

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**Identificação do Potencial Renovável para Produção de
Electricidade na Perspectiva da Microgeração**

Teresa Maria Veloso Nunes Simões Esteves

**Doutoramento em Energia e Ambiente
Especialidade em Energia e Desenvolvimento Sustentável**

2015

Universidade de Lisboa
Faculdade de Ciências
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**Identificação do Potencial Renovável para Produção de
Electricidade na Perspectiva da Microgeração**

Teresa Maria Veloso Nunes Simões Esteves

**Tese orientada pelos Professores Doutores Ana Estanqueiro e Jorge Maia Alves
especialmente elaborada para a obtenção do grau de Doutor em Energia e Ambiente e
especialidade em Energia e Desenvolvimento Sustentável.**

2015

Aos meus filhos Carolina e Manuel, por me terem mostrado que a vida pode ser uma eterna novidade.

“Sinto-me nascido a cada momento para a eterna novidade do mundo.”

Fernando Pessoa

RESUMO

Nos últimos anos a preocupação das entidades governamentais com o aquecimento global conduziu ao lançamento de várias iniciativas europeias e nacionais visando a redução das emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera, bem como a redução da dependência em combustíveis fósseis. A preocupação em tornar mais eficiente o consumo de energia, tem conduzido nos últimos anos à procura de soluções alternativas para a geração de energia e à adopção de medidas com vista à sensibilização das sociedades para a utilização eficiente de recursos energéticos. Assim, surgiram nos anos mais recentes conceitos como, *Cidades Inteligentes* e *Cidades Sustentáveis*, os quais recorrem à utilização de sistemas de energias renováveis para produção de electricidade.

O desenvolvimento do conceito *Cidades Inteligentes* não foi, contudo, acompanhado do necessário desenvolvimento de metodologias de caracterização e quantificação do potencial energético dos recursos renováveis das cidades, por forma a promover uma boa gestão dos recursos existentes e o desenvolvimento sustentável urbano. Apesar da caracterização do potencial solar poder actualmente ser efectuada com ferramentas inseridas em plataformas de informação geográfica, a sua quantificação à escala da cidade num contexto de sustentabilidade energética, carece ainda de metodologias estruturadas.

A avaliação do potencial eólico urbano é um tema amplamente debatido entre os especialistas da área do vento urbano, tendo ainda um longo caminho a percorrer até se encontrar metodologias fiáveis e de utilização simples e pouco onerosa. Os custos associados à realização de campanhas experimentais do vento são elevados quando comparados com o custo das micro-turbinas eólicas, bem como o risco associado à sua instalação num local sem recurso energético suficiente para justificar o investimento.

Este trabalho apresenta metodologias de aplicação simples e pouco onerosas de caracterização do potencial renovável urbano para a instalação de sistemas de produção de electricidade. Estas metodologias foram aplicadas a dois casos de estudo, onde se avaliou e quantificou o potencial renovável. Neste trabalho, são apresentadas as metodologias, ferramentas desenvolvidas, e resultados obtidos para cada área urbana. Estas metodologias podem ser replicadas a outras áreas urbanas, constituindo uma contribuição para o planeamento de energias renováveis em áreas urbanas e construídas num contexto de *Cidades Inteligentes*.

Palavras Chave: Potencial eólico urbano, potencial solar fotovoltaico, microgeração, Sistemas de Informação Geográfica, Cidades Inteligentes, Planeamento

ABSTRACT

In recent years the concern of government entities with global warming originated several measures to reduce greenhouse gases emissions to the atmosphere and the dependence on fossil fuels. Also, the concern in reducing electricity consumption has led to the search for alternative solutions for energy generation and for measures to raise awareness in the societies for resources and power savings. In this context, concepts as Smart Cities and Sustainable Cities have emerged in the recent years, which naturally lead to the use of renewable energies systems for electricity production. However, it is necessary to develop methodologies for the characterization and quantification of the urban renewable potential in order to promote a suitable management of the existing resources and a sustainable urban development.

Although the characterization of solar potential can now be performed by using tools integrated in Geographic Information Systems, its quantification in a Smart Cities context still needs structured methodologies. The urban wind resource assessment is a widely debated topic among the researchers in areas that are dedicated to the study of the wind in such environments. This is a topic that still needs further discussion before reliable, simple and less costly methodologies are available. Costs associated with conducting wind measurements campaigns are high compared to the cost of wind turbines. In the same way, the risk associated with the installation of a wind turbine in a wrong location, is also high.

This thesis presents methodologies for simple and less expensive application that enable the characterization and quantification of the urban renewable potential for the installation of electricity production systems. These methodologies were applied to two case studies, which evaluated and quantified the renewable potential in the areas under study. Methodologies and tools are here presented, as well as the results obtained for each urban area. These methodologies may be replicated to other cities being a contribution to the planning of renewable energies in urban and built areas in a Smart Cities context.

Keywords: Urban wind potential, solar photovoltaic potential, microgeneration, Geographical Information Systems, Smart Cities, Planning

AGRADECIMENTOS

Durante estes anos em que a maior parte do meu tempo foi dedicado a este trabalho, gostaria de agradecer ao LNEG por ter proporcionado as condições para o seu desenvolvimento, em especial na aquisição de *software* e nos restantes meios que colocaram à minha disposição. Agradeço à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, pelos meios que colocaram à minha disposição.

Agradeço à Professora Doutora Ana Estanqueiro, não só pela disponibilidade demonstrada na orientação e acompanhamento dos trabalhos e pelas sugestões que possibilitaram a conclusão dos mesmos, mas também pela grande amizade e respeito sempre presentes neste 15 anos de colaboração com o LNEG.

Ao Professor Doutor Jorge Maia Alves pela disponibilidade e pelas sugestões que permitiram desbloquear alguns momentos de impasse, bem como pela amizade demonstrada ao longo destes anos de trabalho e orientação.

Ao Professor Doutor António Lopes por ter facilitado o contacto com a Câmara Municipal de Cascais para a instalação do sistema Lidar no edifício do Centro de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal, e pela disponibilização da informação cartográfica do concelho de Cascais. Para a Câmara Municipal de Cascais e para o Aeródromo de Tires vai também o meu agradecimento.

Ao Dr. Carlos Bernardes, Vice-Presidente da Câmara Municipal de Torres Vedras por ter disponibilizado o local e os meios para a instalação de uma estação de medida no topo do edifício dos Paços do Concelho.

Agradeço à equipa de Energia Eólica do LNEG, pelo bom ambiente de entreaajuda e companheirismo, Raquel Marujo, António Couto, Luís Rodrigues e Paulo Costa. Ao José Teixeira pela amizade e pela preciosa ajuda na realização das campanhas experimentais de medição do vento que tiveram lugar nos últimos anos e cujos dados foram aqui utilizados. Agradeço também aos colegas do LNEG, em especial aos do ex-DER pelo apoio e amizade. Agradeço à Paula Candeias e à Graça Gomes pelos bons momentos de descontração nas horas de almoço. Pelos desabafos nas fases menos boas e pela amizade sempre presente.

Agradeço à Ana Maria, Paula e à M^ª João, pela enorme amizade sempre presente há mais de 20 anos e sempre tão forte apesar da distância.

Agradeço a todos os meus irmãos, em especial ao André, pela inesgotável paciência que sempre teve com os meus filhos, nas férias escolares, nas idas à escola e sempre que precisei de um *“backup”* por falta de tempo. Agradeço ao meu pai e à Anabela por terem estado disponíveis para mim e para os meus filhos sempre que precisei.

