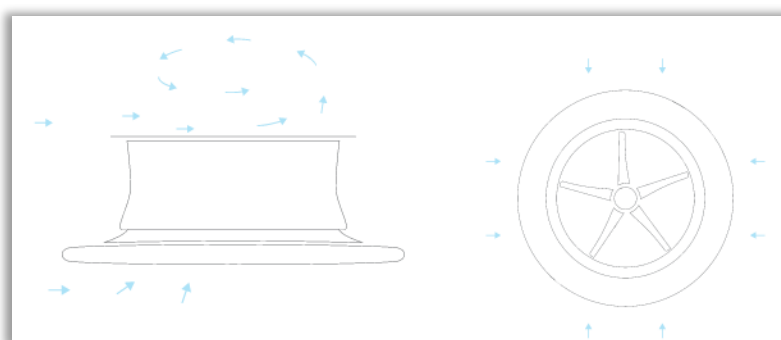


Figura 2.33 – Escoamento do vento do sistema Omniflow
(Fonte: Omniflow – MicroGeneration System. Omniflow Specifications)

Os painéis solares encontram-se na asa invertida (Figura 2.34) e dividem-se por três painéis independentes compostos por células fotovoltaicas de alta eficiência que captam os raios solares. Inclui um micro-inversor que faz a gestão automática e gere a produção, assim os painéis estão ligados consoante as horas do dia, evitando perdas devido a sombras. [53]



Figuras 2.34 e 2.35 – Painéis solares na asa invertida (à esquerda) e instalação da turbina no topo de edifício (à direita)
(Fonte: www.omniflow.pt)

Tem como vantagens ser omni-direcional e produzir pouco ruído privilegiando o conforto acústico.

A elevada eficiência energética e alto desempenho deve-se à combinação de energia eólica e solar, que permite captar energia constante durante o ano, eólica no pico de inverno e solar no pico de verão, e assim ultrapassa algumas fragilidades de outras turbinas convencionais. [24]

Devido à sua estrutura não tem elementos visíveis que provoquem sombras em movimento, prejudiciais para as pessoas, e as vibrações são eliminadas pelo sistema de duplo amortecimento [54]. Composta no total por 6 componentes, não necessita de auxílio de grua, é de fácil instalação, conseguida numa manhã, e inclui apoios anti vibráteis por baixo do gerador que evitam desgaste [24].

Não é necessário reforço da cobertura para o seu posicionamento, preconizando-se que os pontos de fixação sejam instalados em caixas de elevador pois são zonas reforçadas. [24]

O principal objetivo é a produção de energia elétrica em meio urbano, no entanto pode ser também utilizada para fins publicitários com uma imagem de marca ou mensagem transmitida no seu painel. [24]

Existem atualmente três modelos Omniflow disponíveis no mercado: OM 07, OM 1.2 e OM3.8. Na tabela 2.4 apresentam-se as principais características dos respetivos modelos quanto à dimensão e potência.

Tabela 2.4 – Principais características que diferem os 3 modelos Omniflow

	Dimensões	Potência
OM 07	Rotor: 0,7m diâmetro Estrutura: 1,3m diâmetro x 0,5m altura Peso: 20 kg	Potência de pico: 300W Asa solar: 70W (opcional)
OM 1.2	Rotor: 1,0m diâmetro Estrutura: 1,8m diâmetro x 0,8m altura Peso: 50 kg	Potência de pico: 600W Asa solar: 260W (opcional)
OM 3.8	Rotor: 1,75m diâmetro Estrutura: 3,0m diâmetro x 1,0m altura Peso: 210 kg	Potência de pico: 3,0kW Asa solar: 800W (opcional)

(Fonte: Omniflow – MicroGeneration System. Omniflow Specifications)

Várias turbinas do grupo Omniflow encontram-se instaladas por Portugal, principalmente pelo Norte do País. Nas Figuras 2.36 e 2.37 pode ver-se que as turbinas estão instaladas nas coberturas dos respetivos edifícios, enquanto a última (Figura 2.38) está instalada ao nível do solo.



Figuras 2.36, 2.37 e 2.38 – Turbina OmniFlow instalada: Beach Bar, Póvoa de Varzim (à esquerda); Edifício NET-Novas Empresas e Tecnologias, Porto (ao centro); Marina da Afurada, Vila Nova de Gaia (à direita)
(Fonte: www.omniflow.pt)

Um aerogerador OmniFlow recentemente instalado pode visitar-se na Douro Marina, em Vila Nova de Gaia, Porto (Figura 2.39). Este equipamento apenas com a vertente eólica fornece energia aos barcos atracados na marina e alimenta a corrente elétrica ao pontão. [56] [57]



Figura 2.39 – Turbina OmniFlow na Douro Marina, em Vila Nova de Gaia.
(Fonte: www.omniflow.pt)

2.5.3. Especificações técnicas

Uma turbina convencional inicia a operação e produz energia com velocidades de vento de entrada (*cut in wind speed*) acima de 2,5 a 3,0 m/s. O limite de potência da turbina atinge-se com velocidades de vento entre 12 a 15 m/s que consequentemente ativam um sistema de travagem automático. Por questões de segurança estrutural, uma turbina eólica deixa de trabalhar quando atinge um valor máximo de velocidade de saída (*cut out wind speed*) de cerca

de 25 m/s, e não é gerada potência para velocidades superiores. Os valores apresentados podem variar consoante as turbinas. [58]

As turbinas eólicas urbanas, tal como os grandes aerogeradores instalados em parques eólicos, são projetadas para gerar uma potência máxima (potência nominal – *rated power*) para uma determinada velocidade de vento (velocidade de vento nominal – *rated wind speed*). [58] [59]

A seguinte figura ilustra uma curva de potência e não representa nenhuma turbina eólica em específico. A curva de potência representa a relação entre a velocidade do vento e a potência de uma turbina.

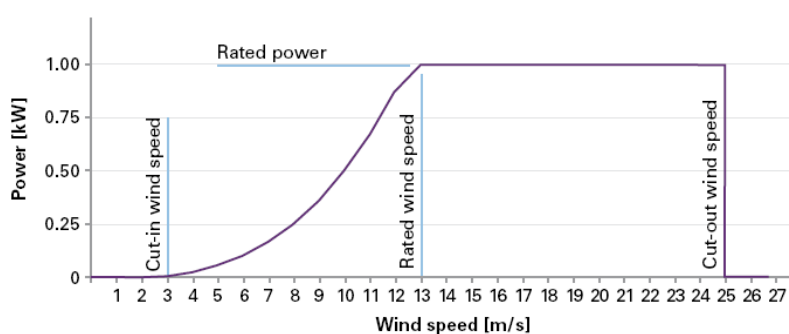


Figura 2.40 – Curva de Potência de uma turbina eólica

(Fonte: Carbon Trust - Small-scale wind energy. Policy insights and practical guidance)

De entre as diversas características de um aerogerador urbano, consideram-se como principais as seguintes: constituição, dimensões, materiais, gerador, potência e produção de energia anual. Apresentam-se em Anexo (ANEXO I) as características e especificações técnicas das turbinas apresentadas, segundo ordem cronológica. Na referida tabela observa-se uma comparação de vários aerogeradores urbanos fabricados no mundo através das dimensões físicas do equipamento, potência, produção de energia anual, velocidades de operação, materiais, entre outros.

Capítulo 3

3. Caracterização dos regimes de vento e potencial eólico na cidade de Lisboa

3.1. Origem do vento

A energia eólica provém da energia solar, uma vez que a origem do vento está na radiação do sol.

Nas diferentes escalas espaciais os raios do sol incidentes aquecem a superfície da terra de forma muito variável. Nas zonas equatoriais (latitudes próximas de 0°) a radiação solar tem maior intensidade pois os raios solares penetram quase perpendicularmente a superfície, enquanto em zonas polares a radiação atinge a superfície terrestre com muito menos intensidade [27].

A variação do aquecimento (irregular) ao longo da superfície terrestre provoca diferentes pressões na atmosfera que causam o movimento e a circulação de ar de larga escala (vento) [27]. Esta diferença constitui um dos mecanismos mais importantes do sistema climático e dos ventos globais, mas que são afetados por inúmeros outros processos que à escala local são imensamente complexos, e que em grande medida respondem às heterogeneidades da superfície, tais como: a orografia, os contrastes terra/mar, a vegetação e o conteúdo de água no solo.

3.2. Caracterização do escoamento atmosférico à superfície

A 10 km de altitude encontram-se ventos fortes, estáveis e consistentes, ideais para a produção de energia eólica. Porém, não é possível colocar aerogeradores a essa altura mas sim a apenas algumas dezenas de metros acima do solo. [60]

Os ventos que se encontram numa altura do solo até 100 m, próximos da superfície terrestre e que são importantes para a energia eólica, denominam-se por ventos superficiais e são influenciados pelas heterogeneidades da superfície terrestre. [27]

3.2.1. Ventos locais

O vento é composto por deslocamentos de massas de ar, e a sua velocidade e direção variam com o tempo.

Para aproveitamento do recurso eólico urbano devem-se ter em conta determinados parâmetros. Os ventos locais, em zonas urbanas e edificadas, são muito influenciados pelas condições climáticas da região e por fatores que alteram as características do escoamento do vento. Esses fatores têm impacto na velocidade do vento, tanto na direção como na intensidade, e são os seguintes:

- Rugosidade
- Orografia
- Obstáculos
- Turbulência

O relevo e a rugosidade influenciam de forma considerável a velocidade do vento.

A **rugosidade** varia com o tipo de superfície e engloba vegetação e pequenas edificações no terreno. Devido ao atrito que causam modificam o escoamento do vento e provocam pequenas circulações de ar na superfície (turbulências) e mudanças de direção. [60]

A **orografia** local (relevo) é um dos fatores mais importantes na modelação do escoamento atmosférico de um dado local. Em zonas montanhosas e vales existe uma aceleração da velocidade do vento devido à orografia (Figura 3.1). [60]

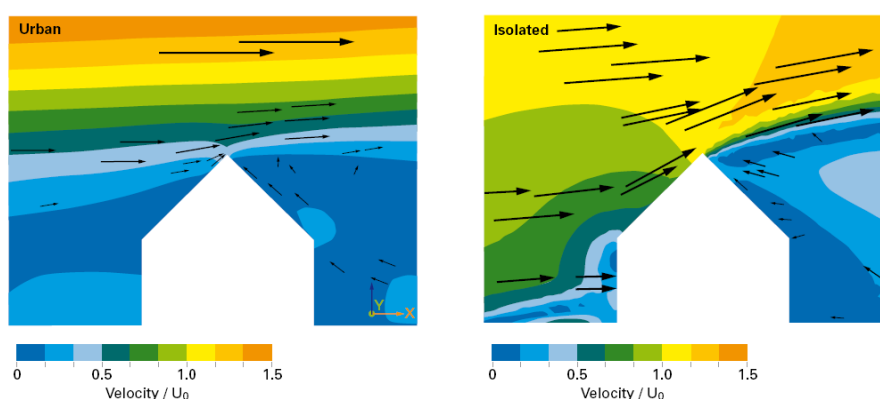


Figura 3.1 – Aceleração do vento sobre uma elevação

(Fonte: Condições de viabilidade da microgeração eólica em zonas urbanas. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

Os **obstáculos** existentes em zonas urbanas oferecem resistência e impedem a passagem do ar, e conseqüentemente diminuem significativamente a intensidade do vento, provocando turbulência à volta do obstáculo. A diminuição do perfil da velocidade do vento depende das dimensões dos obstáculos e da porosidade dos mesmos. [1]

As seguintes figuras 3.2 e 3.3 ilustram o escoamento do vento em torno de um edifício, em dois casos: edifício em ambiente urbano com edifícios próximos na vizinhança (Figura 3.2), e edifício em ambiente isolado, em zona rural (Figura 3.3). Quanto mais “quente” a cor e maior a seta que representa a direção do vento, maior a velocidade do vento.



Figuras 3.2 e 3.3 – Escoamento do vento em torno de um obstáculo, em zona urbana e zona isolada
(Fonte: Carbon Trust - Small-scale wind energy. Policy insights and practical guidance)

A **turbulência**, ou vento turbulento, é um elemento muito importante no projeto de turbinas eólicas, pois pode danificar a sua estrutura e como tal esta deve ser suficientemente robusta para resistir às variações do vento [1]. O escoamento turbulento caracteriza-se pela ocorrência de fortes variações da velocidade do vento e trajetórias irregulares.

A velocidade do vento varia significativamente com a altura, pois genericamente aumenta com esta (Figura 3.4). Contudo, em zonas urbanas e devido ao edificado, o escoamento é muito alterado e portanto, um determinado valor de velocidade atinge-se com uma maior altura do que em zonas menos edificadas. Essa diferença ainda é maior em zonas costeiras. [27]

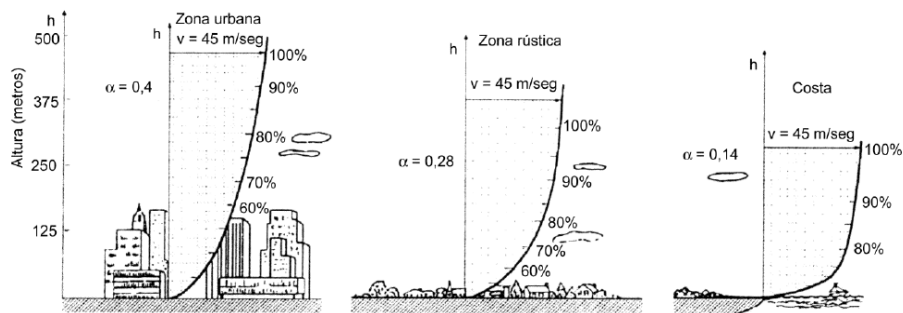


Figura 3.4 – Variação da velocidade do vento com a altura
(Fonte: Formation de promoteores de renovables. Neo Energia)

Para caracterização do escoamento atmosférico num local é necessário reunir observações do vento nesse mesmo local. [60]

3.3. Estações de observação

A obtenção de informação sobre dados do vento numa determinada zona passa pela realização de observações do escoamento atmosférico durante um período de tempo, geralmente no mínimo um ano [61]. Tal é possível através de campanhas de medição, realizadas no local onde se pretende instalar turbinas eólicas, que permitem adquirir dados específicos sobre o fluxo do vento e que também possibilitam o estudo da viabilidade de instalação de turbinas para captação de ventos locais e conseqüente produção de energia.

As estações de observação são constituídas por torres de medição (Figura 3.5) colocadas idealmente na zona da construção do parque eólico e longe de obstáculos que possam alterar o escoamento do vento. Nas torres de medição são instalados equipamentos de medição e de aquisição de dados que efetuam respetivamente a medição e registam os dados das grandezas específicas do vento. [62]



Figura 3.5 – Torre de medição

(Fonte: <http://www.jornalagora.com.br/site/content/noticias/detalhe.php?e=3&n=18740>)

Os instrumentos de medição devem ser calibrados, fiáveis e exatos, e constituídos por materiais duráveis e resistentes às variações meteorológicas, de modo a assegurar o bom desempenho durante a campanha de medição [62]. A informação recolhida sobre as características do vento

permite analisar os regimes de vento e ter uma noção da viabilidade de construção de um parque eólico.

3.3.1. Fontes de informação / Recolha de dados

Quando se pretende informação sobre o potencial eólico numa zona urbana, constata-se que a informação disponível sobre regimes de ventos urbanos é escassa.

Em Portugal, as observações locais são obtidas através de equipamentos instalados em estações meteorológicas distribuídas pelo país, segundo uma rede nacional de Estações Meteorológicas Automáticas de superfície (EMA's). Esta rede, que tem como objetivo principal monitorizar, vigiar e estudar de forma contínua a meteorologia da superfície, é constituída no total por 93 EMA's e 18 RUEMA's (rede urbana). Cada estação é composta por diversos equipamentos que realizam a medição e aquisição de dados das seguintes grandezas meteorológicas: temperatura e humidade relativa do ar (2m acima do solo), vento (10m acima do solo), radiação solar global, precipitação e pressão atmosférica. [63]

Para a avaliação do recurso eólico, o elemento meteorológico de interesse é o vento, devendo obter-se informação sobre a sua direção e velocidade. [62]

A velocidade do vento é medida através de **anemómetros de copos** (Figura 3.6), sendo este um dos aparelhos fundamentais numa estação meteorológica. O anemómetro de copos é constituído por três superfícies côncavas (“copos”) fixas a hastes e ligados a um eixo central vertical [62]. O eixo central permite a rotação dos copos, sendo a velocidade de rotação do dispositivo proporcional à intensidade do vento. O funcionamento deste equipamento baseia-se no princípio da quantidade de movimento, isto é, no movimento giratório dos copos em torno de um eixo vertical [64]. Este ciclo é transformado em registos sobre a intensidade do vento.

Para a medição da direção do vento o instrumento indicado é o **cata-vento**, também conhecido por sensor de direção (Figura 3.7). É constituído por um leme fixo a uma haste e ligado a um eixo vertical, que possibilita o movimento giratório da mesma [62]. O funcionamento do cata-vento utilizado na rede urbana de EMA's assenta na procura do equilíbrio pelo leme consoante a orientação de que o vento flui. O eixo do cata-vento está ligado a um potenciómetro que converte a posição do leme lida no sistema de aquisição de dados. [63]

Ambos os instrumentos registam as observações médias de 10 em 10 minutos.