Agradeço à minha mãe pela amizade, disponibilidade, paciência nas minhas más disposições, pelo amor incondicional e pelo respeito, qualidades que só a melhor mãe pode ter.

Ao Jorge, pelo amor, pela amizade, pela paciência, pelos fins-de-semana e férias que não teve e pelo companheirismo sempre presente, em especial porque sei o quão chata e insuportável posso ser. Ao Manuel e à Carolina, pelos abraços, pelos beijos, pelos desenhos, pelos *“adoro-te mãe”* e até pelos *“És má!”* que foram determinantes para a conclusão desta fase da minha vida. Com eles aprendi a relativizar a importância dos acontecimentos, e a valorizar cada momento da vida. Para eles vai ainda o meu pedido de desculpas por tê-los privado por tanto tempo da minha presença.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xv
LISTA DE ACRÓNIMOS	xxiii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento: Aproveitamento de recursos endógenos em cidades “inteligentes”	1
1.2 Desenvolvimento dos aproveitamentos energéticos em meio urbano	6
1.3 Planeamento do aproveitamento de recursos renováveis em ambiente urbano	19
2. A Meteorologia no Ambiente Urbano	23
2.1 Equações do Movimento na Atmosfera	23
2.2 Caracterização do potencial eólico e solar	35
2.2.1 O vento nas cidades.....	35
2.2.2 A radiação solar.....	47
2.3 Metodologias de avaliação de recursos renováveis	52
2.3.1 Potencial Eólico	52
2.3.2 Potencial solar fotovoltaico.....	58
3. Metodologia de Avaliação do Recurso Eólico e Solar numa Área Urbana	59
3.1 Avaliação do potencial eólico.....	60
3.1.1 Geração da superfície de cotas	62
3.1.2 Factores de correcção dos mapeamentos obtidos por aplicação do método desenvolvido64	
3.2 Avaliação do potencial solar	66
4. Planeamento do Aproveitamento de Recursos Renováveis em ambiente urbano: Aplicação a Casos de Estudo	69
4.1 Resultados da aplicação dos modelos de avaliação do potencial.....	70
4.1.1 Eólico	70
4.1.2 Solar fotovoltaico	93
4.2 Validação e discussão de resultados	96
4.2.1 Recurso eólico	96
4.2.2 Recurso solar.....	106
5. Identificação do Potencial Energético Urbano de Origem Renovável	113
5.1 Identificação do potencial urbano renovável.....	113
5.1.1 Quantificação do potencial eólico	113
5.1.2 Quantificação do potencial solar.....	115

5.1.3	Método de determinação do potencial renovável integrado	119
5.2	Aplicação da metodologia de planeamento a áreas urbanas	121
6.	Conclusões e Trabalho Futuro	135
	Referências	139
	ANEXO I – Algumas Equações Meteorológicas da Atmosfera	I-1
	ANEXO II – Parâmetros relevantes para o estudo do balanço energético numa área urbana	II-1
	ANEXO III – Cálculo dos parâmetros incluídos na ferramenta de análise da radiação solar do sistema de informação geográfica	III-1
	Anexo IV – Modelos CFD	IV-1
	Anexo V – Curva de potência da turbina de teste	V-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Capacidade de microgeração instalada e acumulada entre 2009 e 2014 [DGEG, 2013]	7
Figura 1.2a - Microgeração eólica ligada à rede eléctrica entre 2008 e 2014 [DGEG, 2013].	8
Figura 1.2b - Microgeração solar fotovoltaica ligada à rede eléctrica entre 2008 e 2014 [DGEG, 2013].	9
Figura 1.3 – (a) Atlas do potencial eólico para Portugal continental (H=80m) e	14
(b) adaptado à microgeração eólica (h=20m).	14
Figura 1.4 – Pagina de entrada da base de dados NUDAPT [NUDAPT, 2012].	15
Figura 1.5 – Vista 3D do sudoeste da cidade de Los Angeles, correspondente a uma área de 3km por 4 km. Os edifícios são classificados por cores de acordo com a altura e são sobrepostos ao mapa de ruas e a um “ortofotomapa” [Burian et al., 2002].	15
Figura 1.6 – (a) Edifício Solar XXI e (b) parque de estacionamento do edifício Solar XXI do Laboratório Nacional de Energia e Geologia I.P (LNEG).	16
Figura 1.7 – Página de entrada da base de dados PVGIS (http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/).	17
Figura 1.8 – Mapa de estações de radiação solar incluídas na base de dados ESRA (http://www.helioclim.org/esra/map.html).	17
Figura 1.9 – Mapa obtido da base de dados SoDa (http://www.soda-is.com/eng/map/europe_2004_dlr_en.html).	18
Figura 2.1 – Representação dos eixos coordenados (adaptado de [Simiu e Scanlan, 1986]).	27
Figura 2.2 – Espiral da velocidade do vento na camada limite atmosférica [Simiu e Scanlan, 1986].	29
Figura 2.3 – Representação da cascata de energia – a degradação dos vórtices turbulentos [Wallbank, 2008].	33
Figura 2.4 - Perfil da camada limite sobre uma zona urbana (adaptado de [Britter e Hanna, 2003]).	36
Figura 2.5 – Representação das forças de sustentação e arrastamento num corpo de forma arbitrária [Simiu e Scanlan, 1986].	41
Figura 2.6 – Representação das forças de sustentação e arrastamento num perfil alar (fonte: http://www.dreesecode.com/primer/airfoil3.html).	41
Figura 2.7 – Separação do escoamento e esteira em torno de um edifício de forma (a) cúbica e (b) rectangular [Simiu e Scanlan, 1986].	42
Figura 2.8 – (a) e (b) efeitos da turbulência, e (c) perfil vertical do vento em redor e no topo de um edifício de forma cúbica [Meroney, 1982].	43
Figura 2.9 Principais dimensões a considerar num conjunto de edifícios (baseado em [Zajic et al., 2011]).	44
Figura 2.10a – Regime de escoamento isolado (adaptado de [Zajic et al., 2011]).	45
Figura 2.10b – Regime de escoamento esteira de interferência (adaptado de [Zajic et al., 2011]).	45
Figura 2.10c – Regime de escoamento rasante (adaptado de [Zajic et al., 2011]).	45
Figura 2.11 – Escoamento sobre edifícios de alturas distintas [Zajic et al., 2011].	46
Figura 2.12 – Efeito da tridimensionalidade de um conjunto de edifícios na transição entre regimes de escoamento [Zajic et al., 2011]	46
Figura 2.13 – Distribuição da radiação com o comprimento de onda [Bullrich, 1982]	47

Figura 2.14 - Representação dos ângulos de zénite e de azimute que atingem a superfície terrestre (adaptado de [Bullrich, 1982]).	48
Figura 2.15 - Fluxo de radiação solar de pequeno comprimento de onda que incide na superfície da Terra [Bullrich, 1982].	50
Fig. 2.16 – Distribuição de Weibull para diversos valores de k e velocidade média igual a 8.0 m/s. [Manwell et al., 2002].	53
Fig. 2.17 – Distribuição da velocidade do vento e curva de potência de uma turbina.	54
Figura 3.1 – Excerto de mapa de orografia obtido por aplicação do método 1 numa área do concelho de Cascais.	63
Figura 3.2 – Excerto de mapa de orografia obtido por aplicação do método 2 numa zona da cidade de Torres Vedras.	64
Figura 3.3 – Esquema ilustrativo da metodologia de avaliação do potencial eólico de uma área urbana.	66
Figura 3.4 – Componentes da radiação solar.	67
Figura 4.1 - Localização dos pontos obtidos no atlas do potencial eólico de Portugal continental.	70
Figura 4.2 - Excerto da malha urbana sobreposta ao terreno (MDT-U) obtida com o SIG para o concelho de Cascais.	74
Figura 4.3 – MDT-U dentro da freguesia de Estoril	74
Figura 4.4 – MDT-U dentro da freguesia de São Domingos de Rana	75
Figura 4.5 - Limites das freguesias de (a) Estoril e (b) São Domingos de Rana e pontos Atlas e de experimentais inseridos nas áreas correspondentes.	75
Figura 4.6a - distribuição espacial da velocidade do vento na freguesia de Estoril para h=10m	76
Figura 4.6b - distribuição espacial do fluxo de potência incidente na freguesia de Estoril para h=10m	76
Figura 4.7a - Distribuição espacial da velocidade do vento na freguesia de São domingos de Rana para h=10m.	77
Figura 4.7b - Distribuição espacial do fluxo de potência incidente na freguesia de São domingos de Rana para h=10m.	77
Figura 4.8 Áreas de edifícios modeladas na freguesia de Estoril (a) área E1 (b) área E2 e (c) área E3.	78
Figura 4.9 Distribuição espacial da (a) velocidade do vento e (b) fluxo de potência incidente para h=10m acima da altura média dos edifícios da área E1.	79
Figura 4.10 Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para h=10m acima da altura média dos edifícios da área E2.	79
Figura 4.11 – distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para h=10 m acima da altura média dos edifícios na área E3.	79
Figura 4.12 Áreas de edifícios modeladas na freguesia de São Domingos de Rana (a) área SD1 e (b) área SD2.	80
Figura 4.13 – Distribuição da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para h=10 m acima da altura média dos edifícios na área SD1.	80
Figura 4.14 – Distribuição da (a) velocidade média do vento para e (b) fluxo de potência incidente para h=10 m acima da altura média dos edifícios na área SD2.	81
Figura 4.15a – Pontos de correcção do método na área E1 da freguesia de Estoril.	81
Figura 4.15b – Pontos de correcção do método na área E2 da freguesia de Estoril	82
Figura 4.16 – Pontos de correcção do método nas duas áreas da freguesia de São Domingos de Rana.	82
Figura 4.17 – Velocidade média nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos.	83

Figura 4.18 – Fluxo de potência incidente nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos. .85	85
Figura 4.19 – Distribuição espacial da (a) velocidade média e do (b) fluxo de potência incidente para h=10m na freguesia de Estoril, após aplicação dos factores de calibração.85	85
Figura 4.20 – Distribuição espacial da (a) velocidade média e do (b) fluxo de potência incidente para h=10m na freguesia de São Domingos de Rana, após aplicação dos factores de calibração.85	85
Figura 4.21 – representação do terreno numa parte da cidade de Torres Vedras e localização dos pontos obtidos no atlas de potencial eólico para Portugal continental.86	86
Figura 4.22 – Representação 3D do centro histórico da cidade de Torres Vedras.88	88
Figura 4.23 – Representação 3D da cidade de Torres Vedras obtida com base no método de interpolação “kriging”88	88
Figura 4.24 - distribuição espacial (a) da velocidade do vento e (b) do fluxo de potência incidente para h=10m na cidade de Torres Vedras.89	89
Figura 4.25 – (a) Zona 1 – Centro histórico da cidade de Torres Vedras e (b) Zona 2 – Área Sul da cidade de Torres Vedras89	89
Figura 4.26 Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para h=10m acima da altura média dos edifícios da área 1.....90	90
Figura 4.27 – Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para h=10m acima da altura média dos edifícios da área 2.....90	90
Figura 4.28 – Pontos de comparação nas áreas TVD1 e TVD2 da cidade de Torres Vedras.....91	91
Figura 4.29 - Velocidade média nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos.....92	92
Figura 4.30 – Fluxo de potência incidente nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos. .93	93
Figura 4.31 - Mapeamento da radiação solar global na freguesia de Estoril.93	93
Figura 4.32 - Mapeamento do número de horas de sol na freguesia de Estoril.....94	94
Figura 4.33 - Mapeamento da radiação solar global anual na freguesia de São Domingos de Rana.94	94
Figura 4.34 - Mapeamento do número de horas de sol na freguesia de São Domingos de Rana.94	94
Figura 4.35 - Mapeamento da radiação solar global anual no centro histórico da cidade de Torres Vedras.95	95
Figura 4.36 – Mapeamento do número de horas de sol anuais no centro histórico da cidade de Torres Vedras.....95	95
Figura 4.37 – Perfil vertical da velocidade do vento observado pelo LIDAR onde H se refere à altura acima do solo.97	97
Figura 4.38 - Perfis verticais do vento observados no LIDAR e obtidos pelo modelo CFD-TC onde H representa a altura acima do solo.....101	101
Figura 4.39 – Pontos seleccionados para validação dos mapeamentos obtidos para as freguesias de Estoril e São Domingos de Rana.106	106
Figura 4.40 – (a) Radiação global mensal medida em Torres Vedras no ano de 2010, (b) Radiação global anual medida em Torres Vedras no ano de 2010.....107	107
Figura 4.41 – Gráfico da irradiação média horária anual na cidade de Torres Vedras tendo como base os dados medidos e os dados obtidos na base de dados PVGIS.109	109
Figura 5.1 – Metodologia de cálculo do potencial eólico disponível de uma área urbana.116	116
Figura 5.2 – Fracção da irradiação disponível em função da fracção do espaço disponível ocupada, tendo em atenção os sombreamentos e a orientação dos painéis (linha a cheio) e admitindo que os painéis são dispostos na horizontal na área disponível (linha a tracejado) [Brito et al., 2012].116	116
Figura 5.3 – Metodologia de cálculo do potencial solar fotovoltaico disponível de uma área urbana....118	118

Figura 5.4 – Metodologia de identificação do potencial renovável integrado de uma área urbana.	121
Figura 5.5 – Quadro inicial do modelo desenvolvido para a identificação do potencial solar disponível.	122
Figura 5.6 - Áreas resultantes da aplicação das restrições ao mapeamento da velocidade do vento e do fluxo de potência incidente nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana.	123
Figura 5.7 – Capacidade a instalar em cada área disponível nas freguesias estudadas considerando a área mínima ocupada por uma turbina com 2.4 kW de potência nominal e 3.72 m de diâmetro.	124
Figura 5.8 – Zonas favoráveis à instalação de micro-turbinas nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana, representadas em valores de velocidade media do vento para a cota de 10m acima dos topos dos edifícios.	124
Figura 5.9 – Mapeamento da irradiação no topo dos edifícios nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana.	125
Figura 5.10 – Mapeamento da irradiação no topo dos edifícios nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana após aplicação da metodologia.	126
Figura 5.11 – Ampliação do mapeamento da insolação no topo dos edifícios na freguesia de São Domingos de Rana após aplicação da metodologia.	126
Figura 5.12 – Ampliação do mapeamento da irradiação no topo dos edifícios na freguesia de São Domingos de Rana após aplicação da metodologia.	127
Figura 5.13 – Áreas resultantes da aplicação da metodologia de identificação do potencial renovável integrado em ambas as freguesias.	127
Figura 5.14 – Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) do fluxo de potência incidente após aplicação dos factores de calibração.	128
Figura 5.15 – Distribuição espacial da radiação global anual nas coberturas dos edifícios do centro histórico da cidade de Torres Vedras.	129
Figura 5.16 – Edifícios com área de cobertura superior a 29 m ²	129
Figura 5.17 – Distribuição espacial da radiação global anual nos topos dos edifícios do centro histórico da cidade de Torres Vedras.	130
Figura 5.18 – Distribuição espacial do potencial solar fotovoltaico disponível no centro histórico da cidade de Torres Vedras.	131
Figura III.1 – Representação do processo de cálculo da linha de vista hemisférica.	III-1
Figura III.2 – Exemplo de um mapa de Sol.	III-2
Figura III.3 – Exemplo de mapa de Céu.	III-2
Figura III.4 – Exemplos de mapa de Sol e mapa de Céu sobrepostos a linha de vista.	III-3
Figura. IV.1 – Configuração “centro da célula” e vértice da célula” de volumes finitos para malhas estruturadas e não estruturadas.	IV-2
Figura V.1 – curva de potência da turbina de teste utilizada neste trabalho.	V-1