Figura 3.6 e 3.7 – Anemómetro de copos (à esquerda) e Sensor de direção (à direita)

(Fonte: http://www.jroma.pt/sensores_vento.htm)

Segundo a rede nacional de EMA's, na cidade de Lisboa existem atualmente duas estações meteorológicas principais: a Lisboa/Gago Coutinho (Figura 3.8) e Lisboa/Geofísico (Figura 3.9). A primeira localiza-se perto do aeroporto da Portela, envolvida pela zona urbana, e a segunda situa-se no Jardim Botânico da Universidade de Lisboa (Instituto Geofísico do Infante D. Luiz), um espaço verde no centro de Lisboa (Figura 3.10). [65]

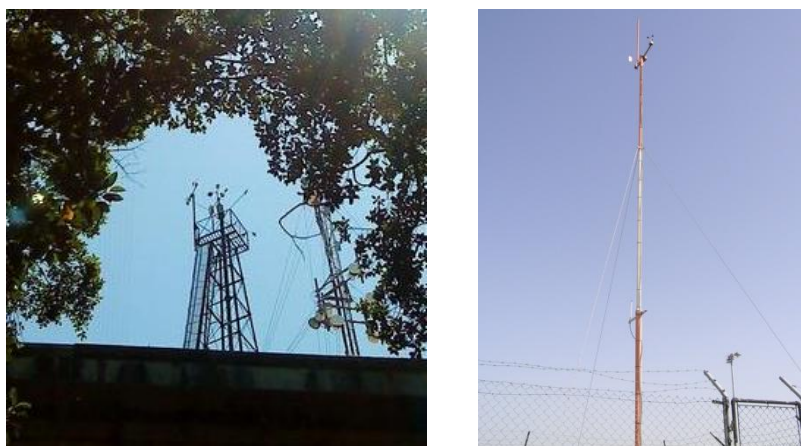


Figura 3.8 e 3.9 – Equipamentos de medição da velocidade e direção do vento na estação Lisboa/Geofísico (à esquerda) e Lisboa/Gago Coutinho (à direita)

(Fontes: <http://www.meteopt.com/forum/instrumentos-meteorologicos>)

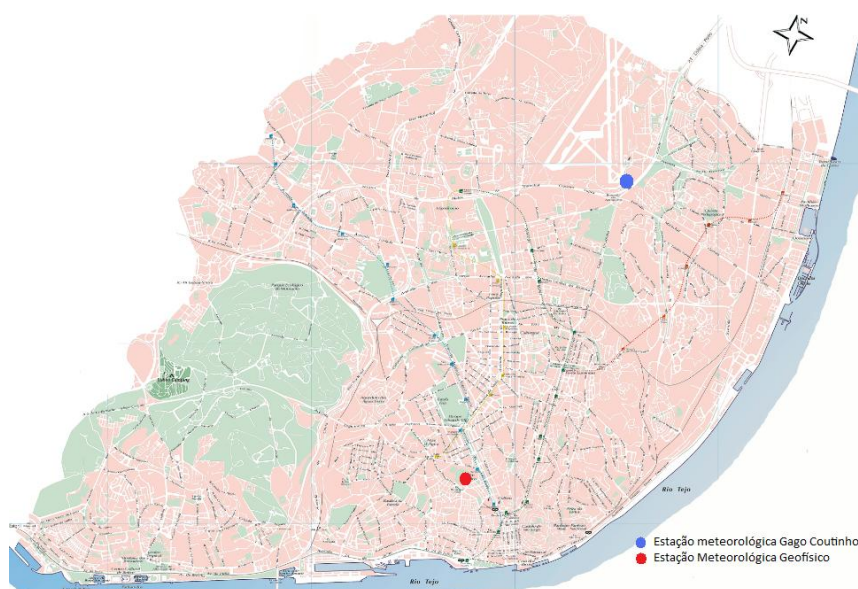


Figura 3.10 – Localização das principais estações meteorológicas de Lisboa
(Fonte: <http://www.visitportugal.com/pt-pt/content/mapa-de-lisboa-0>, adaptado)

A informação utilizada para o desenvolvimento da presente dissertação, no que se refere à obtenção de dados sobre a direção e a velocidade do vento, pertence à estação de Lisboa (Instituto Dom Luiz). Foram disponibilizados os dados obtidos de forma contínua das médias horárias, em formato *Excel*, relativos aos meses compreendidos entre Janeiro de 2009 e Maio de 2013. Os dados sobre a intensidade do vento são apresentados com a unidade de medida: metro por segundo (m/s), e os dados sobre o rumo do vento segundo a unidade de medida: graus, de 0° a 360°.

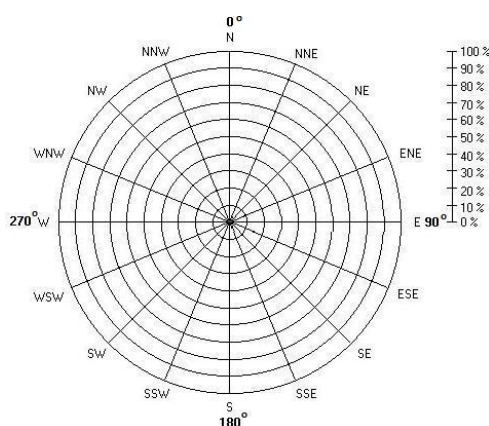
3.3.2. Análise e tratamento de dados

Os dados das observações são valores quantitativos [55], que representam séries temporais e devem ser organizados de forma a poder-se retirar deles a informação necessária para o estudo do escoamento do vento.

As séries temporais de vento contêm um conjunto volumoso de informação sobre características do vento, durante um período de tempo valioso para o estudo do recurso eólico local e potencial de instalação de turbinas. O conjunto de informação deve ser analisado e processado de forma criteriosa, recorrendo a técnicas adequadas, a fim de se proceder à correta caracterização do regime de ventos de um local [62].

Os **histogramas** de velocidade são gráficos de barras que apresentam a frequência de ocorrência das velocidades do vento, em percentagem. Esta técnica de construção de diagramas de distribuição de frequência é das mais utilizadas e importantes no estudo de séries temporais de vento pois sintetiza a informação recolhida nas observações e, devido à simplicidade de apresentação de dados, facilita a compreensão da mesma. [62]

A **rosa-dos-ventos** é uma forma de condensação da informação sobre os rumos e intensidades do vento de uma determinada região, através da apresentação da frequência de ocorrência segundo um gráfico polar (Figura 3.11). Permite analisar a distribuição da orientação dos ventos e ter a noção dos ventos mais predominantes num local. Desta forma, apresentam-se os dados de acordo com o ângulo que a direção do vento faz com o Norte, no sentido horário. A rosa-dos-ventos encontra-se dividida em 16 intervalos idênticos, de 22,5°. [62]



Figuras 3.11 – Rosa-dos-ventos (à direita)

Pretende-se fazer a caracterização anual e sazonal da intensidade e rumo do vento, bem como o ciclo diurno da intensidade, através de histogramas (com auxílio do programa *Excel*) e rosa-dos-ventos (com auxílio do programa *Origin 8.5*), retirando a informação necessária para o estudo do clima na cidade de Lisboa.

Na caracterização anual do escoamento do vento, os dados horários são organizados segundo velocidade e direção, para cada ano (2009 a 2013). A caracterização sazonal da direção e da velocidade do vento é analisada tendo em conta as estações do ano e os dados são agrupados segundo as mesmas. De seguida, procede-se à elaboração de histogramas e rosa-dos-ventos.

O ciclo diário, elaborado para a caracterização anual e sazonal, fornece informação sobre as horas do dia em que o vento é mais intenso.

3.4. Caracterização da cidade de Lisboa

A cidade de Lisboa localiza-se na margem direita do rio Tejo, junto à foz, próxima do litoral do país a cerca de 30 km do Oceano Atlântico (Figura 3.12).

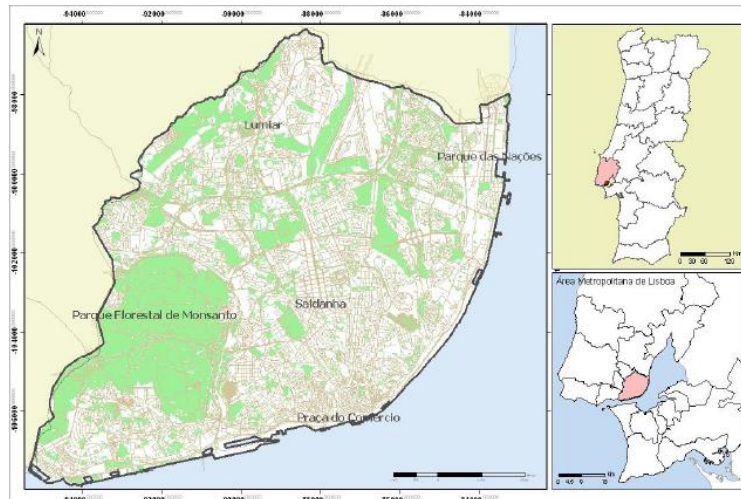


Figura 3.12 – Localização da cidade de Lisboa

(Fonte: Mapas bioclimáticos de Lisboa. Universidade de Lisboa)

A cidade é fortemente edificada no entanto identificam-se essencialmente duas zonas, com áreas muito representativas, não urbanizadas (Figura 3.13): a Norte, o Aeroporto da Portela e a Oeste a Serra do Monsanto. O Parque Florestal do Monsanto, o pulmão da cidade, localiza-se a Oeste, com uma altitude máxima de 216 m, e representa o maior espaço verde da cidade [65], de entre outros espaços verdes ao longo da cidade, como é o caso do Jardim Botânico da Universidade de Lisboa, onde se localiza a estação meteorológica Lisboa (Instituto Dom Luiz).

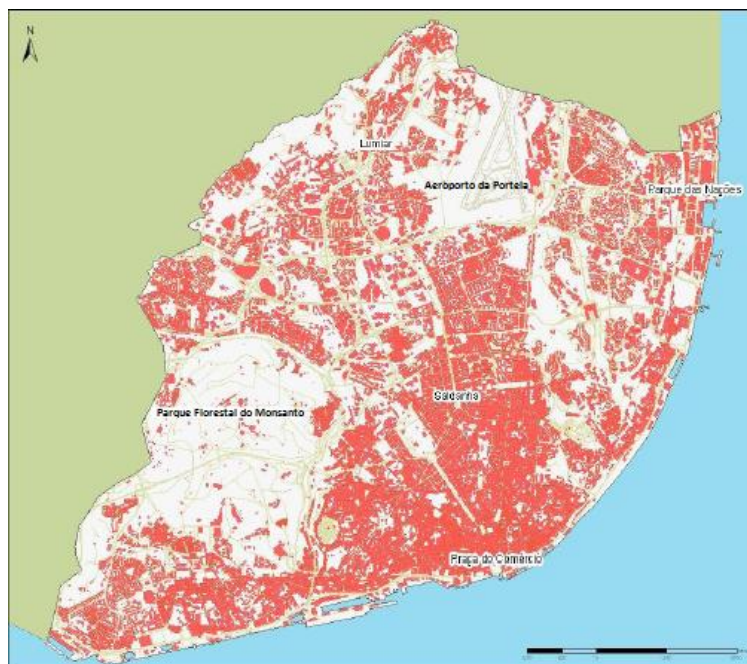


Figura 3.13 – Área edificada de Lisboa

(Fonte: Mapas bioclimáticos de Lisboa. Universidade de Lisboa)

A cidade apresenta uma urbanização bastante variada, verificando-se a maior densidade de construções no centro da cidade estendendo-se até ao sul [65].

3.4.1. O clima na cidade de Lisboa

O clima em Lisboa é do tipo mediterrânico, um clima temperado, sobressaindo essencialmente duas estações: o Verão caracteristicamente seco e quente, e o Inverno instável com precipitação significativa e temperaturas moderadas. [65] [66]

O vento é fundamental na climatização de uma cidade, isto é, o clima é influenciado pelas características físicas da cidade (morfologia urbana), de tal modo que provocam alterações na intensidade e rumo do vento ao longo da cidade. [65] [66]

3.5. Caracterização temporal do regime de ventos da cidade de Lisboa

As figuras que se apresentam em seguida (Figuras 3.14 a 3.18) representam os dados horários da velocidade do vento dos anos completos de 2009 a 2012, e o ano incompleto de 2013 (de Janeiro a Maio), a partir dos quais pode perceber-se o comportamento anual do vento na estação de Lisboa (Instituto Dom Luiz), e assim observar a imensa variabilidade da intensidade do vento na cidade de Lisboa. Os respetivos histogramas com a informação sobre a frequência de ocorrência das velocidades do vento encontram-se em Anexo (ANEXO II).

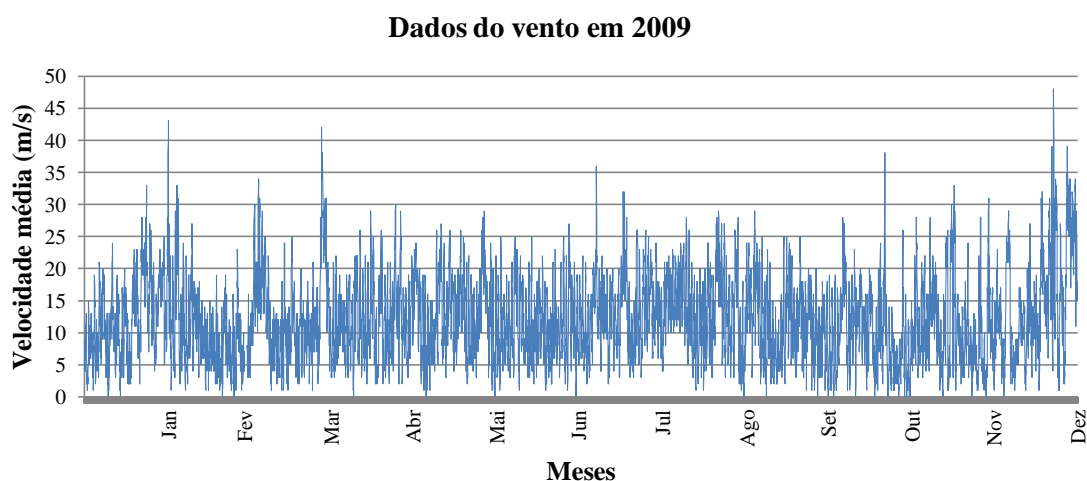


Figura 3.14 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2009

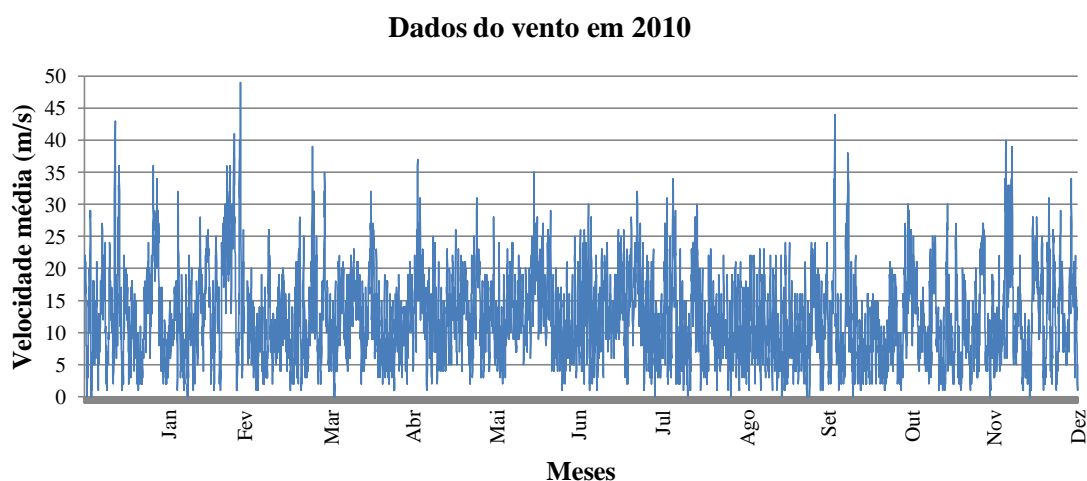


Figura 3.15 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2010

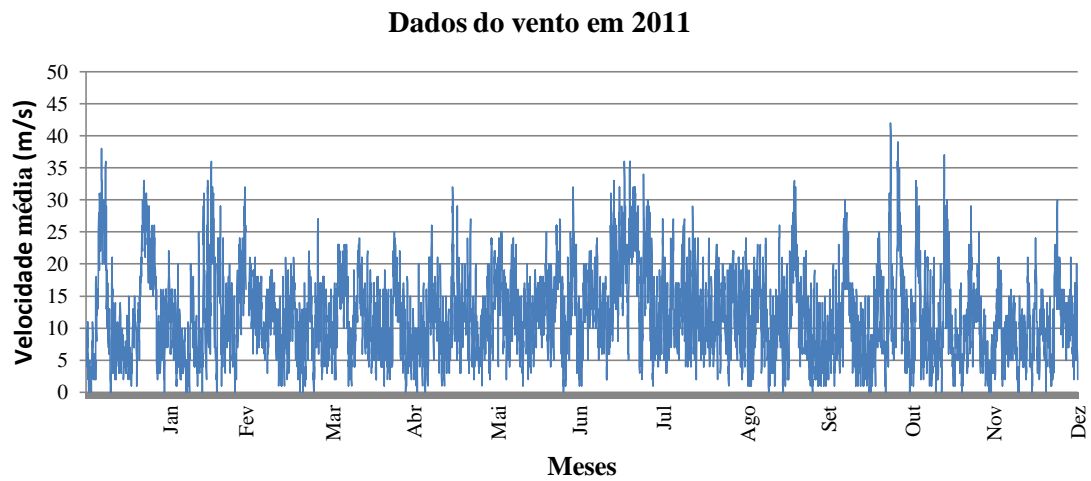


Figura 3.16 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2011

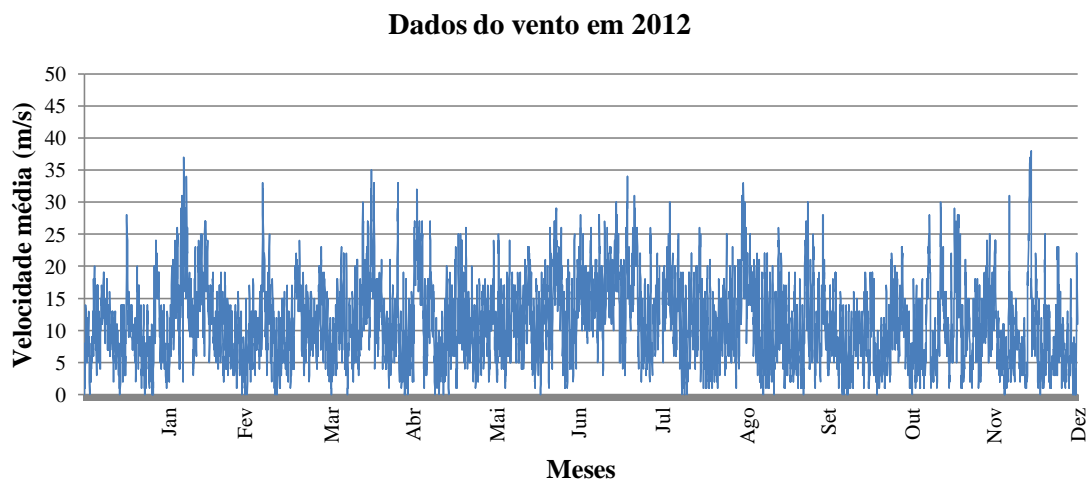


Figura 3.17 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Dezembro de 2012

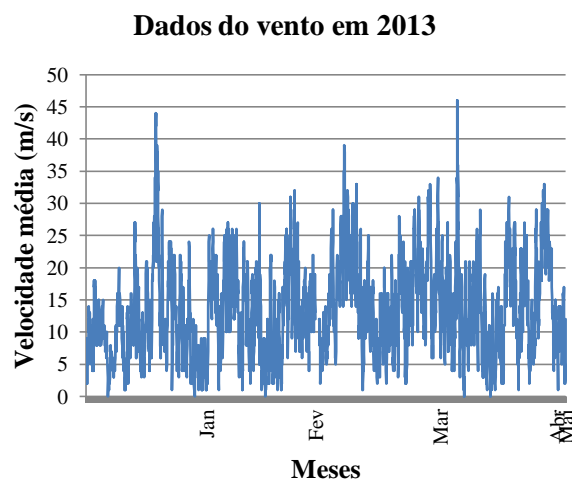


Figura 3.18 – Série horária da velocidade do vento, Janeiro a Maio de 2013

Na tabela 3.1 sintetizam-se os parâmetros estatísticos, obtidos a partir das figuras 3.15 a 3.19, que permitem caracterizar o comportamento do vento em cada ano na cidade de Lisboa.

Tabela 3.1 – Dados estatísticos da velocidade do vento (m/s)

Parâmetros	2009	2010	2011	2012	2013
Mínima	0	0	0	0	0
Máxima	48	49	42	38	46
Média	12,18	12,33	11,86	11,26	13,45
Mediana	11	11	11	11	13
Variância	43,14	47,10	43,77	39,39	54,46
Desvio Padrão	6,57	6,86	6,61	6,28	7,38
Nº de registos	8760	8760	8760	8760	2937

Analisando a tabela 3.1 e as figuras respetivas dos dados do vento em cada ano, verifica-se que os valores da velocidade média do vento são muito diferentes da velocidade de vento máxima registada. Os picos de velocidade registam-se sobretudo na estação de Inverno, como se nota em 2009 e 2012, em que a velocidade máxima se atingiu no mês de Dezembro, e em 2010 no mês de Fevereiro. Porém no ano de 2011 o valor máximo de velocidade registou-se em Outubro. No ano de 2013, verifica-se que o valor máximo acontece em Abril, no entanto estes dados apenas incluem 4 meses de observações.

Observa-se ainda que os valores médios da velocidade do vento são muito próximos, sendo consistentes de ano para ano. Estes valores médios registados são muito bons para a produção de energia eólica na cidade de Lisboa. Obtém-se uma velocidade de vento média nos 5 anos de 12.21 m/s.

Relativamente ao desvio padrão, esta medida apresenta a variação que existe em relação à média, isto é, ao valor esperado da velocidade média do vento. Verifica-se que o valor obtido para o desvio padrão é muito próximo ao longo dos 5 anos, tal como a média, e que este indica que existe alguma dispersão das observações da velocidade do vento em relação ao valor esperado.

Tendo em conta as características técnicas, apresentadas no Capítulo 2 (2.5.3), para o correto funcionamento dos aerogeradores urbanos, constata-se que os valores médios da velocidade do vento são muito próximos dos valores que permitem alcançar a potência máxima da turbina.

Quanto aos valores mínimos (entre 0 e 2 m/s), acontecem relativamente poucas vezes apesar do elevado número de observações registadas e, portanto, permitem o início da operação de um aerogerador urbano que ocorre com velocidades de vento acima de 2,5 a 3,0 m/s.

3.5.1. Propriedades médias do vento

Os ciclos diurnos médios da velocidade do vento para os anos em estudo apresentam-se nas figuras seguintes (3.20 e 3.21). Em ambas as figuras, de acordo com as observações que pertencem à estação Lisboa (Instituto Dom Luiz), no período contínuo de análise de 5 anos, apresenta-se o ciclo diurno que representa a variação média anual e sazonal da velocidade do vento para cada hora durante o dia.

A primeira figura (Figura 3.19) refere-se à caracterização anual da intensidade do vento.

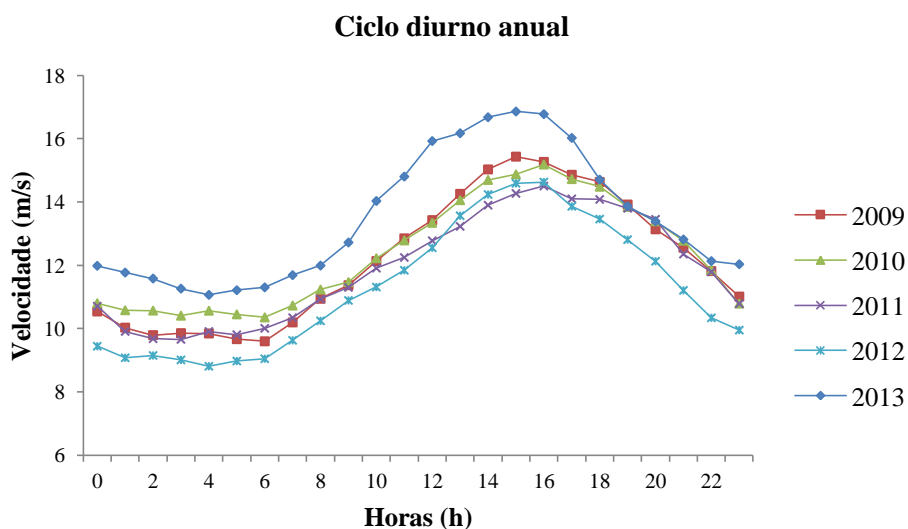


Figura 3.19 – Ciclo diurno da velocidade do vento nos anos de 2009 a 2013

Na Figura 3.20 pode observar-se que o ciclo diurno médio, para todos os anos, da velocidade do vento possui uma consistência importante para a produção eólica, tendo valores entre 9 m/s e os 17 m/s.

No ano de 2009 a velocidade média do vento variou entre 9,6 e 15,4 m/s, em 2010 entre 10,4 e 15,2 m/s, em 2011 entre 9,7 e 14,5 m/s, em 2012 variou entre 8,8 e 14,6 m/s, e no ano de 2013 os valores encontram-se entre 11,1 e 16,9 m/s; no entanto este ano apenas inclui dados de quatro

meses, sendo de esperar que os valores sejam mais elevados quando comparando com valores analisados dos anos anteriores.

Verifica-se que no período da noite (01-07h) os valores de velocidade média diária encontram-se nos valores mais baixos, e que a partir das 09h nota-se um aumento da velocidade do vento. Os picos mais altos de velocidades registam-se no período da tarde, entre as 14-16h.

A segunda figura (Figura 3.20) diz respeito à caracterização sazonal da velocidade do vento. Cada estação inclui os meses: Dezembro-Janeiro-Fevereiro (Inverno), Março-Abril-Maio (Primavera), Junho-Julho-Agosto (Verão) e Setembro-Outubro-Novembro (Outono).

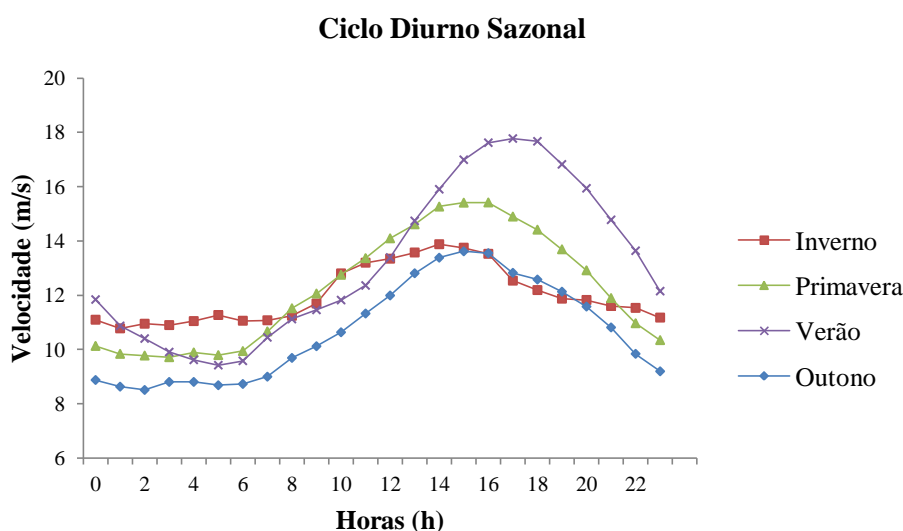


Figura 3.20 – Ciclo diurno da velocidade do vento nas estações do ano

Na Figura 3.20 observa-se que o ciclo diurno médio sazonal da velocidade do vento tem valores que variam entre 8,5 m/s e os 18 m/s.

No Inverno a velocidade média do vento varia entre 10,8 e 13,9 m/s, na Primavera entre 9,7 e 15,4 m/s, no verão entre 9,4 e 17,8 m/s, e no período do Outono os valores encontram-se entre 8,5 e 13,6 m/s. Na estação de Inverno é perceptível uma menor amplitude na intensidade do vento, ao contrário do Verão.

Observa-se que no período da noite (01-06h) os valores de velocidade média diária encontram-se nos valores mais baixos, e que a partir das 10-12h ocorre um ligeiro aumento da velocidade do vento, que se revela mais acentuado na estação do Verão. Os picos mais altos de velocidades registam-se no período da tarde, entre as 14-16h para as estações de Inverno, Primavera e Outono, e o valor mais elevado na estação do Verão observou-se às 17h.

Analisando as figuras anteriores, para as velocidades de vento médias registadas com limites entre 7 m/s e 18 m/s, conclui-se que uma turbina Omniflow instalada na cidade de Lisboa pode funcionar o dia todo, cujo controlo de segurança automático de travagem da turbina ocorre para velocidades de rotação acima de 18 m/s, segundo as características específicas da turbina apresentadas em Anexo (ANEXO I).

3.5.2. Análise de frequência e intensidade

Neste subcapítulo apresenta-se a distribuição do recurso eólico através da análise de rosa-dos-ventos, apenas para a caracterização sazonal da velocidade do vento. Os gráficos e rosa-dos-ventos pertencentes à caracterização anual (2009-2013) encontram-se em Anexo (ANEXO II).

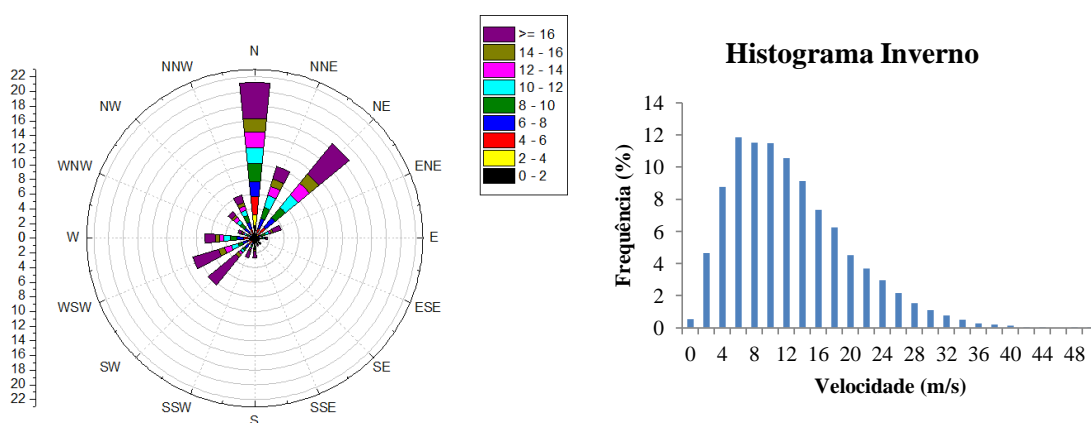


Figura 3.21 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação de Inverno

Observando a rosa-dos-ventos da figura 3.21, relativa ao Inverno (meses Dezembro-Janeiro-Fevereiro) é visível uma predominância de ventos originários do quadrante Norte (N) e Nordeste (NE), com uma percentagem de 21,1 e 15,6 %, respetivamente. O correspondente histograma de velocidades permite visualizar que as velocidades com maior frequência são 6, 8 e 10 m/s, com percentagens médias próximas de 12 %. A velocidade média durante a estação de Inverno é cerca de 12,0 m/s e as frequências de intensidade do vento menores que 2 m/s, que não permitem a produção eólica, são muito reduzidas.

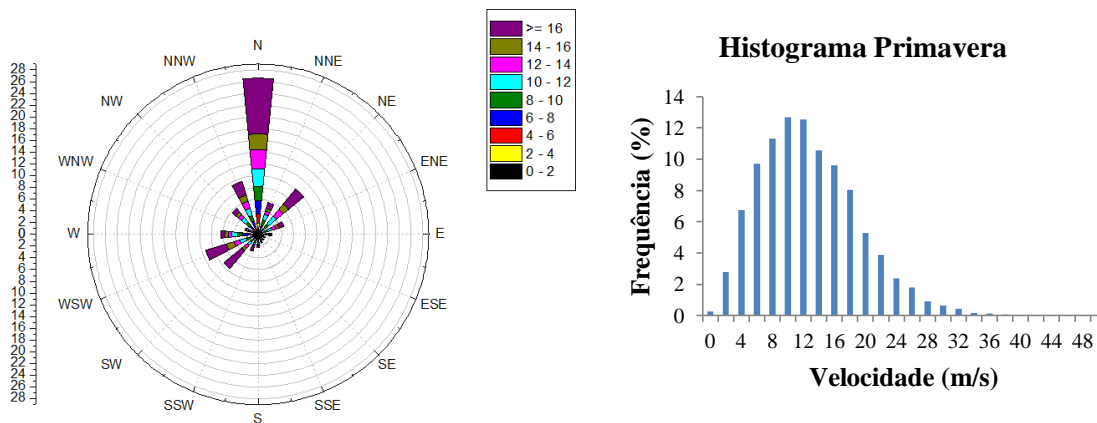


Figura 3.22 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação da Primavera

Na estação da Primavera (Figura 3.22), a maior frequência de ventos pertence ao sector Norte com uma percentagem significativa de ocorrência em torno de 28 %. Quanto às velocidades com maior número de registos, verifica-se entre 10 e 12 m/s com a probabilidade de 12,5 % cada, e uma velocidade média de 12,23 m/s ao longo da estação.

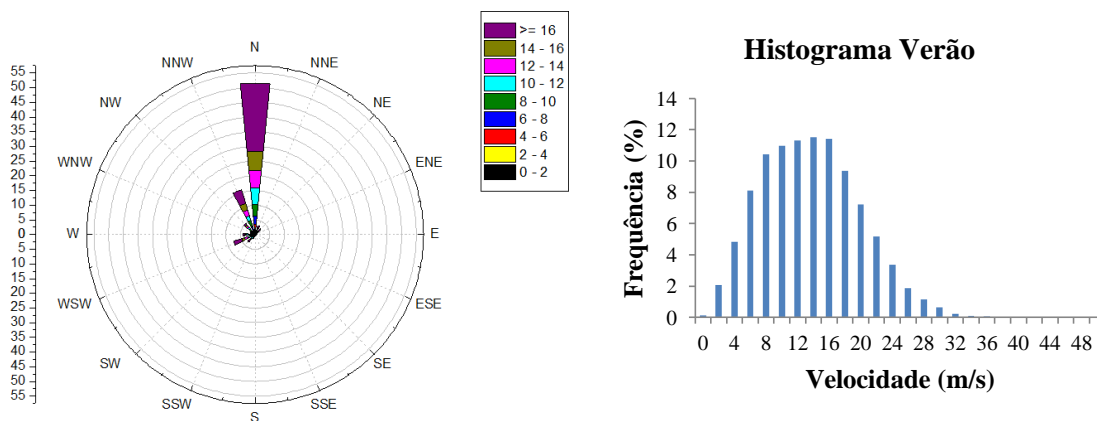


Figura 3.23 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação de Verão

Analisando os resultados relativos aos meses de Verão (Figura 3.23) observa-se a predominância de ventos com a orientação Norte, cuja percentagem é de cerca de 56 %. O pico de registos de velocidades situa-se nos valores entre 10 e 16 m/s, com uma média de 11 % de probabilidade. A velocidade média na estação do Verão é de 13,17 m/s.

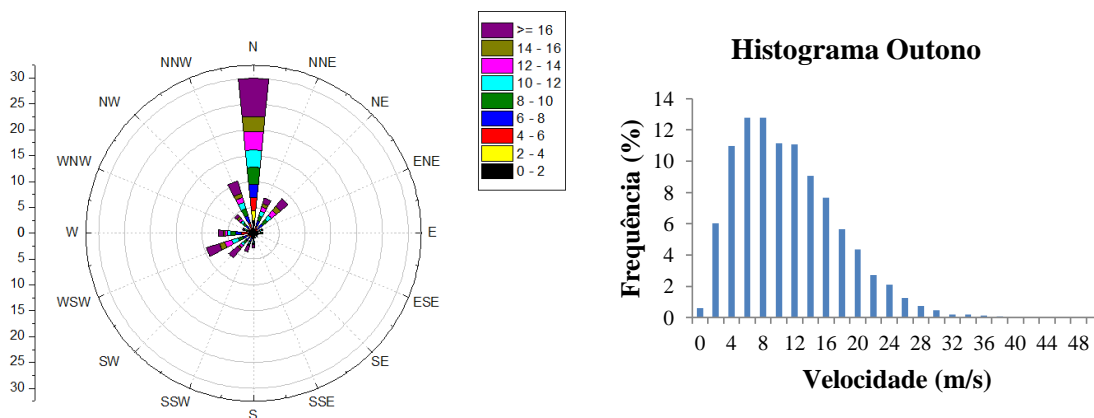


Figura 3.24 – Rosa-dos-ventos e distribuição da frequência sazonal da velocidade do vento na estação do Outono

Observando a rosa-dos-ventos e histograma de velocidades da estação do Outono (Figura 3.24), mais uma vez nota-se uma predominância de vento soprando do quadrante Norte, com uma percentagem de 32 %. A velocidade média nesta estação do ano é de cerca de 10,7 m/s, e a superioridade de observações pertence às velocidades 6 e 8 m/s, com uma frequência média de 12,7 %.