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constantes do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ [Lauder e Sharma, 1974] [Wallbank, 2008], ..	34
Tabela 2.2 – Constantes do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$ [Yakhot e Orszag, 1986].....	35
Tabela 2.3 – Valores de α de acordo com o tipo de terreno [Ray et al., 2006].....	38
Tabela 2.4 – Comprimento de rugosidade z_0 para vários tipos de superfícies.....	38
Tabela 2.5 – Intervalos de absorção para alguns constituintes da atmosfera [Bullrich, 1982].	50
Tabela 4.1 – Pontos utilizados no estudo e respectivas coordenadas.....	70
Tabela 4.2 – Parâmetros estatísticos do vento das séries sintéticas obtidas no Atlas.	71
Tabela 4.3a - Rosa de ventos e distribuição de Weibull.....	71
Tabela 4.3b - Rosa de ventos e distribuição de Weibull (cont.).....	72
Tabela 4.3c - Rosa de ventos e distribuição de Weibull (cont.).....	73
Tabela 4.4 – Velocidade do vento nos pontos seleccionados em cada zona em análise (h=10m).....	83
Tabela 4.5 - Desvios verificados em pontos de teste nas duas freguesias para o fluxo de potência incidente (h=10m).	84
Tabela 4.6 – parâmetros estatísticos do vento nos pontos obtidos no Atlas.....	86
Tabela 4.7 – rosas de ventos e distribuições de Weibull	87
Tabela 4.8 – valores de velocidade média obtidos por aplicação dos dois modelos em pontos de teste das áreas estudadas.	91
Tabela 4.9 – valores de fluxo de potência incidente obtidos por aplicação dos dois modelos em pontos de teste das áreas estudadas.	92
Tabela 4.10 – Parâmetros estatísticos do vento obtidos para h=20m pelo LIDAR (Junho 2012 a Fevereiro 2013 com variabilidade inter-intra anual da velocidade do vento).....	97
Tabela 4.11 - Rosa de ventos e distribuição de Weibull para h=20m obtidos pelo LIDAR.	97
Tabela 4.12 - Rosa de ventos e distribuição de Weibull para h=10m obtidos pela estação anemométrica de Tires.	98
Tabela 4.13 – Parâmetros estatísticos do vento obtidos para h=10m obtidos pela estação anemométrica de Tires.	98
Tabela 4.14 – Comparação entre os valores estimados de velocidade média do vento nos pontos de medida (P1-CPS e P9-TIR)e os modelos utilizados no estudo antes e depois da correcção dos mapas finais.	99
Tabela 4.15 – Comparação entre os valores estimados de fluxo de potência incidente nos pontos de medida e os modelos utilizados no estudo antes e depois da correcção dos mapas finais.....	99
Tabela 4.16 – Análise de erros obtidos entre o método do MDT-U e as observações nos pontos de medida para a velocidade média do vento.....	100
Tabela 4.17 – Análise de erros obtidos entre o método do MDT-U e as observações nos pontos de medida para o fluxo de potência incidente.	100
Tabela 4.18 – Distribuição de Weibull correspondente aos dados obtidos no Atlas (P1-CPS) e observados pelo LIDAR.....	102
Tabela 4.19 – Rosas de ventos correspondentes aos dados obtidos no Atlas (P1-CPS) e observados pelo LIDAR.	102

Tabela 4.20 – Distribuição de Weibull correspondente aos dados obtidos no Atlas (P9-TIR) e observados na estação anemométrica TIRES.	103
Tabela 4.21 – Rosas de ventos correspondentes aos dados obtidos no Atlas (P9-TIR) e observados na estação anemométrica TIRES.	103
Tabela 4.22 – Desvios verificados entre as séries sintéticas (P1-CPS e P9-TIR) e os observados nos pontos de medida (LIDAR e TIRES).	103
Tabela 4.23 – Distribuição de Weibull correspondente aos dados obtidos no Atlas (P9-TIR) e observados na estação anemométrica TIRES.	104
Tabela 4.24 – Análise de erros entre os pontos de validação e os pontos correspondentes obtidos pela ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica.	107
Tabela 4.25 – Desvios verificados entre os pontos de validação e os pontos correspondentes obtidos pela ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica.	107
Tabela 4.26 – Desvio verificado entre os pontos de medida e o ponto correspondente obtido pela ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica.	108
Tabela 4.27 – Valores de Radiação global medidos em Torres Vedras e obtidos para o mesmo local na base de dados PVGIS.....	109
Tabela 5.1 – Valores mínimos para o aproveitamento do potencial eólico disponível de uma área urbana considerando o rendimento médio de um sistema eólico de conversão de energia.	114
Tabela 5.2 Potencial eólico nas áreas em análise considerando uma turbina de 2.4kW.....	123
Tabela 5.3 Potencial solar fotovoltaico disponível nas áreas em análise de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5.1.2.....	125
Tabela 5.4 - Potencial renovável integrado nas freguesias em análise.....	128
Tabela 5.5 - Potencial solar fotovoltaico disponível nas áreas em análise de acordo com a metodologia definida no capítulo 5.1.2.	130
Tabela V.1 – Curva de potência da turbina de teste (2.4kW).....	V-1

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{a}	Vector aceleração (m/s^2)
a	Coefficiente de regressão utilizado para o cálculo do potencial renovável integrado (-)
A_d	Área da superfície ocupada pelo obstáculo (m^2)
A_E	Área ocupada pelos pontos com potencial eólico adequado (m^2)
A_{fin}	Área final a utilizar na estimativa do potencial solar PV (m^2)
A_f	Área frontal de um obstáculo exposto ao vento (m^2)
A_{minPV}	Área ocupada por um painel PV (m^2)
$A_{min-roof}$	Área mínima da cobertura de um edifício considerada para a instalação dos painéis fotovoltaicos (m^2)
A_{minWT}	Área mínima a considerar na instalação de uma turbina eólica (m^2)
A_{pol_i}	Área de cada polígono formado pelos pontos seleccionados (m^2)
A_{Sh}	Área estimada para a sombra produzida por uma turbina (m^2)
A_{SE}	Área ocupada pelos pontos onde ambas as tecnologias (eólica e solar PV) apresentam potencial adequado (m^2)
A_S	Área ocupada pelos pontos com potencial solar adequado (m^2)
A_{ShWT}	Área em sombreamento produzida pelo conjunto de turbinas a instalar na área A_{SE} (m^2)
A_{tot}	Área total ocupada pelos pontos que obedecem a todas as condições impostas (m^2)
b	Coefficiente de regressão utilizado para o cálculo do potencial renovável integrado (-)
B	Área de referência de um corpo (coeficientes de sustentação e arrastamento) (m^2)
c	velocidade da luz (m/s)
C_{calib}	Coefficiente de calibração aplicado à série de dados de velocidade do vento (-)
C_L	Coefficiente de sustentação (-)
C_D	Coefficiente de arrastamento (-)
C_p	coeficiente de pressão (-)