As rosas-dos-ventos e os histogramas obtidos permitem afirmar que a cidade de Lisboa, ainda que apenas baseados em dados referentes a uma estação meteorológica, possui um regime de ventos muito favorável para a produção de energia eólica.

3.5.3. Variabilidade espacial

Para a correta caracterização do escoamento atmosférico num local é necessário realizar uma adequada análise espaço-temporal. A caracterização temporal dos dados do vento foi apresentada nos subcapítulos anteriores, para as características anual e sazonal do rumo e velocidade do vento, bem como a variação da média diária anual e sazonal do vento.

A caracterização espacial pode ser realizada analisando os registos meteorológicos de diversas estações, a fim de se poder estudar a variabilidade do clima em diversos pontos da cidade de Lisboa. Sabendo que o escoamento atmosférico em torno da cidade é muito perturbado, principalmente pelo edificado, esta análise é de elevada importância pois permite ter conhecimento sobre o diferente comportamento do vento no centro urbano e em zonas localizadas na periferia.

Porém, devido à escassez de informação disponível, apenas foi possível ter acesso aos dados referentes à estação meteorológica Lisboa (Instituto Dom Luiz), não sendo possível fazer uma avaliação completa sobre a variabilidade espacial do vento na cidade de Lisboa.

3.6. Potência disponível pelo vento numa turbina

O vento provoca o movimento de massas de ar que passam através das pás da turbina, segundo um fluxo perpendicular à secção transversal da área varrida (Figura 3.25). Uma turbina eólica converte a energia cinética do movimento do vento em energia elétrica, através de um gerador. O cálculo da energia que uma turbina eólica produz é determinado tendo em conta a geometria da mesma e conceitos sobre energia cinética e potência. [64]

A energia cinética de um objeto em movimento é calculada segundo a seguinte expressão:

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

onde E é a energia cinética do vento (J) de massa m (kg) e velocidade do vento v (m/s)

$$\text{Sabendo que } m = \rho V \text{ e } V = A \cdot D,$$

sendo m a massa do ar (kg) que atravessa a área varrida A (m²) pelas pás da turbina, ρ a massa específica do ar (kg/m³), V volume (m³) e D ($D=v \cdot t$) a distância da parcela do vento (m).

Obtém-se,

$$E = \frac{1}{2} \rho A v^3 t$$

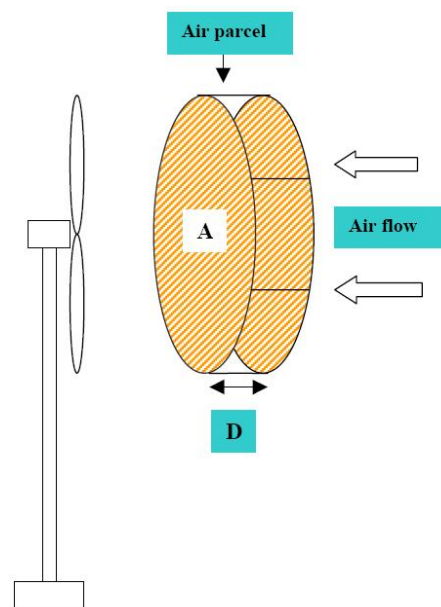


Figura 3.25 – Movimento do vento ao atravessar uma turbina

A potência máxima de uma turbina eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ (W)}.$$

Em suma, a capacidade máxima de produção de uma turbina depende da velocidade do vento e da área varrida pela turbina.

3.6.1. Coeficiente de potência

A energia cinética do vento disponível não é totalmente aproveitada pelo aerogerador, pois o ar ao atravessar a área varrida pelas pás sai da turbina com uma velocidade inferior à velocidade do vento de entrada. Assim, deve-se ter em consideração um coeficiente de potência da turbina (C_p), introduzido pela Teoria de *Betz* em 1919, que caracteriza a eficiência da mesma. [67]

Albert Betz, um físico alemão formado em engenharia naval, contribuiu para o desenvolvimento da tecnologia de turbinas eólicas. Demonstrou que uma turbina eólica não converte toda a energia cinética do vento incidente em energia mecânica, e definiu um limite teórico máximo de rendimento aerodinâmico de uma turbina, conhecido por *Limite de Betz*, em que apenas 16/27 (cerca de 59,3%) da energia do vento pode ser convertida em energia mecânica. [68]

O coeficiente de potência é uma percentagem que resulta da relação entre a energia extraída pelo rotor e a energia disponível no vento.

Sendo assim, a potência elétrica de uma turbina eólica determina-se segundo a expressão:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \text{ (W)}.$$

3.6.2. Determinação da potência da turbina Omniflow

Dos três modelos Omniflow disponíveis no mercado (Tabela 2.4), a escolha do modelo para desenvolvimento da dissertação recaiu sobre a turbina Omniflow OM 3.8 uma vez que esta atinge uma potência eólica superior às outras e que apresenta menor período de retorno sobre o investimento, sendo o equipamento mais viável.

Tendo em conta as especificações técnicas da turbina Omniflow apresentadas em Anexo (ANEXO I), procede-se de seguida ao cálculo da potência da turbina Omniflow OM3.8, concebida para operar em meio urbano, para uma velocidade de 14 m/s (valor fornecido pelo fabricante que corresponde à potência nominal da turbina).

Considerando:

$$\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3 \text{ (condições de pressão e temperaturas normais)}$$

$$D = 1,75 \text{ m (diâmetro para o cálculo da área)}$$

$$v = 14 \text{ m/s}$$

$$C_p = 55\% \text{ (valor fornecido pelo fabricante)}$$

Obtém-se:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$
$$P = \frac{1}{2} \times 1,225 \times \left[\pi \times \left(\frac{1,75}{2} \right)^2 \right] \times 14^3 \times 0,55$$
$$P = 2223 \text{ W} = \mathbf{2,2 \text{ kW}}$$

Segundo as características da turbina Omniflow, em Anexo (ANEXO I), a potência nominal da turbina, para uma velocidade de vento de 14 m/s, é de 2,0 kW. Assim, o valor obtido por via teórica está próximo do valor real.

Adiante no capítulo 5 será estudado com maior detalhe o desempenho desta turbina e a sua produção anual de energia, no caso de ser instalada em edifício localizado na cidade de Lisboa, tendo em conta os valores médios registados da velocidade do vento.

3.7. Caracterização do potencial eólico em Lisboa

Após interpretação e análise dos resultados obtidos, verifica-se que existe grande predominância de ventos oriundos do quadrante Norte, representando cerca de 31% das observações, embora o rumo dos ventos apresente alguma variabilidade anual.

Observando a distribuição de velocidades, a velocidade média anual no período em estudo na cidade de Lisboa é de 12,21 m/s. Estes valores médios são bons para captação do vento, uma vez que se encontram próximos dos limites de potência de aerogeradores urbanos (entre 12 a 15 m/s), cujos valores se traduzem na máxima produção de uma turbina, concluindo-se que a produção eólica do sistema não será afetada.

Verifica-se assim que a partir dos dados do vento referentes à estação de Lisboa em estudo (Instituto Dom Luiz), e tendo em conta as velocidades médias obtidas, verifica-se que existe potencial de captação de energia eólica através de sistemas de microprodução implementados no topo de edifícios na cidade, sem entraves à sua captação (obstáculos).

Capítulo 4

4. Instalação de aerogeradores urbanos no edificado

4.1. Tipos de coberturas

As turbinas eólicas de pequena dimensão podem ser instaladas em jardins, terraços ou telhados. Em zonas edificadas existe uma grande variação da intensidade e direção do vento que se deve sobretudo à presença de obstáculos. Como tal, a melhor localização dos aerogeradores urbanos, de modo a poder retirar o melhor partido das características do vento circundante, é no topo de edifícios (cobertura) (Figura 4.1 e 4.2).



Figuras 4.1 e 4.2 – Turbina Quietrevolution (à esquerda) e Omniflow (à direita), instaladas em coberturas

(Fonte: www.quietrevolution.com, www.omniflow.pt)

As coberturas são um elemento estrutural que têm como principal objetivo proteger o espaço interior de um edifício conferindo simultaneamente aparência estética. As coberturas são projetadas e construídas de forma a cumprirem as exigências funcionais relativas a cada tipo de cobertura. Segundo o RSA (Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes), capítulo VIII, artigo 34.1 - Sobrecargas em Coberturas - definem-se três tipos de coberturas [69]:

-
- Coberturas ordinárias – Coberturas que não permitem a circulação de pessoas, devido à sua forma (curvatura ou inclinação) ou devido aos elementos de construção.
 - Terraços não acessíveis – Coberturas com pavimento mas com acessibilidade condicionada apenas para reparações;
 - Terraços acessíveis – Coberturas com pavimento e para fins de utilização.

Fundamentalmente consideram-se dois tipos de coberturas convencionais, isto é, coberturas inclinadas (Figura 4.3) e coberturas em terraço (Figura 4.4).



Figuras 4.3 e 4.4 – Cobertura inclinada (à esquerda) e cobertura em terraço (à direita)

(Fonte: <http://www.telhados.srv.br/telhados-colonial/>)

As coberturas inclinadas, também denominados por telhados, são das mais comuns em Portugal notando-se uma grande evolução ao longo dos anos, desde a simples estrutura de madeira apoiada nas paredes até ao telhado sobre uma laje de betão armado [70]. As coberturas são constituídas por suporte e revestimento e são caracterizadas por terem um ou mais planos inclinados em relação ao plano horizontal.

As coberturas planas, horizontais ou em terraço, têm tido grande expansão nos últimos anos, nomeadamente em edifícios urbanos [71]. São constituídas por camadas de materiais dispostas segundo um plano horizontal (ou próximo dessa posição), sendo que as camadas são compostas por uma estrutura resistente, suporte de impermeabilização e revestimento de impermeabilização, e proteção do revestimento, que permitem satisfazer os principais parâmetros funcionais como segurança, habitabilidade e durabilidade da estrutura, respetivamente. [71] [72]

A cobertura em terraço é um tipo de cobertura plana estruturada de forma a poder servir de espaço de uso externo, acessível à circulação e permanência de pessoas.

4.1.1. Influência da forma da cobertura

O topo de um edifício é a localização ideal para a instalação de um aerogerador urbano. Contudo o tipo de cobertura e a respetiva forma afetam o natural escoamento do vento.

Qualquer cobertura, independentemente da sua forma, influencia sempre o escoamento do vento contribuindo para a aceleração e desaceleração da velocidade e aumento da turbulência, sendo importante considerar estes dois elementos numa fase de estudo do posicionamento de um aerogerador. Porém, cada forma da cobertura afeta de maneira distinta o escoamento do vento, como se pode verificar nos exemplos da Figura 4.5. [73]

Durante a 12ª Conferência da Associação Internacional de Simulação de desempenho de edifícios (IBPSA - *International Building Performance Simulation Association*), realizada em 2011, foi apresentado um estudo sobre o efeito da forma da cobertura no rendimento energético e no posicionamento da instalação de micro-turbinas eólicas. O referido estudo, realizado por Abohela et al. [74], compara seis diferentes tipos de coberturas entre as quais: plana (a), cúpula (b), duas águas (c), pirâmide (d), abobadado (e) e uma água (f), e a forte influência das diversas formas no escoamento do vento.

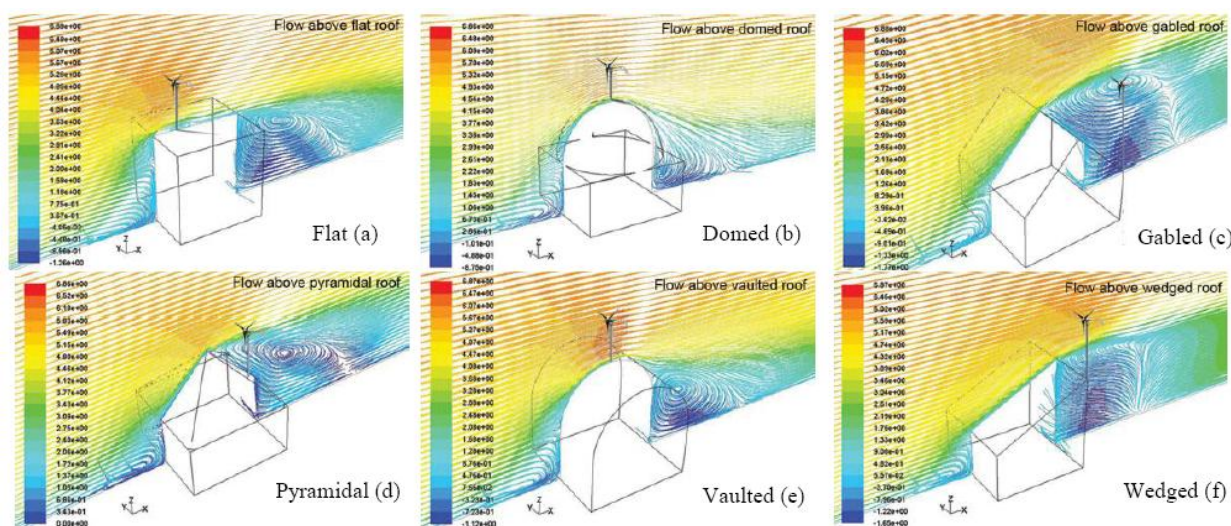


Figura 4.5 – Variação do fluxo do vento consoante a forma da cobertura, ao longo do plano central
(Fonte: Effect of roof shape on Energy Yield and Positioning of Roof Mounted Wind Turbines. Universidade de Newcastle)

Segundo Abohela et al. [73] [74], a potência de uma turbina eólica é maior e mais consistente quando instalada numa cobertura plana relativamente a outros tipos de coberturas.

Em Lisboa, e no resto do país, as coberturas dos edifícios são maioritariamente em telhado ou planas, sendo que em termos de segurança, a cobertura plana (terraço) é a que melhor se adequa à instalação da estrutura e componentes de uma turbina eólica. Quanto ao posicionamento, a turbina deve cumprir os seguintes requisitos [75]:

- Ser instalada no centro da cobertura (posicionamento adequado para evitar “sombras”);
- A dimensão do mastro/torre deve ser cerca de 50% mais alto que os objetos que o rodeiam;
- A altura do rotor deve corresponder, no mínimo, a 30% da altura do edifício;
- Ser orientada segundo a direção do vento mais comum.

No entanto, para aerogeradores urbanos de eixo vertical o último fator não é condicionante pois este tipo de turbinas são omnidirecionais e captam o vento de qualquer direção.

4.2. Limitações na instalação dos equipamentos

Sabendo que a instalação de turbinas eólicas em zonas edificadas é especialmente indicada no topo de edifícios, é necessário considerar determinados aspetos que podem interferir na rotina dos utilizadores. Durante o funcionamento dos aerogeradores pode resultar [76]:

- Ruído transmitido ao edifício e vizinhança;

O ruído acústico emitido por uma turbina eólica durante o seu funcionamento é uma das principais preocupações na aceitação da tecnologia pelas populações, não só em turbinas eólicas instaladas em parque eólicos de carácter industrial, como em aerogeradores urbanos em áreas edificadas, pois podem causar incómodo nos habitantes.

- Vibração transmitida ao edifício e vizinhança;

Tal como o ruído, a vibração resultante do funcionamento de turbinas eólicas em coberturas de edifícios é também um fator importante a ter em consideração. A vibração da estrutura da turbina pode resultar em ruído produzido e aumentar o potencial de poluição sonora [77].

- Danos no equipamento ou estruturais.

Pode existir possibilidade de ocorrência de danos estruturais caso os elementos de apoio e de fixação não tenham sido convenientemente projetados para suportar o peso da turbina e do seu conjunto, ou devido à transmissão de vibrações do conjunto para a estrutura adjacente.

4.2.1. Ruído acústico

As emissões de ruído por parte de turbinas eólicas têm sido objeto de análise em muitos estudos de impacto ambiental. [78]

As turbinas eólicas de grande porte geralmente localizam-se em áreas afastadas de zonas povoadas, no entanto são conhecidas pelo efeito negativo que as emissões de ruído, durante o seu funcionamento, têm na vizinhança.

Como os aerogeradores urbanos são uma variante de turbinas eólicas, embora adequados para zonas urbanas, qualquer ruído produzido assume ainda maior importância.

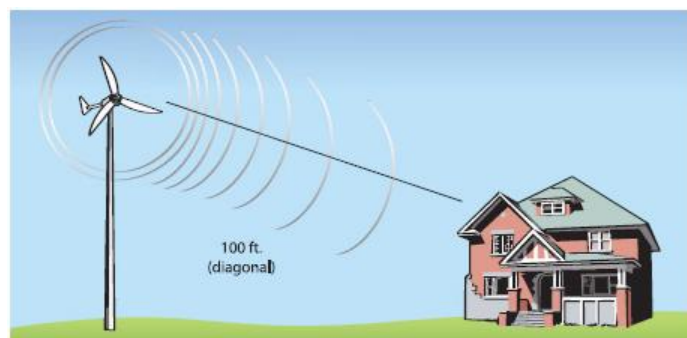


Figura 4.6 – Propagação do ruído acústico (turbina eólica), pelo caminho (ar), até ao recetor (edifício)
(Fonte: <http://www.smallwindtips.com/2009/12/how-loud-is-a-wind-turbine-really/>)

Com a preocupação dos efeitos do ruído, os aerogeradores urbanos começaram a ser projetados e adaptados de forma a reduzir o seu impacto. A escolha dos materiais, alterações na estrutura, melhoria no *design* das pás da turbina e ângulo de ataque ao vento são fatores que contribuíram para uma maior eficiência na captação do vento que, conseqüentemente, se traduz numa maior quantidade de energia do vento convertida em energia de rotação das pás, reduzindo consideravelmente os ruídos emitidos. [78]

Como os fabricantes de aerogeradores urbanos estão cada vez mais empenhados em desenvolver sistemas silenciosos e eficientes, os sistemas mais recentes emitem sons quase imperceptíveis.

Na realidade, é difícil avaliar com precisão a medição dos sons emitidos por aerogeradores urbanos [77]. Na norma internacional em vigor IEC 61400:11 *Wind Turbines Generator Systems* (Sistemas Geradores de Turbinas Eólicas), a sua décima primeira parte diz respeito às Técnicas de Medição do Ruído Acústico. Nesta (IEC 61400:11), embora se refira apenas a

grandes turbinas eólicas, estabelecem-se os procedimentos de medição, normalizados de modo a facilitar comparações, que avaliam e caracterizam, de forma consistente e precisa, as emissões de ruído de turbinas eólicas de qualquer dimensão [79] [80]. As medições devem ser efetuadas perto da turbina para minimizar as influências do efeito do terreno, das condições atmosféricas e do próprio ruído produzido pelo vento. [79]

Segundo Rogers [78], a referida norma pode não ser suficiente para medições de níveis de ruído em turbinas de pequenas dimensões, pois naquela é descrito que as medidas devem ser realizadas a uma altura de 10 m e para velocidades de vento entre 6 e 10 m/s, condições que para os aerogeradores urbanos não são fáceis de reunir.

Apesar de ser possível medir níveis sonoros de turbinas eólicas, a perceção e a reacção do público quanto à interferência acústica é subjetiva, não depende apenas do tipo de som, da amplitude e duração a que se está sujeito, mas dos níveis individuais de tolerância ao ruído, que varia de pessoa para pessoa [78], sendo portanto muito difícil medir o efeito do ruído e a aceitação do mesmo.

Existem três categorias que classificam o efeito do ruído sobre a população [78]:

- Efeito subjetivo (incómodo, irritação, insatisfação);
- Interferência com atividades (falar, dormir, ouvir);
- Efeito fisiológico (ansiedade, zumbido, perda auditiva).

Apenas nas duas primeiras categorias é que se insere o ruído produzido por turbinas eólicas de grande e pequena dimensão, no entanto, com a evolução tecnológica, o ruído emitido por turbinas modernas apenas se refere à primeira categoria. [78]

Quando em funcionamento, os sons produzidos por turbinas eólicas e aerogeradores urbanos devem-se às seguintes fontes [77] [78]:

- Via aerodinâmica - interação da ação do fluxo do vento em torno das lâminas das pás;
- Via mecânica - ruído mecânico produzido através dos componentes elétricos e mecânicos (caixa de velocidades, gerador e outros componentes)

Como referido no Capítulo 2 da presente dissertação, a escala TSR (Tip-Speed Ratio) é um fator determinante na emissão de ruído por um aerogerador urbano. Este índice representa a relação entre a velocidade de rotação na ponta das pás do rotor e a velocidade real do vento.

No projeto de aerogeradores urbanos é importante coincidir a velocidade de rotação do rotor com a velocidade do vento, a fim de se obter a máxima eficiência do rotor e de se atingir a

potência máxima de energia extraída do vento. Tal é conseguido se estas operarem segundo um valor TSR ideal. [81]

O valor ideal de TSR será o mais elevado possível uma vez que isso resulta numa elevada velocidade de rotação do eixo do rotor que se traduz em maior eficiência do rotor. Contudo, elevados valores de TSR (velocidade de rotação do eixo excessiva) representam várias desvantagens como: desgaste dos materiais constituintes da turbina, especialmente erosão das arestas das lâminas devido ao impacto com partículas circundantes no ar; falhas do sistema e desagregação dos componentes; possibilidade de vibração; e emissão de ruído de frequências audíveis e inaudíveis (fator que coloca mais dúvidas aos consumidores). [81]

Nem sempre os fabricantes disponibilizam nos catálogos dos seus equipamentos informação sobre ruído emitido, o que constitui um inconveniente para os consumidores.

4.2.1.1. Infrassons

As turbinas eólicas emitem sons de frequências distintas, nomeadamente sons de baixa frequência e infrassons. [78] [82]

Os infrassons são sons que se situam abaixo do limite da perceção humana (20 Hz) e apesar de serem inaudíveis pelo ser humano podem causar efeito fisiológico perturbador (irritabilidade, insónia). [79]

Propagam-se a maior distância do que sons com frequências mais altas [78], mas diminuem a sua intensidade com a distância. [82]

Segundo Bellhouse [83], o efeito do ruído nas pessoas expostas só acontece quando este é audível, isto é, quando o ruído tem uma frequência acima do limiar da perceção humana. Afirma que não existem provas que evidenciem efeitos quando sujeitos a níveis de emissões de ruído de baixa frequência e infrassons por turbinas eólicas modernas, e que estes níveis são tão baixos que não são perceptíveis, e como tal não causam problemas.

4.2.2. **Vibração**

Tal como o ruído produzido por uma turbina eólica, a vibração resultante do funcionamento dos aerogeradores é também uma preocupação a ter em consideração.

Os sistemas mecânicos em geral vibram, isto é, sofrem deslocamentos em relação às estruturas que os sustentam. Alguns exemplos de movimentos oscilatórios e forças associadas ao movimento são: a resposta de estruturas à ação do vento, vibrações induzidas devido a sismos em estruturas, ou o funcionamento de máquinas e motores. Este tipo de movimentos podem pôr em causa não só o correto desempenho dos equipamentos e a estrutura que os suporta, como o edifício em que os referidos sistemas estão instalados [84].

Evitar ou reduzir a propagação de vibrações pode minimizar a fadiga dos materiais, o desgaste dos equipamentos e a ocorrência de falhas, prolongando a sua vida útil [85], e reduzir a possibilidade de provocar danos estruturais ao edifício.

É fundamental considerar a transmissão de vibrações a um edifício pois tal facto pode ser incomodativo, diminuir o conforto dos seus utilizadores, interferindo nas suas atividades, e comprometer a segurança estrutural [86].

Equipamentos instalados em edifícios são fontes de vibração. Caso sejam instalados na base, piso térreo, as vibrações podem não se propagar tão facilmente pelo restante edifício; no entanto os aerogeradores urbanos devem ser fixados no topo de edifícios (exceto quando não são instaladas ao nível do solo), sendo um local que potencia a propagação do ruído e da vibração, e conseqüentemente pouco desejável para os ocupantes dos edifícios. [87]

O comportamento dinâmico destes sistemas deve ser analisado de forma a caracterizar a vibração induzida, identificar frequências naturais e avaliar a resposta da estrutura, com o objetivo de evitar ressonâncias. [88]

4.2.3. Isoladores de ruído e vibrações

Para reduzir os níveis de ruído e amplitude de vibrações de equipamentos mecânicos, existe a necessidade de introdução de sistemas de isolamento, através de isoladores de vibração indicados para proteção mecânica, conhecidos por amortecedores. Os isoladores absorvem a energia e permitem os movimentos dos equipamentos em relação à estrutura que os suporta, isolam as vibrações e evitam que se propaguem pelo edifício. [84] [87]

Geralmente os equipamentos são compostos por vários componentes individuais que ligados entre si fisicamente formam um conjunto. A inserção de acessórios de materiais flexíveis, no interior ou base do sistema, minimiza a transmissão de vibrações e permite que as partes móveis do equipamento se movimentem e que não sejam transmitidas vibrações para os elementos estacionários, nem sejam provocados danos por vibração ao edifício. [84] [89]

Os isoladores de vibração (figura 4.7) podem ser compostos por materiais que devem ter a capacidade de se deformarem e voltar à posição inicial, ou seja, elementos elásticos (molas ou calços de borracha). Os isoladores mais comuns são constituídos por blocos de borracha com duas bases metálicas nas extremidades, fixados através de parafusos, cavilhas ou ganchos [84]. Os fatores a considerar na escolha do tipo de amortecedor, para além de ter em consideração o movimento que se pretende isolar ou a força associada, são o peso a suportar, a frequência de funcionamento do equipamento e a rigidez da estrutura de suporte. [89]



Figura 4.7 – Alguns exemplos de apoios anti vibração
(Fonte: Lamancusa, J (2002) - Vibration Isolation. Noise Control)

4.3. Instalação de aerogeradores no edificado

Quando um aerogerador é montado na laje de uma cobertura, esta deve ser capaz de suportar o peso do equipamento e estruturas adicionais, e resistir às ações dinâmicas do conjunto quando em funcionamento. [84]

As dimensões, peso e procedimento de montagem variam consoante os fabricantes dos equipamentos e os modelos, sendo essencial considerar as suas recomendações.

Para se proceder à instalação de um aerogerador na cobertura de um edifício é necessário, para além do conhecimento sobre as características do aerogerador a instalar (fornecido pelo fabricante), terem sido avaliados:

- O projeto de estabilidade do edifício, ou o projeto de estruturas e fundações (com informação sobre os critérios de dimensionamento e o tipo de laje da cobertura);
- Pormenores de acabamento da cobertura (com detalhes e descrição sobre o sistema de impermeabilização, e eventualmente de isolamento térmico, implementado na cobertura).

Após análise dos referidos documentos técnicos e visita ao local, segue-se a proposta do sistema de fixação da base do aerogerador ao elemento estrutural. A solução de fixação do equipamento e seus elementos ao ponto de instalação deve ser ajustada às condições do local (estrutura da cobertura).

4.3.1. Soluções de fixações

Os aerogeradores urbanos podem ser instalados com uma ligação direta entre a base da torre e a laje de cobertura, ou então recorrendo à utilização de maciço de estabilização adicional que se traduz num aumento do peso sobre a cobertura.

É fundamental saber a constituição do sistema de impermeabilização implementado na cobertura do edifício, devendo-se adaptar a solução de fixação do mastro ao mesmo, de modo a não pôr em causa o seu correto desempenho.

4.3.2. Aplicação do aerogerador Omniflow

A turbina Omniflow é uma nova tecnologia portuguesa com grande potencial de crescimento. É um aerogerador de eixo vertical e omnidirecional, novo no mercado eólico urbano e conhecido pelo seu *design* invulgar e inovador. Este produto combina o aproveitamento da energia eólica e solar fotovoltaico, conhecido por sistema híbrido. Estes sistemas são mais eficientes na produção de energia quando comparados com sistemas eólicos apenas, contribuindo para uma significativa redução do consumo energético local e contribuindo para a necessidade de redução de custos de energia por parte dos consumidores. Captam a energia solar no pico do Verão e a energia eólica no pico de Inverno, com o intuito de obter uma produção linear durante o ano. [56]

4.3.2.1. Descrição do equipamento Omniflow

O aerogerador Omniflow é composto por duas estruturas principais (Figura 4.8):

- A estrutura de suporte do aerogerador:
 - Cabeça do poste/coluna
 - Base do interface com gerador (onde será instalada a calota, gerador e rotor)
 - Poste/coluna de suporte do aerogerador e respetiva base de fixação no ponto de instalação
- O aerogerador em si:
 - Calota exterior
 - Gerador de ímanes permanentes
 - Rotor com 5 pás.



Figura 4.8 – Elementos constituintes da turbina Omniflow

(Fonte: <https://vimeo.com/76447637>)

4.3.2.2. Dimensões e características dos elementos constituintes

Para além das dimensões da calota e cabeça da coluna, gerador e rotor, a seguinte tabela (Tabela 4.1) apresenta um resumo dos restantes elementos estruturais constituintes do equipamento Omniflow e respetivas dimensões.

Tabela 4.1 – Elementos estruturais constituintes da turbina Omniflow

Elementos constituintes	Dimensões
Coluna/poste de suporte	Perfil coluna icosaogonal, com 16 lados e 5mm de espessura
Chapa de topo da coluna	Φ 240mm, com 10mm de espessura, preparada para 6 pontes de fixação
Chapa de base da coluna e de fixação à estrutura/macico de apoio	Φ 500mm, com 12mm de espessura, preparada para 8 pontos de fixação
Chapas/flanges de reforço na base da coluna	8 Unidades, com 8mm de espessura

(Fonte: Omniflow)

4.3.2.3. Ruído e Vibração

Segundo o inventor e fabricante, tanto o ruído como as vibrações não são um problema neste aerogerador.

A turbina Omniflow OM3.8 está projetada com 5 pás ligadas ao rotor e opera com um valor de TSR de 5, cuja velocidade limite é de 50 m/s na ponta das pás.

Tendo em conta este facto e de a turbina Omniflow ser composta por um difusor exterior (calota) que envolve o mecanismo de rotação da turbina, assegura-se um nível de ruído emitido muito reduzido (níveis de sons inferiores a 35 dB a 10m).

As vibrações são minimizadas, ou até mesmo anuladas, pois incorpora 6 apoios anti-vibratórios onde assenta o gerador, que se situam mesmo por baixo do rotor. Estes elementos anti-vibratórios não ficam sujeitos às cargas elevadas, mas apenas à rotação do rotor. Desta forma diminuem a presença de ruído e evita-se a amplificação de vibrações pela coluna e consequente transmissão ao edifício.

4.3.2.4. Soluções de estruturas de fixação e suporte

Se a fixação for **direta**, a coluna é conectada com o elemento estrutural através da sua base. Neste aerogerador a fixação direta executa-se através da aplicação de chumbadouros, em varão roscado zincado, dispostos de forma concêntrica e selados na laje de cobertura para ligação à base da coluna de suporte, composta por uma chapa (Figura 4.9).

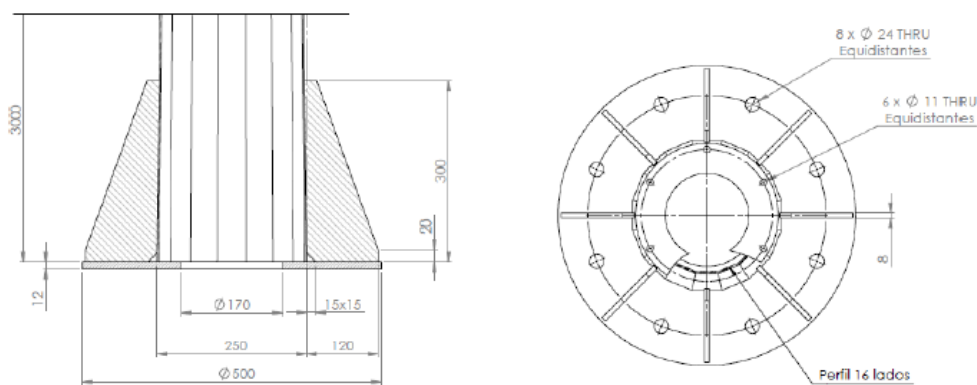


Figura 4.9 – Pormenor tipo, corte e planta da ligação da base da coluna de suporte da turbina Omniflow
(Fonte: Omniflow)

A fixação pode ser executada por intermédio de um **maciço** complementar de estabilização da estrutura do aerogerador que suporta e fixa o equipamento.

Na turbina Omniflow o maciço pode ser constituído por uma laje flutuante em betão armado, pré-fabricada e colocada no local, de geometria aproximadamente retangular e dimensões reduzidas. Este maciço é pré-fabricado para facilitar a instalação do aerogerador e evita trabalhos adicionais de construção civil.

Para evitar possíveis danos acidentais no isolamento, o maciço é assente sobre uma membrana de espuma de polietileno que se localiza entre a laje da cobertura do edifício e o maciço.

Primeiro o maciço de apoio é colocado na cobertura e de seguida faz-se a fixação da base da coluna, através de chumbadouros, e instalação dos restantes elementos constituintes da turbina.

O peso deste elemento adicional de estabilização deve incluir-se no cálculo total do equipamento (Figura 4.10).

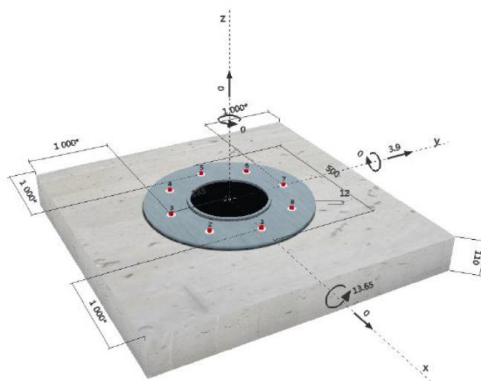


Figura 4.10 – Fixação da base da coluna de suporte da turbina Omniflow ao maciço de apoio
(Fonte: Omniflow)

4.4. Ações e dimensionamento

O estudo e dimensionamento dos diversos elementos estruturais de um aerogerador urbano seguem a regulamentação portuguesa em vigor, nomeadamente o RSA (Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes) e o REBAP (Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado).

O RSA, aprovado pelo Decreto-Lei nº 235/83 de 31 de Maio, estabelece as regras gerais para a verificação de segurança das estruturas de edifícios e pontes, e a definição e quantificação das ações a considerar nessa verificação. Pode ser aplicado a outro tipo de construções, diretamente ou com algumas adaptações [69]. As ações consideradas no estudo baseiam-se no referido documento, sendo classificadas em ações permanentes, ações variáveis e ações de acidente.

O REBAP, aprovado pelo Decreto-Lei nº 349-C/83 de 30 de Julho, foi elaborado em estreita ligação com o RSA, com a extensão ao betão pré-esforçado. [90]

4.4.1. Ações permanentes

As ações permanentes são ações cujos valores se mantêm constantes (variação próxima do valor médio) durante a vida de uma estrutura (neste caso cobertura). As ações permanentes incluem os pesos próprios dos elementos estruturais e não estruturais da construção, de equipamentos fixos, entre outros, determinados a partir dos pesos volúmicos dos materiais que os constituem [69].