C_μ	Constante do modelo $k - \varepsilon$ e toma o valor 0.09 (0.7179 para o modelo RNG $k - \varepsilon$) (-)
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo $k - \varepsilon$ e toma o valor 1.44 (1.41 para o modelo RNG $k - \varepsilon$) (-)
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo $k - \varepsilon$ e toma o valor 1.92 (1.68 para o modelo RNG $k - \varepsilon$) (-)
d	Espessura da camada limite (número de Ekman) (m)
D	Diâmetro do modelo de turbina seleccionado (m)
e	Energia cinética turbulenta por unidade de massa (J/kg)
E_c	Energia cinética (J)
E_{ct}	Energia cinética turbulenta (J/kg)
E	Intensidade de radiação emitida por um corpo negro (W/m^2)
E_{WT}	Energia produzida pela turbina (Wh)
E_k	Número de Ekman (-)
E_{out}	Energia anual produzida por um sistema fotovoltaico (Wh)
\vec{f}	Forças de volume aplicadas a um fluido (N)
$f(\bar{u})$	Função de distribuição de Weibull (-)
F_1	Função da estabilidade para a Lei do arrastamento geostrófico, que toma o valor 1.8 para condições neutras (-)
F_2	Função da estabilidade para a Lei do arrastamento geostrófico, que toma o valor 4.5 para condições neutras (-)
F_L	Força de sustentação (N)
F_D	Força de arrastamento (N)
F_z	Força de atrito ou fricção vertical (N)
$F(\bar{u})$	Função de probabilidade acumulada de Weibull (-)
F_{corr_i}	Factor de correcção no ponto i (-)
F_{corr}	factor de correcção médio (-)
$F_{corr,edif}$	factor de correcção médio obtido para a área ocupada pelos edifícios (-)
$F_{corr,livre}$	factor de calibração obtido para a área livre de edifícios (-)
F_c	Factor de capacidade (-)
FPI	Fluxo de potência incidente (W/m^2)

FPI_i	Fluxo de potência incidente no ponto i (W/m^2)
$FPI_{i,rec}$	Fluxo de potência incidente no ponto i reclassificado (W/m^2)
G_o	Irradiância extraterrestre (W/m^2)
G_{b0}	Irradiância directa normal ao feixe solar (W/m^2)
$G_{bc}(\beta)$	Irradiância directa numa superfície inclinada para condições de céu limpo (W/m^2)
$G_{bc}(0)$	Irradiância directa numa superfície horizontal para a condição de céu limpo (W/m^2)
$G_{dc}(0)$	Irradiância difusa numa superfície horizontal (W/m^2)
$G_{rc}(\gamma_N)$	Irradiância reflectida pelo solo para condições de céu limpo (W/m^2)
$G(t)$	Irradiância solar (W/m^2)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
\bar{H}	Altura do topo dos edifícios (m)
H	Escala de profundidade (ou espessura) do movimento do fluido (m)
H_{Obst}	Altura do obstáculo que causa sombreamento (m)
H_{pv}	Irradiação solar anual (Wh/m^2)
h	Constante de Planck ($J.s$)
h_s	Ângulo horário solar (rad)
I_0	Constante solar fora da atmosfera à distância média solar (W/m^2)
Irr	Irradiação no ponto i (Wh/m^2)
k	Parâmetro de forma da distribuição de Weibull (-)
k_B	Constante de Boltzmann (J/K)
\vec{k}	Vector unitário vertical (para o cálculo do vento geostrófico) (-)
l	Escala de comprimento característica (nº de Reynolds) (m)
L	Latitude ($^\circ$)
L_f	Factor de iluminação que corrige a irradiância directa à medida que a superfície é iluminada ou sombreada (-)
L_T	Escala de comprimento (m)
L_{Sh}	Comprimento da sombra produzida por um obstáculo (m)
m	Massa (kg)

n	Direcção do vento do gradiente ($^{\circ}$)
n_G	Dia do ano no calendário Gregoriano (-)
N_1	Número de diâmetros considerado mínimo para espaçamento inter-turbina na direcção normal ao escoamento dominante (-)
N_2	Número de diâmetros considerado mínimo para espaçamento inter-turbina na direcção paralela ao escoamento dominante (-)
N_{WT}	Número de turbinas a instalar na área comum para o cálculo do potencial renovável integrado (-)
\bar{p}	Termo médio da pressão para o cálculo da turbulência (Pa)
p'	Flutuação da pressão para o cálculo da turbulência (Pa)
p_0	Pressão de referência (Pa)
P_k	Taxa de produção da energia cinética turbulenta (m^2/s^3)
$P_{WT}(u)$	Curva de potência da turbina eólica em função de u (W)
$Pot_{0,1}$	Grelha resultante do produto das grelhas de velocidade do vento e fluxo de potência incidente escrita em 0 e 1 (-)
Pot_{Eol}	Potencial eólico disponível da área estudada (W)
Pot_{disp}	Potencial disponível da área estudada (W)
$P_{dispE+S}$	Potencial disponível eólico e solar fotovoltaico (W)
P_{dispS}	Potência solar disponível tendo em conta o rendimento típico de um painel e do sistema (W)
Pot_{SolPV}	Potencial solar fotovoltaico disponível da área estudada (W)
Pot_{WT}	Potência nominal do modelo de turbina que serviu de referência ao estudo (W)
Pto_{disp}	Ponto disponível para a instalação de sistemas de energia renovável (-)
P_{nom_PV}	Potência nominal de um painel fotovoltaico (W)
P_{nom_E}	Potência nominal de uma turbina eólica de referência, respectivamente (W)
P_n	Potência nominal eólica de referência a instalar na área comum (W)
P_{PVsh}	Potencial solar PV em área de sombra (W)
r	Raio de curvatura das isóbaras (para o cálculo do vento do gradiente) (m)
R	Constante dos gases 2.87×10^2 J/Kg/K
Re	Número de Reynolds (-)
t	Tempo (s)

T	Escala de tempo (nº de Reynolds) (s)
$Temp$	Temperatura do corpo radiador (K)
T_{LK}	Factor de turbidez atmosférica de Linke (-)
T_n	Função de transmissão difusa (-)
$u(z)$	Velocidade horizontal (m/s)
u_*	Velocidade de atrito (m/s)
\vec{u}	Vector velocidade (m/s)
\bar{u}	Velocidade média do vento (m/s)
u'	Flutuação da velocidade para o cálculo da turbulência (m/s)
u	Velocidade característica do escoamento (nº de Reynolds) (m/s)
U	Valor médio da velocidade do vento de referência (m/s)
U_g	Componente de G (vento geostrófico) ao longo do eixo do x (m/s)
v_{calibA_i}	Velocidade média da série de dados de vento no ponto i obtida do Atlas do Potencial Eólico calibrada com a velocidade média no mesmo ponto do Atlas do Potencial Eólico para Microgeração (m/s)
v_{Atlas_i}	Velocidade obtida no Atlas do Potencial Eólico (m/s)
v_{Mg_i}	Velocidade média do vento no Atlas do Potencial Eólico para Microgeração (m/s)
v_{ref_i}	Velocidade média do vento obtida com o CFD para sólidos ou nos pontos de medida (m/s)
v_{model_i}	Velocidade média obtida com o método MDT-U para o ponto i da grelha de cálculo (m/s)
v_i	Velocidade do vento no ponto i (m/s)
$v_{i,rec}$	Velocidade do vento no ponto i reclassificada (m/s)
V_{gr}	Velocidade do vento do gradiente (m/s)
V_g	Componente de G (vento geostrófico) ao longo do eixo do y (m/s)
w	Velocidade vertical (m/s)
\vec{x}	Vector posição (m)
z	Altura acima do solo (m)
z_0	Comprimento de rugosidade (m)
z_d	Altura de deslocamento (m)