O peso próprio da estrutura da turbina e seus componentes é considerado ação permanente.

4.4.2. Ações variáveis

As ações variáveis são ações que assumem valores com variação significativa do valor médio durante a vida útil de uma estrutura, como sobrecargas e as ações da neve (S), do vento (W) e do sismo (E). [69]

De acordo com o RSA [69]:

4.4.2.1. Ação do vento (W)

Segundo o Capítulo V, artigo 20º - Zonamento do território - para a quantificação da ação do vento o país encontra-se dividido em duas zonas:

- Zona A – Todo o território nacional, exceto as regiões pertencentes à zona B;
- Zona B – Arquipélago dos Açores e Madeira e as regiões do continente que se situem numa largura de 5km da faixa costeira ou com altitudes superiores a 600m.

Visto que a zona geográfica em estudo é Lisboa, e que os dados fornecidos pertencem a uma estação meteorológica localizada no Jardim Botânico da Universidade de Lisboa, a zona é classificada por Zona B pois situa-se a cerca de 2km do rio Tejo.

Segundo o Capítulo V, artigo 21º - Rugosidade aerodinâmica do solo - tendo em conta a variação da ação do vento com a altura acima do solo, estabelecem-se dois tipos de rugosidade aerodinâmica do solo:

- Rugosidade do tipo I – locais situados no interior de zonas urbanas em que dominem edifícios de médio e grande porte;
- Rugosidade do tipo II – restantes locais, nomeadamente zonas rurais e periferia de zonas urbanas.

Como a estação meteorológica Lisboa (Instituto Dom Luiz) encontra-se inserida num espaço verde, no centro da cidade de Lisboa, considera-se que a rugosidade aerodinâmica do solo é do tipo I.

4.4.2.2. Ação da neve (S)

De acordo com o Capítulo VI, artigo 26º - Zonamento do território - a ação da neve deve ser considerada nos locais com altitude igual ou superior a 200 m.

A estação meteorológica em estudo tem uma altitude de 77m, e a cidade de Lisboa não se insere nos distritos a quantificar a ação da neve, como tal não se considera o seu efeito neste estudo.

4.4.2.3. Ação do sismo (E)

Segundo o Capítulo VII, artigo 28º - Zonamento do território - o país encontra-se dividido em quatro zonas sísmicas (A, B, C e D), por ordem decrescente de sismicidade.

De acordo com o Anexo III do referido regulamento, a zona sísmica da cidade de Lisboa é a zona sísmica A, no entanto dada a reduzida massa da estrutura da turbina, a ação do sismo não se considerou no estudo.

4.4.3. Cálculo estrutural

Os esforços atuantes ao nível da base da coluna são condicionantes para o dimensionamento e verificação da segurança da estrutura que suporta a turbina e do maciço de estabilização. Devem ser determinados os valores das reações de cálculo máximos na base da coluna, sob a combinação condicionante da ação base vento.

As ações que se impõem devem ser compatíveis com a resistência do isolamento existente, de modo a não comprometer a integridade do sistema de impermeabilização presente ao nível da cobertura.

Tendo em conta as reações previstas na base do mastro da turbina, cujos valores são determinados considerando as ações regulamentares (variável base: neve, vento e sismo), é importante saber se a laje de cobertura suporta as cargas que se irão instalar.

4.5. Verificação da segurança da turbina Omniflow OM 3.8

De modo a verificar a segurança do equipamento na cobertura a instalar, é necessário determinar as reações da estrutura ao nível da base (ponto de instalação).

Apresentam-se em seguida os pesos dos componentes que constituem o equipamento (valores fornecidos pelo fabricante):

- Turbina OM 3.8 (calota, gerador, rotor) = 210 kgf = 2,06 kN
- Estrutura de suporte (chapa superior, coluna de suporte, chapa inferior, flanges, e elementos de ligação) = 1,9 kN

Conforme os resultados obtidos no Capítulo 3, na cidade de Lisboa observam-se velocidades máximas na ordem dos 50 m/s (180km/h). No entanto o valor característico do vento na cidade de Lisboa de acordo com o RSA é inferior ao do estudo realizado, como adiante se poderá constatar.

4.5.1. Quantificação da ação do vento, de acordo com RSA [69]

1) Valor característico da velocidade do vento (v)

Os valores característicos da velocidade do vento para o cálculo da quantificação da ação do vento encontram-se dispostos no RSA, Capítulo V, artigo 22º.

Tendo em conta que a zona está classificada como B e a rugosidade aerodinâmica do solo é do tipo I, o valor característico da velocidade do vento é obtido pela seguinte expressão:

$$v = 18 \left(\frac{h}{10} \right)^{0,28} + 14$$

Em que a altura acima do solo (h) expressa-se em m e o valor característico da velocidade do vento (v) em m/s.

Considera-se a instalação da turbina, com uma coluna de 3m, num edifício no centro da cidade de Lisboa com 20 m de altura acima do solo. Assim, segundo o RSA obtém-se o valor da velocidade do vento de 35,86 m/s. Este valor é bastante inferior aos valores máximos registados na estação meteorológica em estudo.

2) Pressão dinâmica do vento (w_k) – artigo 24º

Os valores característicos da pressão dinâmica do vento determinam-se considerando a classificação da zona, a rugosidade aerodinâmica do solo e o valor característico da velocidade, através da expressão:

$$w_k = 0,613 v^2$$

O valor da pressão dinâmica do vento determinado é de 788,08 N/m², mas como a zona está classificada como B, multiplica-se o valor obtido pelo fator 1,2. O valor final da pressão dinâmica do vento é 945 N/m² = 0,945 kN/m².

3) Força do vento

De acordo com o Anexo I do RSA, a força do vento determina-se segundo as pressões do vento sobre a construção, ou sobre um elemento, segundo a seguinte expressão:

$$F = \delta_f w A$$

Em δ_f é o coeficiente de forma, w a pressão dinâmica do vento (kN/m^2) e A a área de referência (m^2), relacionada com a superfície exposta.

Admitindo-se um coeficiente de forma de 1,0, e sabendo que a área total de exposição é cerca de 4 m^2 (Figura 4.11), assim obtém-se uma força do vento de 3,8 kN.

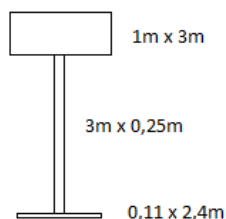


Figura 4.11 – Área aproximada de exposição do elemento à ação do vento

4.5.2. Reações de cálculo

Tendo em conta a ação condicionante vento, resultam as seguintes reações de cálculo:

- **F_hsd** (força horizontal máxima na base do poste) = 3,80 kN
- **F_vsd** (força vertical máxima na base do poste) = 2,06 kN + 1,9 kN
- **M_sd** (momento máximo atuante na base, para uma coluna de suporte com 3,0m de altura) = 11,4 kN.m

4.5.3. Dimensionamento do maciço de apoio

Sabe-se que ao escolher uma solução de instalação com o auxílio de um maciço de apoio, este irá resultar num peso total superior ao que seria esperado, caso não se recorresse ao seu uso.

A secção transversal do maciço deve ser calculada para o menor valor viável de excentricidade originada pelo momento atuante na base da estrutura, o ponto mais próximo possível do centro de gravidade do maciço (que deve coincidir com o centro de aplicação da carga do equipamento).

Os critérios para o cálculo da excentricidade mínima são os seguintes:

- $B/6 < e < B/2$, Em que e representa a excentricidade e B o lado de um o maciço quadrangular considerado.

- $e = Msd/P$, Em que Msd representa o momento máximo atuante na base da coluna e P o peso total da carga vertical do equipamento.

Considerando um maciço de apoio, em betão armado, de dimensões $2,4 \times 2,4 \times 0,11 \text{ m}^3$, com um peso aproximado de $1616 \text{ kgf} = 15,84 \text{ kN}$ ($2,75 \text{ kN/m}^2$), obtém-se:

$$P = 2,06 + 1,9 + 15,84 = 19,80 \text{ kN}$$

$$e = \frac{Msd}{P} = \frac{11,4}{19,80} = 0,5758$$

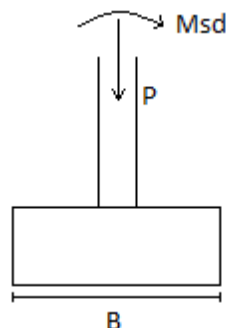


Figura 4.12 – Forças aplicadas para o cálculo da dimensão do maciço

A dimensão do maciço, para o cálculo da área efetiva do maciço (área que está em compressão), é:

$$B' = 1,5 (B - 2e) = 1,5 (2,4 - 2 \times 0,5758) = 1,873 \text{ m}$$

Assim, a área efetiva da base do maciço de apoio é de $4,495 \text{ m}^2$ ($2,4 \times 1,873$), e a sobrecarga máxima que corresponde ao equipamento Omniflow e ao maciço de apoio sob a ação condicionante da ação variável base vento é:

$$\frac{19,80}{4,495} = 4,4 \text{ kN/m}^2$$

4.5.3.1. Verificação dos estados limites últimos de equilíbrio

Verifica-se a segurança para os estados limites últimos de equilíbrio para elementos isolados como é o caso do maciço de apoio do equipamento.

O **estado limite último de derrubamento** (Figura 4.13) estabelece que os momentos estabilizadores (M_e) devem ser superiores aos momentos derrubadores (M_d), e a razão deve cumprir o fator de segurança adicional de 1,5.

Os momentos estabilizantes referem-se ao momento do peso próprio do maciço em relação ao ponto, enquanto os momentos derrubantes dizem respeito ao momento máximo atuante sob a ação condicionante vento.

Assim,

$$\frac{Me = 15,84 * \frac{2,4}{2} = 19,0 \text{ kN.m}}{Md = 11,4 \text{ kN.m}} = 1,67 > 1,5$$

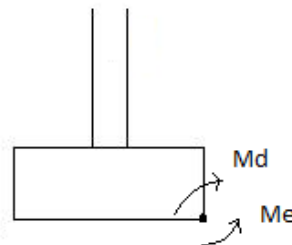


Figura 4.13 – Estado Limite Último de Derrubamento

O **estado limite último de deslizamento** pela base estabelece que as forças estabilizantes (F_e) devem ser superiores às forças desestabilizantes (F_d), e a razão, tendo em conta uma tensão tangencial resistente entre a base do maciço e a superfície de apoio (cobertura), deve cumprir o fator de segurança adicional de 2,0.

No entanto esta verificação não é relevante uma vez que a carga vertical total (19,8 kN) é muito superior à reação horizontal de cálculo (3,8 kN).

4.5.4. Verificação da sobrecarga admissível na laje de cobertura existente

Nesta fase é necessário ter conhecimento sobre o projeto de execução de fundações e estruturas para a cobertura do edifício. De acordo com as ações permanentes e as ações variáveis dispostas no referido documento, prossegue-se com a verificação se a cobertura tem capacidade para suportar a carga do conjunto da turbina a instalar.

Analisando a memória descritiva do projeto de execução, considerou-se, com base num documento técnico, para a cobertura onde se irá instalar a turbina uma sobrecarga de 5,0 kN/m². O valor considerado justifica-se pois se considera prevista a utilização da cobertura para instalação de equipamento técnico.

Tendo em conta a sobrecarga admitida na cobertura, a sobrecarga total do equipamento deve ser inferior a esse valor (neste caso de 5,0 kN/m²), a fim de ser possível proceder à sua instalação.

O equipamento Omniflow e a base de apoio/maciço, sob a combinação condicionante da ação variável base vento, resultam numa sobrecarga máxima de $4,4 \text{ kN/m}^2$ a atuar sobre a laje da cobertura. Este valor final encontra-se dentro do limite admitido ($5,0 \text{ kN/m}^2$). Portanto, tanto a instalação do equipamento como o maciço adicional de estabilização não colocam em causa a integridade e a funcionalidade da laje da cobertura do edifício considerado.

Caso seja necessário, e de modo a não comprometer a integridade do revestimento e isolamento existente na cobertura, pode remover-se a camada de proteção existente na cobertura, no ponto de instalação, diminuindo as sobrecargas nessa zona e resultando num aumento de folga para instalação do equipamento.

Capítulo 5

5. Aproveitamento eólico urbano em Lisboa

5.1. Aproveitamento eólico urbano

A avaliação do potencial de uma turbina eólica num determinado local deve ter em conta não só a localização para a instalação da turbina e as condições dos ventos locais, como as características técnicas do equipamento.

O estudo da viabilidade do local serve para determinar a adequação, ou não, de um dado local, para posteriormente se proceder à instalação da turbina. Tal como se referiu nos capítulos anteriores, devem ser considerados aspetos, tais como: a variabilidade das características do vento e os efeitos do edificado (obstáculos na vizinhança) no seu escoamento.

As especificações técnicas de cada turbina são fornecidas pelo fabricante, parâmetros como: as dimensões físicas, a variação da altura da torre e a curva de potência que descreve o desempenho da produção de eletricidade. Os custos dos equipamentos, componentes e infraestruturas necessárias para instalação são também, em geral, apresentados pelo fabricante da turbina. [91]

5.2. Aspetos económicos relativos a turbinas urbanas

O preço de turbinas existentes no mercado da microprodução é muito variável. O custo de venda ao público, atualmente, pode variar entre 6 000,00 € e 11 500,00 € [92], e a potência pode variar entre 1 a 4 kW [93]. O preço do sistema depende não só dos materiais empregues no equipamento e da potência gerada, mas também dos custos referentes ao transporte e instalação dos componentes [92].

O investimento na microprodução por micro-turbinas eólicas é totalmente realizado na fase inicial de aquisição do sistema, englobando todos os custos associados ao fornecimento, transporte, montagem, colocação em serviço e garantia (em geral de 2 anos).

O retorno sobre o investimento (ROI) depende da produção de eletricidade da turbina que é significativamente condicionada pelo potencial eólico e pela configuração do local [93].

Naturalmente o ROI (Return On Investment) deve ter em conta o custo inicial global, a potência elétrica média gerada anualmente, a perda de rendimento da turbina ao longo da sua vida útil e os custos de manutenção.

5.2.1. Custos envolvidos

Os custos necessários para o estudo da viabilidade económica de instalações de microprodução são em geral os custos iniciais e os custos de manutenção e operação. Os primeiros dizem respeito ao investimento inicial que engloba gastos com estudos preliminares de viabilidade técnica, projetos de instalação, custos de equipamentos, estruturas e outras despesas. Os custos de operação e manutenção incluem despesas relativamente a reparação ou reposição de peças e componentes, entre outros. [91] [94]

No caso de instalações de turbinas eólicas urbanas (microprodução eólica), os custos iniciais prendem-se com gastos da avaliação do potencial eólico da zona, valor do equipamento, componentes e sua instalação. Quanto aos custos de operação e manutenção são os anteriormente mencionados. [91] [94]

Na presente dissertação, apenas se consideram os custos iniciais na fase de estudo da viabilidade económica de uma turbina.

Em geral, os fabricantes estabelecem o custo da turbina eólica incluindo todos os gastos realizados ao longo do processo, sendo esse o valor de investimento inicial.

5.2.2. Eletricidade produzida

Os aerogeradores urbanos são utilizados em edifícios ou moradias, para a venda de energia à rede elétrica ou para consumo interno.

Para o cálculo da quantidade de eletricidade produzida por uma turbina eólica, incluem-se dois fatores importantes [93]:

- Especificações técnicas da turbina (curva de potência com a potência da turbina em função da velocidade do vento), e
- Distribuição da velocidade dos ventos locais, numa determinada zona.

Proceder-se-á a uma análise da viabilidade económica do sistema de microprodução eólica de energia eléctrica escolhido, a turbina Omniflow 3.8.

5.3. Rendimento de um aerogerador urbano

Como referido, o estudo das características dos ventos locais e da curva de potência da turbina servem para determinar a quantidade de energia que uma turbina é capaz de gerar num determinado local durante um período de tempo, geralmente de um ano. Este resultado é conhecido como rendimento anual de uma turbina [95]. Assim, considerando a velocidade média do vento de um dado local, analisando a distribuição das velocidades do vento durante o período em análise, e a curva de potência de uma turbina, é possível determinar a produção de energia eólica. [93]

5.4. Estimativa do potencial eólico da Turbina Omniflow

A empresa Omniflow tem à disposição três modelos de aerogeradores eólicos. Na tabela seguinte (Tabela 5.1) apresentam-se os valores que representam estimativas prováveis para cada modelo escolhido. Através da tabela é possível comparar as diversas vertentes da turbina Omniflow OM 3.8, considerando a energia produzida por ano, o custo inicial e o retorno expectável do investimento inicial.

Tabela 5.1 – Modelos Omniflow 3.8: energia anual produzida e investimento inicial

Modelo turbina OM 3.8	Energia produzida por ano	Custo inicial
OM 3.8 – apenas vertente eólica	3000 kWh/ano , 6m/s 4000 kWh/ano , 7m/s	8.200 € + iva
Retorno sobre o investimento: 10/11 anos		
OM 3.8 (3kW) + Painéis solares integrados (800W)	4000 kWh/ano , 6m/s 5000 kWh/ano , 7m/s	9.900 € + iva
Retorno sobre o investimento: 9/10 anos		
OM 3.8 (3kW) + Painéis solares externos (5kW)	9600 kWh/ano , 6m/s 10100 kWh/ano , 7m/s	14.000 € + iva
Retorno sobre o investimento: 6/7 anos		

(Fonte: Omniflow)

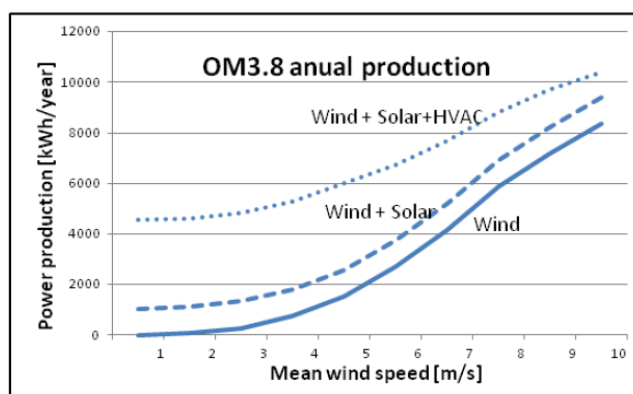


Figura 5.1 – Produção anual para os diferentes modelos Omniflow 3.8 (Fonte: Omniflow)

Analisando a tabela em cima (Tabela 5.1), observa-se que o modelo híbrido OM 3.8, com a combinação de vertente eólica e painéis solares no exterior, é o mais favorável pois o período de retorno do investimento é menor, ou seja, o reembolso ocorre mais rapidamente, apesar de haver um maior investimento inicial. Este elevado valor do investimento inicial deve-se ao facto da turbina ter uma maior capacidade de produção de energia linear (Figura 5.1) durante o ano, devido ao aproveitamento eólico e solar.

5.4.1. Análise do desempenho da turbina OM 3.8 em Lisboa

No Capítulo 3 foi analisado o regime de ventos na cidade de Lisboa a partir de dados horários do vento representativos de um período de cinco anos (Janeiro 2009 a Maio 2013), referentes à estação meteorológica Lisboa (Instituto Dom Luiz).

A seguinte figura (Figura 5.2) apresenta a velocidade média do vento em cada ano, obtendo uma velocidade média estimada do vento em Lisboa, durante o período em análise, de 12,2 m/s.

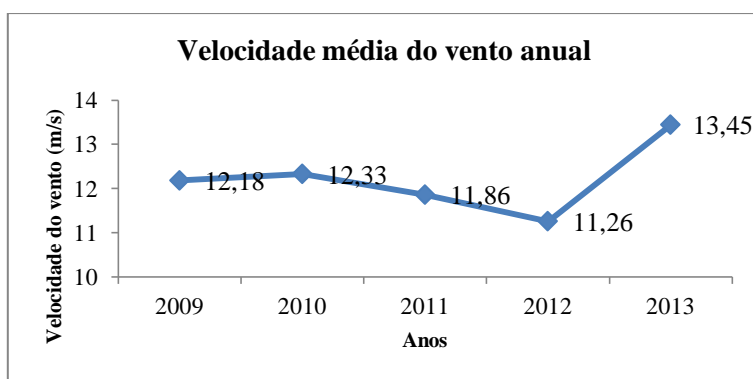


Figura 5.2 – Velocidade média anual do vento no período em análise

A curva de potência de uma turbina representa a relação entre a velocidade do vento e a potência da turbina.

Analisando a curva de potência da turbina Omniflow OM3.8 (Figura 5.3), observa-se que para uma velocidade do vento de 12 m/s (valor mais próximo do valor obtido no estudo para Lisboa), a potência da turbina é de 1,08 kW.

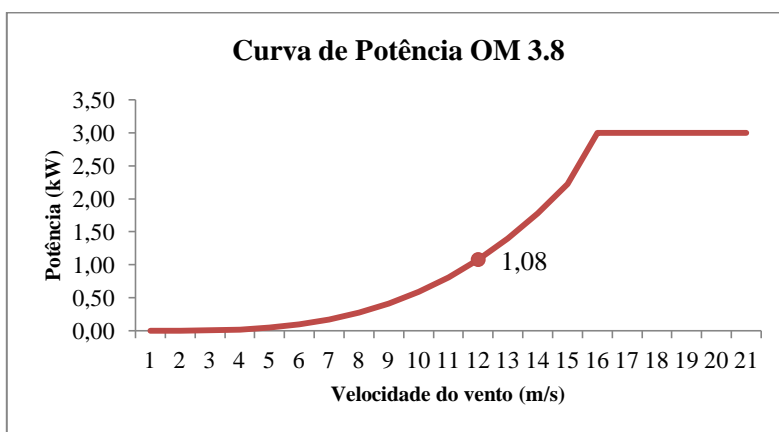


Figura 5.3 – Curva de potência da OM 3.8

Considera-se que o vento ocorre durante o ano, isto é, durante 24h em 365 dias (8760 horas). Multiplicando a potência que a turbina produz à velocidade média registada, com o nº de horas num ano, obtém-se uma estimativa da produção média anual da turbina OM 3.8.

$$\text{Rendimento anual} = 1,08 \text{ kW} \times 8760 \text{ horas} = 9460,8 \text{ kWh}$$

5.4.2. Produção anual estimada OM3.8

A turbina Omniflow tem uma vida útil de 25 anos, logo apresenta-se a produção anual da turbina ao longo desses anos, considerando um coeficiente de perda de produção anual de 0,68%. Deste modo determina-se a quantidade de energia eólica (kWh) que a turbina produz por ano, como se pode observar na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Produção anual do sistema de microprodução Omniflow

Vida útil (anos)	Produção anual de energia estimada (kWh)	Vida útil (anos)	Produção anual de energia estimada (kWh)
1	9.460,80	14	8.657,75
2	9.396,47	15	8.598,88
3	9.332,57	16	8.540,41
4	9.269,11	17	8.482,33
5	9.206,08	18	8.424,65
6	9.143,48	19	8.367,36
7	9.081,30	20	8.310,47
8	9.019,55	21	8.253,95
9	8.958,22	22	8.197,83
10	8.897,30	23	8.142,08
11	8.836,80	24	8.086,72
12	8.776,71	25	8.031,73
13	8.717,03		

Após a produção anual de energia calculada, procede-se ao cálculo do valor da remuneração anual da energia produzida através da aplicação de tarifas.

5.4.3. Estudo económico do investimento

Como referido, o aerogerador é ligado à rede elétrica e pode vender a energia produzida à rede ou utilizá-la para consumo interno. No estudo económico, de acordo com o mercado eólico, admitem-se as seguintes tarifas para:

- Venda de energia à rede: 0,21€/kWh
- Consumo interno de energia: 0,12 €/kWh

Considera-se uma taxa de atualização do custo de eletricidade em 4% ao ano.

A produção de energia anual estimada e a aplicação das tarifas permite saber qual a poupança prevista em cada ano.

5.4.3.1. Venda de energia à rede

A Tabela 5.3 apresenta os valores referentes a poupança anual prevista de venda de energia à rede, aplicando a tarifa considerada de 0,21 €/kWh.

Tabela 5.3 – Poupança anual do sistema de microprodução Omniflow

Anos	Produção anual de energia estimada (kWh)	Valor da tarifa de energia (€/kWh)	Poupança anual estimada (€)	Poupança média mensal (€)
1	9.460,80	0,21	1.986,77	165,56
2	9.396,47	0,22	2.052,19	171,02
3	9.332,57	0,23	2.119,76	176,65
4	9.269,11	0,24	2.189,56	182,46
5	9.206,08	0,25	2.261,66	188,47
6	9.143,48	0,26	2.336,13	194,68
7	9.081,30	0,27	2.413,06	201,09
8	9.019,55	0,28	2.492,51	207,71
9	8.958,22	0,29	2.574,59	214,55
10	8.897,30	0,30	2.659,36	221,61
11	8.836,80	0,31	2.746,93	228,91
12	8.776,71	0,32	2.837,38	236,45
13	8.717,03	0,34	2.930,81	244,23
14	8.657,75	0,35	3.027,32	252,28
15	8.598,88	0,36	3.127,00	260,58
16	8.540,41	0,38	3.229,97	269,16
17	8.482,33	0,39	3.336,32	278,03
18	8.424,65	0,41	3.446,18	287,18
19	8.367,36	0,43	3.559,66	296,64
20	8.310,47	0,44	3.676,87	306,41
21	8.253,95	0,46	3.797,94	316,50
22	8.197,83	0,48	3.923,00	326,92
23	8.142,08	0,50	4.052,18	337,68
24	8.086,72	0,52	4.185,61	348,80
25	8.031,73	0,54	4.323,43	360,29

Sabendo que a turbina Omniflow tem um custo de 14 000,00 €, e admitindo um custo de instalação de 1 500,00 €, o investimento inicial é de 15 500,00 €.

Tendo em conta um investimento de 15 500,00 € e a poupança prevista em cada ano, estima-se que o retorno sobre o investimento (ROI) aconteça ao 8º ano de funcionamento, como se pode ver na seguinte tabela, Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Período de retorno do sistema de microprodução Omniflow

Ano	Retorno Financeiro (€)	Ano	Retorno Financeiro (€)
1	-13.513,23	13	16.100,72
2	-11.461,04	14	19.128,03
3	-9.341,28	15	22.255,03
4	-7.151,72	16	25.485,00
5	-4.890,06	17	28.821,32
6	-2.553,93	18	32.267,50
7	-140,87	19	35.827,16
8	2.351,64	20	39.504,02
9	4.926,23	21	43.301,97
10	7.585,59	22	47.224,96
11	10.332,52	23	51.277,14
12	13.169,91	24	55.462,75
		25	59.786,18

Na figura 5.4 é possível observar o saldo positivo a partir do 8º ano, relativo ao reembolso sobre o investimento inicial.

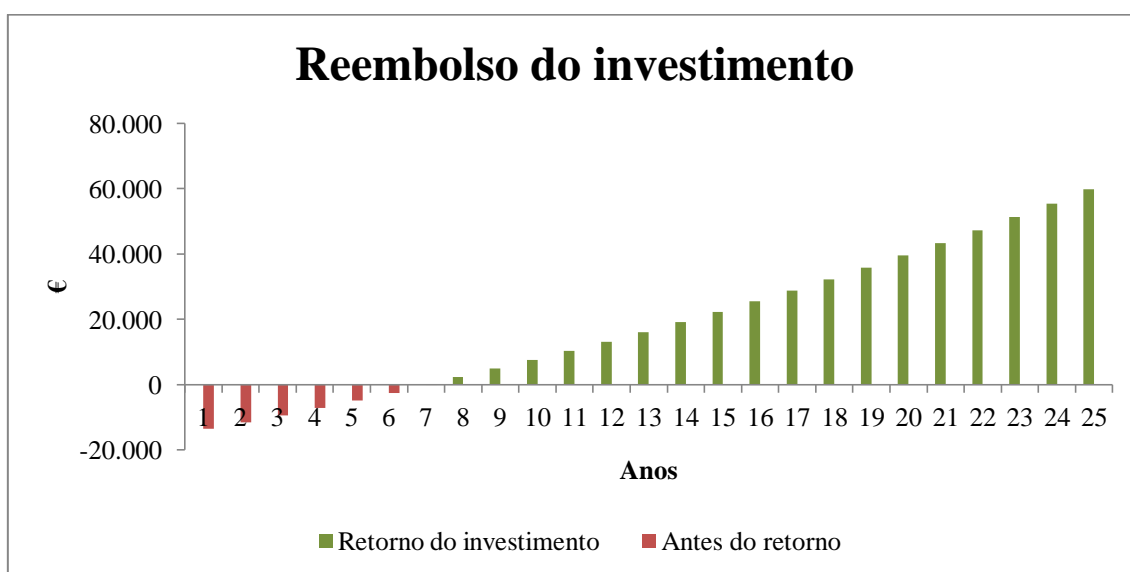


Figura 5.4 – Reembolso do investimento inicial para venda de energia à rede

5.4.3.2. Energia produzida para consumo interno

A tabela seguinte, Tabela 5.5, apresenta-se os valores referentes a poupança anual prevista do consumo interno de energia produzida, aplicando uma tarifa de 0,12 €/kWh.

Tabela 5.5 – Poupança anual do sistema de microprodução Omniflow

Ano	Produção anual de energia estimada (kWh)	Valor da tarifa de energia (€/kWh)	Poupança anual estimada (€)	Poupança média mensal (€)
1	9.460,80	0,12	1.135,30	94,61
2	9.396,47	0,12	1.172,68	97,72
3	9.332,57	0,13	1.211,29	100,94
4	9.269,11	0,13	1.251,18	104,26
5	9.206,08	0,14	1.292,38	107,70
6	9.143,48	0,15	1.334,93	111,24
7	9.081,30	0,15	1.378,89	114,91
8	9.019,55	0,16	1.424,29	118,69
9	8.958,22	0,16	1.471,19	122,60
10	8.897,30	0,17	1.519,64	126,64
11	8.836,80	0,18	1.569,67	130,81
12	8.776,71	0,18	1.621,36	135,11
13	8.717,03	0,19	1.674,75	139,56
14	8.657,75	0,20	1.729,90	144,16
15	8.598,88	0,21	1.786,86	148,90
16	8.540,41	0,22	1.845,69	153,81
17	8.482,33	0,22	1.906,47	158,87
18	8.424,65	0,23	1.969,25	164,10
19	8.367,36	0,24	2.034,09	169,51
20	8.310,47	0,25	2.101,07	175,09
21	8.253,95	0,26	2.170,25	180,85
22	8.197,83	0,27	2.241,71	186,81
23	8.142,08	0,28	2.315,53	192,96
24	8.086,72	0,30	2.391,77	199,31
25	8.031,73	0,31	2.470,53	205,88

Considerando o investimento inicial de 15 500,00 € e a poupança prevista em cada ano, estima-se que o retorno sobre o investimento (ROI) no consumo interno de energia aconteça ao 12º ano de funcionamento, como se pode ver na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Período de retorno do sistema de microprodução Omniflow

Ano	Retorno Financeiro (€)	Ano	Retorno Financeiro (€)
1	-14.364,70	13	2.557,55
2	-13.192,02	14	4.287,45
3	-11.980,73	15	6.074,30
4	-10.729,55	16	7.920,00
5	-9.437,18	17	9.826,47
6	-8.102,24	18	11.795,71
7	-6.723,35	19	13.829,80
8	-5.299,06	20	15.930,87
9	-3.827,87	21	18.101,12
10	-2.308,23	22	20.342,84
11	-738,56	23	22.658,37
12	882,80	24	25.050,14
		25	27.520,67

Na figura seguinte é possível observar o saldo positivo a partir do 12º ano, relativo ao reembolso sobre o investimento inicial.

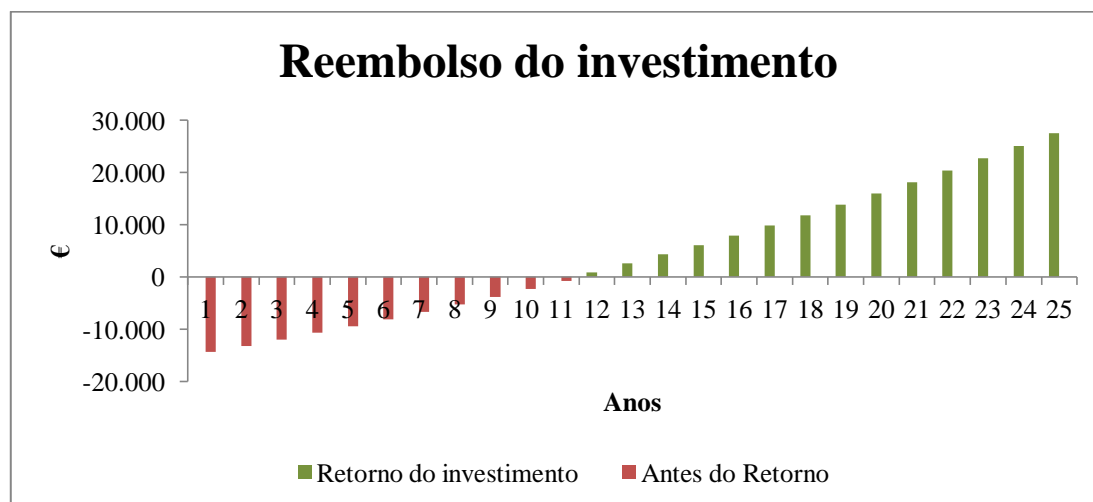


Figura 5.5 – Reembolso do investimento inicial para consumo interno de energia

5.4.4. Análise da viabilidade do projeto

Como referido ao longo deste capítulo, a análise económica de um sistema de produção de energia é fundamental para o estudo da viabilidade económica do projeto.

É necessário assegurar que existe potencial eólico suficiente num dado local para que a produção de energia de um sistema de microprodução eólica, nele instalado, seja rentável, e que seja possível o reembolso do investimento inicial, durante o tempo de vida útil do equipamento.

O projeto em estudo é interessante e economicamente viável na cidade de Lisboa, considerando as tarifas aplicadas.

Analisando os resultados obtidos, para a turbina Omniflow 3.8 com uma durabilidade de 25 anos, o tempo de recuperação do investimento para venda da energia produzida à rede é de 8 anos, sendo que este valor se encontra próximo dos valores esperados, fornecidos pela empresa Omniflow (Tabela 5.1), concluindo-se assim a validade dos resultados.

Para o consumo interno de energia, o período de retorno do investimento para a turbina Omniflow, com uma vida útil de 25 anos, acontece ao 12º ano de funcionamento. Este período é naturalmente superior ao obtido na venda de energia à rede, uma vez que a tarifa aplicada é inferior (0,12 €/kWh).

Verifica-se então que a tarifa aplicada para a venda de energia elétrica produzida à rede pública torna o projeto bastante mais atraente, com um tempo de reembolso do investimento inicial visivelmente inferior ao esperado no auto-consumo de energia.

Assim sendo, salienta-se que as tarifas aplicadas e definidas na Europa pelas entidades reguladoras do sector, são meios que podem contribuir para incentivar o investimento e evolução das novas tecnologias de microgeração eólica.

Os valores de produção são meramente estimativos, existindo a possibilidade de que a produção poderá ser superior ou inferior consoante as condições atmosféricas.

Refere-se ainda que o investimento na instalação de turbinas eólicas em meios urbanos tem riscos associados. Entre os quais destacam-se: a variabilidade do vento na cidade, sendo esta variável muito inconstante em zonas edificadas; as tarifas aplicadas sobre o custo da eletricidade produzida; e a taxa de atualização do investimento durante a vida útil do equipamento.

Capítulo 6

6. Conclusões

Na presente dissertação abordou-se o tema da geração de energia elétrica através da instalação de turbinas eólicas de pequenas dimensões em ambientes urbanos.

Os principais objetivos da dissertação visavam: apresentar uma breve descrição histórica sobre a evolução dos aerogeradores, caracterizar o potencial eólico para a instalação de aerogeradores urbanos na cidade de Lisboa, estudar em detalhe o processo de instalação de um sistema eólico urbano selecionado, efetuar o dimensionamento dessa instalação para um edifício e realizar estudo económico de modo a calcular o ROI do projeto.