z_{g1}	Altura acima do solo (m)
z_{g2}	Altura acima do solo (m)
α	Ângulo de altitude solar (rad)
α_{pl}	Albedo planetário (-)
β	Ângulo entre a superfície inclinada e a horizontal (rad)
Γ	Gradiente adiabático (K/m)
$\Gamma(x)$	Função Gama (-)
$\delta_R(m)$	Espessura óptica de Rayleigh para a massa de ar m (m)
δ_{exp}	Ângulo de incidência solar medido entre a direcção do raio solar e a sua projecção numa superfície inclinada (rad)
δ_{ij}	Símbolo de Kroenecker (-)
δ_s	Declinação solar (rad)
ϵ	Factor de correcção para o cálculo da irradiância extraterrestre (-)
ε	Taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (m^2/s^3)
φ	Ângulo de azimute (rad)
ϕ	Função escalar (equação de Laplace) (-)
$\eta(t)$	Coefficiente de eficiência da conversão de energia (ou rendimento do painel fotovoltaico) (%)
η_e	Rendimento anual do painel fotovoltaico (%)
κ	Constante de Von Karman ≈ 0.4 (-)
λ_s	Constante que contribui para a determinação do coeficiente de dilatação da viscosidade (-)
λ_f	Densidade de área frontal (-)
λ_p	Densidade de área plana (-)
λ	Comprimento de onda da radiação solar (Angstrom) ou (μm)
μ	Coefficiente de viscosidade de corte (-)
μ_t	Viscosidade turbulenta (m^2/s)
θ_z	Ângulo de zénite (rad)
ρ	Massa volúmica do ar (kg/m^3)
$\vec{\sigma}$	Tensor de Cauchy (-)

σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2.K^4$)
σ_k	Constante do modelo $k - \varepsilon$ e toma o valor 0.1 (0.7179 para o modelo RNG $k - \varepsilon$) (-)
σ_ε	Constante do modelo $k - \varepsilon$ e toma o valor 1.3 (0.7179 para o modelo RNG $k - \varepsilon$) (-)
τ	Intervalo de tempo (nº de Reynolds) (s)
ν	Viscosidade cinemática (m^2/s)
Ω	Velocidade de rotação do fluido ($Rad\ s^{-1}$)

ANEXOS

a_w	Velocidade da onda (m/s)
$AnglnSky_{\theta,\alpha}$	Ângulo de incidência entre a superfície interceptante e um dado sector de céu (Solar Radiation Tool) (rad)
$Angln_{\theta,\alpha}$	Ângulo de incidência entre o sector de céu e a superfície interceptante (Solar Radiation Tool) (rad)
c_p	Calor específico ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$)
Dir_{tot}	Irradiação solar directa (Solar Radiation Tool) (Wh/m^2)
Dif_{tot}	Irradiação solar difusa (Solar Radiation Tool) (Wh/m^2)
$Dir_{\theta,\alpha}$	Irradiação solar directa em cada sector do mapa de sol (Solar Radiation Tool) (Wh/m^2)
$Difn_{\theta,\alpha}$	Radiação difusa para cada sector de céu (Solar Radiation Tool) (-)
Dur	Intervalo de tempo para análise (Solar Radiation Tool) (s)
Div_{azi}	Número de divisões azimutais no mapa de céu (Solar Radiation Tool) (-)
$Glob_{tot}$	Irradiação solar global (Solar Radiation Tool) (Wh/m^2)
J	Ponto de malha de cálculo (-)
$K \downarrow$	Radiação descendente e ascendente de pequeno comprimento de onda (W/m^2)
$K \uparrow$	Radiação ascendente de pequeno comprimento de onda (W/m^2)
L_E	Calor latente de vaporização (J/kg)
$m(\theta)$	Comprimento óptico relativo (Solar Radiation Tool) (m)
P_{dif}	Proporção do fluxo de radiação global normal que é difundido (Solar Radiation Tool) (-)

P	Potência (W)
Q^*	Irradiação líquida (net) (W/m ²)
Q_F	Emissão de calor artificial (W/m ²)
Q_H	Fluxo de calor sensível (W/m ²)
Q_E	Fluxo de calor latente (W/m ²)
Q_G	Armazenamento de calor (W/m ²)
Q_J	Termo fonte no ponto J do volume Ω_J (-)
R_d	Constante dos gases na presença de humidade (Joules/Kg/°)
R_{glb}	Irradiação global normal; (Solar Radiation Tool) Wh/m ²
S_{const}	Constante solar (Solar Radiation Tool) (Wh/m ²)
$SkyGap_{\theta,\alpha}$	Proporção de céu visível para o sector de céu (Solar Radiation Tool) (-)
$SunDur_{\theta,\alpha}$	Duração representada pelo sector de céu (Solar Radiation Tool) (h)
$SunGap_{\theta,\alpha}$	Fracção de abertura para o sector de mapa solar (Solar Radiation Tool) (-)
T_V	Temperatura virtual (K)
$u(x)$	Função em x (-)
U_J	Incógnitas no ponto de malha J (-)
$Weight_{\theta,\alpha}$	Proporção de radiação difusa originada num dado sector de céu relativo a todos os sectores (Solar Radiation Tool) (-).
α	Ângulo de azimute (rad)
α_a	Ângulo de azimute da superfície (rad)
β	Transmissividade da atmosfera (na direcção do zénite)
$\Delta\vec{S}$	Elemento de superfície (-)
Δt	Intervalo de tempo (s)
Δx	Distância percorrida (m)
σ_{CFL}	Condição CFL (-)
Ω_J	Elemento de volume (-)
θ	Ângulo de zénite (rad)
θ_z	Ângulo de zénite da superfície (rad)

LISTA DE ACRÓNIMOS

CAD	<i>Computational Added Design</i>
CE	Comissão Europeia
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CFD-TC	Modelo CFD desenvolvido para aplicações eólicas em terrenos complexos e muito complexos
CFD-U	Modelo CFD desenvolvido para aplicações eólicas em ambiente urbano
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CPS	Referente ao ponto do Atlas do Potencial Eólico no Centro de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal
DGEG	Direcção Geral de Energia e Geologia
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
ESRA	<i>European Solar Radiation Atlas</i>
EHD	<i>Energy Harvesting Devices</i>
FP7	7º Programa Quadro
IEE	<i>Intelligent Energy Europe</i>
I&DT	Investigação e Desenvolvimento Tecnológico
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MCP	<i>Measure-Correlate-Predict</i>
MDT-U	Modelo digital terreno incluindo a malha urbana
MDT	Modelo digital de Terreno
MM5	<i>Fifth Generation Mesoscale Model</i>
MOST	<i>Monin-Obukhov Similarity Theory</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NREAP	<i>National Renewable Energy Action Plan</i>
NUDAPT	<i>National Database with Access Portal Tool</i>
PDE	<i>Partial Differential Equations</i>
PNAER	Plano Nacional para as Energias Renováveis
PV	Fotovoltaico

PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System Database</i>
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier Stokes</i>
RCM	Resolução do Conselho de Ministros
SDR	São Domingos de Rana
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SETPlan	<i>Strategic Energy Technology Plan</i>
SoDa	<i>Solar Radiation Data</i>
SODAR	<i>Sonic Detection and Ranging</i>
TIR	Referente ao ponto do Atlas do Potencial Eólico no aeródromo de Tires
TVDCH	Referente ao ponto do Atlas do Potencial Eólico no centro histórico da cidade de Torres Vedras
TVDS	Referente ao ponto do Atlas do Potencial Eólico na zona Sul da cidade de Torres Vedras
WASP	<i>Wind Atlas Analysis and Application Program</i>
WINEUR	<i>Wind energy integration in the urban environment</i>
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento: Aproveitamento de recursos endógenos em cidades “inteligentes”

Nos últimos anos a União Europeia e os seus estados membros têm-se empenhado na identificação de soluções que permitam mitigar o impacto da conversão de energia para uso humano na Natureza e, simultaneamente, aumentar a garantia de abastecimento de energia ao espaço europeu. Neste contexto, a Comissão Europeia (CE) tem, simultaneamente promovido a produção de energia eléctrica por fontes renováveis e dado prioridade máxima a políticas relacionadas com a integração de medidas minimizadoras dos efeitos das alterações climáticas. Assim, foi decidido reduzir, até 2020 a emissão dos gases de efeito de estufa em pelo menos 20% face aos valores observados em 1990 e atingir um conjunto de objectivos ambiciosos tendentes a equilibrar o consumo com a subida da produção local [EC, 2012] [Gaiddon et al., 2009], que passam por reduzir o consumo energético em 20% através de melhoramentos na eficiência energética e introduzir 20% de fontes de energia renováveis (em relação a 1990), incluindo solar fotovoltaico, no consumo final de energia da União Europeia.

Recentemente, a União Europeia levou a cabo, no âmbito do *SETPlan - The European Strategic Energy Technology Plan*, [EU, 2010], e com o objectivo de acelerar e monitorizar o crescimento do sector das energias renováveis, estudos de caracterização da produção energética contemplando vários cenários futuros de penetração de renováveis nos diferentes estados membros (NREAP – National Renewable Energy Action Plan, [EC, 2009] sendo que, em todos eles, a quota de energias renováveis aumenta substancialmente até 2050, atingindo nesse ano, cerca de 55% da energia bruta final consumida. Neste contexto, em 2050 a percentagem de energia produzida por fontes renováveis em relação à energia bruta consumida, corresponderá a um aumento de 45% face ao verificado em 2011 (10%). Nesses trabalhos da Comissão Europeia prevê-se que a quota das energias renováveis no consumo de electricidade atinja em 2050 64% num cenário de elevada eficiência energética e 97% num cenário de elevada penetração de energias renováveis, no qual se inclui já o recurso a uma contribuição significativa de sistemas de armazenamento de electricidade, de forma a acomodar o fornecimento variável e dificilmente despachável de electricidade por via de fontes renováveis [EC, 2011].

De acordo com as Nações Unidas, hoje em dia metade da população mundial vive em cidades onde uma parte significativa da energia é consumida para aquecimento ou arrefecimento dos espaços habitacionais, transporte de bens essenciais e pessoas e alimentação de equipamentos utilitários eléctricos. O aumento da eficiência dos processos de produção e consumo de energia, com particular incidência nas cidades, bem como o uso generalizado de energias renováveis, são assim consideradas imprescindíveis para mitigar os efeitos do sector energético no aquecimento global.

As cidades consomem uma elevada quantidade de energia, exigindo para si mais de 75% da produção de energia eléctrica mundial e gerando cerca de 80% dos gases de efeito de estufa à escala global. Neste contexto, pode falar-se do conceito de Cidade *Inteligente*¹ que corresponde a uma comunidade com um desenvolvimento tecnológico médio, sustentável, confortável, atractiva e segura. O modelo de cidade sustentável é incentivado pela Comissão Europeia através do *SETPlan*. Assim, o conceito de Cidade *Inteligente* vem dar ao Homem uma nova perspectiva no modo de encarar e viver as cidades. A optimização dos recursos endógenos disponíveis, a utilização de novos recursos e também a realização de novos investimentos, aliada aos conceitos de reutilização e reciclagem de matérias-primas constituem as bases fundamentais para se atingir em pleno o modelo de Cidade *Inteligente*. Para tal, é ainda necessário desenvolver e implementar tecnologias de informação e

¹ Do Inglês *Smart Cities*

comunicação na gestão das cidades. Estas tecnologias podem ser integradas numa solução para o problema, considerando a gestão da electricidade, consumo de gás e água, sistemas de aquecimento e arrefecimento, segurança pública, resíduos e mobilidade/transportes [Lazaroiu e Roscia, 2012]. Desse modo, pode dizer-se que o desenvolvimento sustentável vai de encontro aos objectivos das Cidades *Inteligentes* e que, neste contexto, o progresso tecnológico é a base para uma redução eficaz do consumo de recursos energéticos [Batagan, 2011].

Batagan [2012] refere que as cidades que implementaram soluções inteligentes tiveram em vista o melhoramento da vida quotidiana dos seus habitantes. Neste contexto, desenvolveram várias iniciativas, entre as quais se podem salientar: o aumento da taxa de emprego em habitantes com idades compreendidas entre os 20 e os 64 anos; a aposta na investigação e no desenvolvimento científico e tecnológico; a redução das emissões de gases de efeito de estufa aumentando a quota de energias renováveis no consumo final de energia (e, assim, conseguindo uma maior eficiência energética global do sistema); o investimento na educação aliado ao reforço dos esforços para a promoção da inclusão social reduzindo assim a pobreza e o risco de pobreza, [Batagan, 2012].

De acordo com Caragliu [2011], o conceito de Cidades *Inteligentes* pode ser muito abrangente, focando desde os aspectos tecnológicos e económicos aos aspectos energéticos e sociais, e têm sido amplamente debatidos por vários autores. Batty et al. [2012] definem Cidade *Inteligente* como *uma cidade onde as tecnologias de informação e comunicação se unem com as infra-estruturas tradicionais, coordenadas e integradas por meio de tecnologias digitais de ponta*. Existem, no entanto, pontos comuns referidos pelos diversos autores na literatura e que se podem resumir da seguinte forma:

1. utilização de infra-estruturas em rede (serviços, habitação, lazer e tecnologias de informação e comunicação) para melhorar a eficiência política e económica das cidades, bem como permitir o desenvolvimento social, cultural e urbano [Hollands, 2008];
2. capacidade de atrair negócios que conduzam ao desenvolvimento urbano [Hollands, 2008].
3. esforço na inclusão social de residentes urbanos em serviços de oferta ao público;
4. atenção elevada ao papel do capital social e relacional no desenvolvimento urbano. *Uma cidade inteligente será aquela cuja comunidade aprendeu a aprender, a adaptar-se e a inovar* [Caragliu et al., 2011];
5. cidades onde a sustentabilidade social e ambiental constitui uma componente estratégica de relevo [Oliveira Panão et al., 2008], [Gomes et al., 2011] [Wiesmann et al., 2011].

Chourabi et al. [2012] referem que a construção de uma Cidade *Inteligente* *consiste na implementação de uma estratégia para mitigar os problemas provenientes do crescimento da população urbana e da rápida urbanização*.