Verificou-se que todos os objetivos deste trabalho foram cumpridos.

Apresentou-se uma descrição histórica da evolução dos aerogeradores, em geral, com foco na variante da captação de energia eólica através da instalação de aerogeradores urbanos em cidades e áreas edificadas, descrevendo detalhadamente a tecnologia e alguns sistemas existentes no mercado.

De modo a aferir o potencial eólico na cidade de Lisboa, caracterizou-se o regime de ventos na cidade de Lisboa, analisando os dados registados na estação meteorológica Lisboa (Instituto Dom Luiz), no período entre Janeiro de 2009 e Maio de 2013. Neste contexto realizou-se uma análise estatística das observações para determinar as propriedades médias, as distribuições e a variabilidade da velocidade e do rumo do vento na cidade, isto com o auxílio de programas computacionais dedicados. Este estudo permitiu concluir que a média de velocidades registadas na cidade de Lisboa, ao longo do ciclo de 5 anos de dados disponíveis, é compatível com a produção de energia elétrica através de micro-turbinas eólicas, e como tal a cidade de Lisboa tem potencial eólico urbano.

Foi apresentado um modelo de turbina eólica nacional recente no mercado da microgeração eólica (Omniflow), descreveram-se as suas componentes e os aspetos da sua instalação em edifício, e detalhou-se a componente de engenharia civil no que diz respeito a estruturas de fixação e de suporte. Apresentou-se o estudo efetuado para a instalação da turbina eólica

Omniflow num edifício, e apresentou-se a verificação da segurança, com base na regulamentação em vigor.

Face aos resultados obtidos, realizou-se uma análise técnico-económica do sistema eólico estudado, em duas opções: venda de energia à rede e consumo interno da energia produzida, analisando-se o desempenho do sistema de acordo com as características médias dos ventos na cidade de Lisboa.

Verificou-se que de acordo com as tarifas aplicadas sobre o custo de eletricidade produzida, o período de retorno sobre o investimento inicial na opção de venda de energia à rede pública (8 anos) é consideravelmente inferior comparativamente ao auto-consumo da energia produzida (12 anos).

O desenvolvimento da presente dissertação possibilitou aprofundar conhecimentos sobre energias renováveis, especialmente sobre a produção de energia eólica em meios urbanos, que me parece constituir um tema inovador e de elevado potencial.

Permitiu reforçar competências de pesquisa, nomeadamente sobre o estudo e caracterização da variabilidade climática numa cidade, com aplicação de programas computacionais de suporte, bem como sobre sistemas de geração eólica urbana.

Adicionalmente aplicou-se conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Civil, no que se refere à regulamentação para dimensionamento estrutural.

De salientar que foi possível realizar a análise da viabilidade económica de um projeto, neste caso aplicado à turbina eólica a instalar.

Relativamente a desenvolvimentos futuros, sugere-se que o modelo de estudo do regime de ventos em meio urbano seja melhorado, analisando resultados de simulações de alta resolução com modelos atmosféricos, a fim de caracterizar a variabilidade dos ventos locais de forma mais detalhada. Salienta-se a importância da simulação de alta resolução do escoamento atmosférico na cidade, verificando as alterações que o edificado provoca no comportamento aerodinâmico. Propõe-se ainda um estudo semelhante das características do vento, alargado a outras cidades e a diversos modelos de aerogeradores urbanos.

De futuro, interessará investir na produção de novas turbinas urbanas de elevado rendimento, de impacto visual reduzido, silenciosas e de elevada durabilidade.

A possibilidade de gerar energia a partir de fonte não poluente, permitirá reduzir custos e melhorar as condições ambientais das cidades, potenciando novas oportunidades de negócio.

7. Referências Bibliográficas

- [1] - Castro, R. (2009) - Energias Renováveis e Produção Descentralizada. Introdução à Energia Eólica. Universidade Técnica de Lisboa. Instituto Superior Técnico. 4ª Edição.
- [2] - Lopes, A. (2009) - Produção Eólica e Enquadramento Técnico-Económico em Portugal. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [3] - Maio, L. (2006) - Energias Renováveis.
(<http://www.minerva.uevora.pt/odimeteosol/energias.htm>, último acesso em 17/04/2013)
- [4] - DIRETIVA 2001/77/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 27 de Setembro de 2001, relativa à promoção da eletricidade produzida a partir de fontes de energia renováveis no mercado interno da eletricidade.
- [5] - DIRETIVA 2010/31/UE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios.
- [6] - Dias, C. (2009) - Estudo comparativo de diferentes materiais para a construção de torres eólicas. Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro.
- [7] - EWEA, The European Wind Energy Association (2013) - The European offshore wind industry - key trends and statistics 2012.
- [8] - Estanqueiro, A. & Simões, T - Aproveitamento de Eólica em ambiente urbano e construído. Artigo Renováveis Magazine, LNEG.
- [9] - EUROSTAT, News Release (2013) - EU27 energy dependence rate at 54% in 2011.
- [10] - ENER 2005 - Estudo do Panorama das Energias Renováveis na União Europeia e Sugestões para Portugal. Conferência sobre Energias Renováveis e Ambiente em Portugal. Figueira da Foz, Portugal.
- [11] - Comissão das Comunidades Europeias, Bruxelas, 19 Outubro 2006 - Plano de Acção para a Eficiência Energética: Concretizar o Potencial.
- [12] - Conselho da União Europeia, Bruxelas, 9 de Março 2007.
- [13] - Conselho da União Europeia, Bruxelas, 12 de Dezembro 2008.
- [14] - DIRETIVA 2009/28/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO, de 23 de Abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis.
- [15] - PNAER, Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis, ao abrigo da DIRECTIVA 2009/28/CE.
- [16] - Resolução do Conselho de Ministros, nº 29/2010. Estratégia Nacional para a Energia 2020.
- [17] - EUROSTAT, Statistics in focus 44/2012 - Renewable Energy. Analysis of the latest data on energy from renewable sources.

-
- [18] - Ferreira, J. & Martins, F. (2008) - Ventos de mudança. A Energia Eólica em Portugal. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas. Universidade Nova de Lisboa.
- [19] - REN, Redes Energéticas Nacionais (2012) - A Energia Eólica em Portugal 2011.
- [20] - Artigo EDP (2012) - EDP e parceiros inauguram a primeira plataforma eólica portuguesa offshore (<http://www.edp.pt/pt/media/noticias/2012/Pages/inauguracaoWindfloat.aspx>, último acesso em 08/06/2013)
- [21] - XIX Congresso da Ordem dos Engenheiros (2012) - Projeto WindFloat. Lisboa.
- [22] - Artigo Expresso (2012) – Portugal continua no top 10 mundial da energia eólica. (<http://expresso.sapo.pt/portugal-continua-no-top-10-mundial-da-energia-eolica=f761236>, último acesso em 30/04/2013)
- [23] - EWEA, The European Wind Energy Association (2013) - Wind in Power. 2012 European Statistics.
- [24] - Ruão, P. – Turbina Omniflow. op Sustentabilidade e Eficiência Energética, APFM e EDP, 23 de Abril de 2013.
- [25] - International Electrotechnical Commission, IEC 61400-2:2006 (E) - Wind Turbines, Part 2: Design requirements for small wind turbines. 2ª Edição.
- [26] - Artigo The Encyclopedir of Alternative Energy and Sustainable Living - Tip Speed Ratio (http://www.daviddarling.info/encyclopedia/T/AE_tip_speed_ratio.html, último acesso em 02/05/2013)
- [27] - Diaz, J. (2008) - Formation de promotores de renovables. Neo Energia.
- [28] - WWEA, World Wind Energy Association (2013) - 2013 Small Wind World Report Update.
- [29] - WWEA, World Wind Energy Association (2012) - 2012 Small Wind World Report
- [30] - Decreto-Lei nº 363/2007, de 2 de Novembro.
- [31] - Decreto-Lei nº 26/2010, de 30 de Março.
- [32] - Resolução do Conselho de Ministros, nº 54/2010.
- [33] - Decreto-Lei nº 118-A/2010, de 25 de Outubro.
- [34] - Renováveis na hora - Unidades de Microprodução (dados). (<http://www.renovaveisnagora.pt/web/srm/estatisticas1>, último acesso em 17/10/2013)
- [35] - Halsey, N. (2011) - Modeling the Twisted Savonius Wind Turbine Geometrically and Simplifying its Construction.
- [36] - Artigo Turbines info (2011) - Darrieus Wind Turbine. (<http://www.turbinesinfo.com/darrieus-wind-turbines/>, último acesso em 03/06/2013)
- [37] - DeCoste, J., Smith, A., White, D., Berkvens, D., & Crawford, J. - Starting Darrieus Wind Turbine. Dalhousie University, Department of Mechanical Engineering. Abril 2004.
- [38] - Ragheb, M. (2013) - Vertical Axis Wind Turbine.
- [39] - Artigo Reuk (2007) - Giromill Darrieus Wind Turbine. (<http://www.reuk.co.uk/Giromill-Darrieus-Wind-Turbines.htm>, último acesso em 02/06/2013)

-
- [40] - Artigo EnergyBeta - The future of wind power lies in the spirals of the helical wind turbine. (<http://www.energybeta.com/windpower/windmill/helical-wind-turbine/>, último acesso em 02/06/2013)
- [41] - Artigo Wind Turbines Now - Helical Wind Turbine. (<http://www.windturbinesnow.com/helical-wind-turbine.htm>, último acesso em 02/06/2013)
- [42] - EcoSources, Information Portal on Renewable Energy - Savonius Wind Turbine. (http://www.ecosources.info/en/topics/Savonius_vertical_axis_wind_turbine, último acesso em 02/06/2013)
- [43] - Artigo EnergyBeta - Generate Power with the Savonius Wind Turbine. (<http://www.energybeta.com/windpower/windmill/savonius-wind-turbine/>, último acesso em 03/06/2013)
- [44] - Turby, The wind turbine for the built-up environment.
- [45] - QuietRevolution Wind Turbine. Product Information. (<http://www.quietrevolution.com/>, último acesso em 10/06/2013)
- [46] - Artigo WikiEnergia - Mini-turbina eólica arranca sem ajuda de motor. (http://www.wikienergia.pt/~edp/index.php?title=Mini-turbina_e%C3%B3lica_arranca_sem_a_ajuda_de_motor, último acesso em 05/06/2013)
- [47] - Artigo The Future of Things - QuietRevolution Helical Wind Turbine. (<http://thefutureofthings.com/pod/163/quietrevolution-helical-wind-turbine.html>, último acesso em 26/09/2013)
- [48] - Artigo Applied Pshysics Inc - Wind Power Generators. (<http://www.appliedphysicsusa.com/Wind-Power-Generators.html>, último acesso em 10/05/2013)
- [49] - Artigo Power Turbine (2013) – Phillippe Starck Wind Turbine. (<http://turbineel.net/phillippe-starck-wind-turbine/>, último acesso em 19/06/2013)
- [50] - RevolutionAir Wind Turbine, Product Information. (<http://pramac.sasenergia.pt/>, último acesso em 20/06/2013)
- [51] - Artigo Jornal de Negócios (2011) - Omniflow - Honrar a energia limpa. (http://www.jornaldenegocios.pt/empresas/pme/detalhe/omniflow_honrar_a_energia_limpa.html, último acesso em 10/05/2013)
- [52] - Turbina Omniflow. (<http://omniflow.pt/>, último acesso em 21/10/2013)
- [53] - Artigo Sapo Notícias (2012) - Omniflow: Novo gerador eólico e solar otimiza energia. (http://boasnoticias.sapo.pt/noticias/Omniflow-Novo-gerador-e-e%C3%B3lico-e-solar-otimiza-energia_13273.html, último acesso em 10/05/2013)
- [54] - Artigo Portal Energia (2012) - Omniflow, tecnologia Portuguesa inovadora de microgeração solar e eólica. (<http://www.portal-energia.com/omniflow-tecnologia-portuguesa-inovadora-de-microgeracao-solar-e-eolica/>, último acesso em 10/05/2013)
- [55] - Omniflow – MicroGeneration System. Omniflow Specifications.
- [56] - Reportagem SIC: Lourenço Medeiros (2013). (<http://sicnoticias.sapo.pt/programas/futurohoje/2013/09/03/nova-forma-de-produzir-pequenas-quantidades-de-energia>, último acesso em 09/10/2013)

-
- [57] - Artigo INEGI (2013) – Aproveitamento da Energia Eólica em ambiente urbano para a geração de electricidade.
(http://www.inegi.up.pt/instituicao/noticias_detalhe.asp?ano=2013&idm=1&idsubm=9&id=32¬iciaid=684&LN, último acesso em 07/10/2013)
- [58] - Malta, C. (2009) - Estudo de séries temporais de Vento Utilizando Análises Estatísticas e Agrupamento de Dados. Rio de Janeiro, Brasil.
- [59] - WINEUR, Wind energy integration in the urban environment. Technology inventory report. Julho 2005.
- [60] - Jervell, J. (2008) - Estudo da influência das características do vento no desempenho de aerogeradores. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [61] - Rio, J. (2008) - Estimativas Preliminares do Potencial Eólico na Ausência de Dados de Vento Locais. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto.
- [62] - Fernandes, P (2005) - Caracterização de regimes de vento para aproveitamento energético. Faculdade de engenharia da Universidade do Porto.
- [63] - IPMA, Instituto Português do Mar e da Atmosfera.
(<http://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=ema.index.xml>, último acesso em 15/07/2013)
- [64] - Calculation of Wind Energy and Power.
(http://www.ocgi.okstate.edu/owpi/EducOutreach/Library/Lesson1_windenergycalc.pdf, último acesso em 24/06/2013)
- [65] - Baltazar, S. (2010) - Mapas bioclimáticos de Lisboa. Universidade de Lisboa. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território.
- [66] - Alcoforado, M., Lopes, A., Andrade, H., & Vasconcelos, J. (2005) - Orientações climáticas para o ordenamento em Lisboa. Centro de Estudo Geográficos. Área de Investigação de Geo-Ecologia. Universidade de Lisboa.
- [67] - Artigo Eletrónica - Energia Eólica.
(<http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/17/29/>, último acesso em 16/10/2013)
- [68] - NPower. The Royal Academy of Engineering - Wind turbine power calculations.
- [69] - Decreto-Lei nº 235/83, de 31 de Maio: Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA).
- [70] - Artigo EngenhariaCivil.com (2010) - Conceção de coberturas de edifícios.
(<http://www.engenhariacivil.com/concepcao-coberturas-edificios>, último acesso em 09/08/2013)
- [71] - Lopes, J. G. (1994) - Revestimento de Impermeabilização de Coberturas em Terraço. LNEC. Coleção: Informações Científicas Técnicas. Série: ITE 34. 7ª Edição.
- [72] - Coberturas de Edifícios - Capítulo 9: Coberturas Planas. Escolha Superior de Tecnologia de Tomar.
- [73] - Abohela, I., Hamza, N., & Dudek, S. (2012) - Roof Mounted Wind Turbines. Universidade de Newcastle.
- [74] - Abohela, I., Hamza, N., & Dudek, S. (2011) - Effect of roof shape on Energy Yield and Positioning of Roof Mounted Wind Turbines. Universidade de Newcastle.

-
- [75] - WINEUR, Wind energy integration in the urban environment. Urban Wind Turbine. Guidelines for Small Wind Turbines in the Built Environment (2007).
- [76] - Broneske, S. (2012) - Small Wind Turbines. Approach to assessing noise from smaller scale wind turbines.
- [77] - Mollasalehi, E., Sun, Q., & Wood, D. (2013) - Contribution of Small Wind Turbine Structural Vibration to Noise Emission. Universidade de Calgary.
- [78] - Rogers, A., Manwell, J., & Wright, S. (2006) - Wind Turbine Acoustic Noise. Universidade de Massachusetts.
- [79] - International Electrotechnical Commission, IEC 61400-11: Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
- [80] - Victorian Consumer Guide to Small Wind Turbine Generation (2010).
- [81] - Ragheb, M. (2011) – Optimal Rotor Tip Speed Ratio.
- [82] - Pardal, T. (2013) - Ruído Ocupacional. Tese de Mestrado. Instituto Politécnico de Setúbal.
- [83] - Bellhouse, G. (2004) - Low Frequency Noise And Infrasound From Wind Turbine Generators. Wellington, Nova Zelândia.
- [84] - Power Generation. Engenharia de Aplicações. Manual de aplicações para Grupos Geradores arrefecidos a água.
- [85] - Kusiak, A., & Zhang, Z. (2010) - Analysis of Wind Turbine Vibrations Based on SCADA Data.
- [86] - Silva, T. (2010) - Avaliação da transmissão de vibrações num edifício existente. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa.
- [87] - Artigo: Wind power Engineering and Development (2012) – Vibration Control for Turbines. (<http://www.windpowerengineering.com/featured/business-news-projects/vibration-control-for-turbines/>, último acesso em 03/10/2013)
- [88] - Lamancusa, J. (2002) - Vibration Isolation (Noise Control).
- [89] - Easyflex - Isolation Theory. (<http://www.easyflex.in/pdf/latest/Vibration%20Isolation%20Theory.pdf>, último acesso em 06/20/2013)
- [90] - Decreto-Lei nº 349-C/83, de 30 de Julho: Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-esforçado (REBAP).
- [91] - Reis, M., Oliveira, D., & Carvalho, P. - Estudo de Viabilidade Económica de Geradores Eólicos de Pequeno Porte no Modo Autónomo.
- [92] - Carmo, D. (2012) - Projeto de uma turbina eólica de eixo vertical para aplicação em meio urbano. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico.
- [93] - Pereira, I. (2011) - Condições de viabilidade da microgeração eólica em zonas urbanas. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [94] - Moreira, R. (2010) - Avaliação do potencial eólico em regime de microgeração. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [95] - Carbon Trust (2008) - Small-scale wind energy. Policy insights and practical guidance.

8. Anexos

ANEXO I

ANEXO II