Face aos pontos acima referidos, pode afirmar-se que uma Cidade *Inteligente* pode definir-se como aquela onde existe; economia *Inteligente*, ambiente *Inteligente*, população *Inteligente*, qualidade de vida (saber viver *Inteligente*) e governação/gestão *Inteligente*, sendo que existem actualmente diversas cidades europeias de média dimensão que podem já corresponder a esta definição [Caragliu et al., 2011], citando-se normalmente como exemplo, Luxemburgo (Luxemburgo), Montpellier (França) e Groningen (Holanda) [Giffinger, 2007]. O Programa IEE – *Intelligent Energy Europe*, veio incentivar e apoiar a implementação prática de soluções sustentáveis na Europa. Os seus objectivos deste programa passam, entre outros, pela troca de informação e conhecimento entre investigadores em sustentabilidade energética, promovendo a disseminação de soluções para o aumento da eficiência energética e da utilização de sistemas de energia renovável, visando entre outros objectivos a redução dos gases de efeito de estufa e a redução da factura energética [Lazaroiu e Roscia, 2012].

Em Portugal foram publicados nos últimos anos vários diplomas que estabelecem as estratégias nacionais para o desenvolvimento e implementação de energias renováveis, como é exemplo o Plano Nacional para as Energias Renováveis [EC, 2010] já mencionado e cuja particularidade passa pela identificação e integração de medidas concretas de avaliação da concretização das políticas energéticas, bem como recurso a medidas mitigadoras de desvios. Vários investigadores da área do planeamento urbano e do sector energético, têm apresentado modelos de gestão e optimização de recursos nas cidades com resultados e teorias de elevado interesse [Batagan, 2012], [Batagan, 2011], [Batty et al., 2012], [Hollands, 2008].

Zen e Bianchi [2011], identificaram um conjunto alargado de indicadores de sustentabilidade das cidades (26, no total) que consideram essenciais para que uma cidade possa ser considerada sustentável. Estes podem ainda ser classificados em cinco áreas – indicadores ambientais, económicos, sociais, territoriais e políticos. Estes autores desenvolveram uma metodologia de classificação da sustentabilidade de uma cidade, constituindo os resultados obtidos uma importante ferramenta de apoio à decisão para o desenvolvimento energético sustentável de uma cidade.

Dos trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos, vários focam questões como eficiência energética e integração de sistemas de energias renováveis para produção de electricidade. Batagan [2012] realizou o levantamento dos indicadores existentes e das medidas a serem tomadas na Roménia num contexto de Cidades *Inteligentes*. Entre as iniciativas mais relevantes para o cumprimento deste objectivo, a autora refere o uso de soluções eficientes para a produção de electricidade renovável (eólica e solar fotovoltaica), bem como a monitorização das emissões de dióxido de carbono. A autora conclui que a Roménia ainda está longe de se aproximar do modelo de Cidades *Inteligentes*, encontrando-se actualmente *numa fase de definição de estratégias para este efeito, e que para um crescimento inteligente e sustentável das cidades é importante promover uma utilização mais eficiente dos recursos, uma economia competitiva e baseada no conhecimento e na inovação*.

Pirisi et al. [2012], referem o desenvolvimento de “Dispositivos de Recolha de Energia” (*Energy Harvesting Devices – EHDs*) como veículo de aproveitamento dos recursos energéticos renováveis com vista à redução dos gases de efeito de estufa e conducentes ao desenvolvimento de Cidades *Inteligentes*. Este conceito é igualmente desenvolvido para o caso da Holanda por Agudelo-Vera et al. [2012]. Neste trabalho os autores desenvolveram um método para a estimativa do potencial existente no aproveitamento de águas e de energia nas cidades. No que diz respeito aos aproveitamentos energéticos, Agudelo-Vera et al. [2012] estudaram dois cenários distintos, num primeiro contemplaram a instalação de painéis fotovoltaicos em coberturas e fachadas de edifícios, bombas de calor (elementos “Peltier”) em metade das ruas e a instalação de cinco microturbinas. Com este cenário obtiveram uma poupança de energia eléctrica por via convencional na ordem de 98% devido ao uso de electricidade renovável e 28% por via da geração de aquecimento por via renovável. Num segundo cenário, assumem as mesmas características do primeiro mas, desta vez, utilizando a totalidade das ruas. Como principais conclusões, estes autores referem que com o segundo cenário é possível colmatar os consumos necessários e aumentar em cerca de 9% a geração de electricidade renovável. Para além disso, o recurso a fontes renováveis para a geração de calor permitiu uma poupança de energia da ordem de 55%.

Bellosio et al. [2011] realizaram um estudo de integração de sistemas de energia renovável numa zona urbana no âmbito do projecto europeu POLICITY (6 FP—Priority 6.1, Sustainable Energy Systems). Neste trabalho os autores estudaram a integração de sistemas fotovoltaicos em fachadas e coberturas de um bairro onde se incluíam edifícios de serviços e residenciais. Nestes, monitorizaram os consumos, e a geração de energia por fonte renovável e convencional. Concluem que a integração de sistemas de energias renováveis em zonas

urbanas é uma mais-valia para a qualidade de vida das cidades e para a redução da factura energética e, referem ainda, que a instalação de uma grande quantidade de sistemas de microgeração em situações nas quais a utilização final da energia produzida envolve diversos tipos de consumidores (e.g. domésticos e de serviços) deve ser cuidadosamente monitorizada para que haja uma utilização verdadeiramente eficiente da mesma.

A análise do estado de desenvolvimento do conceito de Cidades *Inteligentes* permite concluir que a integração de sistemas de energias renováveis de pequena ou média dimensão – normalmente denominadas fontes renováveis de micro ou minigeração - para a produção de electricidade nas zonas urbanas - constitui uma mais-valia para o aumento da qualidade de vida e para o desenvolvimento sustentável das cidades, sendo a existência de políticas incentivadoras destas tecnologias um factor determinante para o crescimento do número destes sistemas nas zonas urbanas, tal como também o é no desenvolvimento do próprio conceito de Cidade *Inteligente*.

Em Portugal, para impulsionar o recurso a energias renováveis na produção de electricidade, surge em 2007 legislação para regular a instalação de sistemas de microgeração por fontes de energia renováveis, tendo sido actualizada com diplomas publicados entre 2010 e 2014 (Dec-lei 363/2007 de 2 de Novembro [MEI, 2007], Dec. Lei 118A/2010 de 25 de Outubro [MEID, 2010], Portaria nº431/2012 de 31 de Dezembro [MEE, 2012] e Dec. Lei 153/2014 de 20 de Outubro [MAOTE, 2014]). Esta acção constituiu um passo importante para o desenvolvimento do sector da micro e minigeração de electricidade por fontes renováveis de energia em Portugal.

No contexto de Cidades *Inteligentes* e do seu incentivo ao recurso a sistemas de aproveitamento de energias renováveis de escala doméstica (vulgo microgeração), torna-se necessário desenvolver ferramentas de planeamento do desenvolvimento destes sistemas, que permitam a quantificação dos recursos renováveis mais relevantes à escala urbana. O presente trabalho pretende contribuir para a disseminação do conceito de Cidades *Inteligentes*, concretamente através do desenvolvimento e quantificação dos recursos renováveis mais relevantes para a produção de electricidade em ambiente urbano, i.e. os recurso eólico e solar (para aplicações fotovoltaicas).

Muito embora seja hoje possível avaliar o potencial solar através de metodologias integradas em ferramentas existentes em sistemas de informação geográfica, o mesmo já não acontece com a caracterização do potencial eólico em meio urbano. Este reveste-se de grande complexidade devido à presença de obstáculos (e estruturas) naturalmente existentes nas cidades e zonas construídas. A presença destes causa efeitos de separação do escoamento, induzindo a redução da velocidade do vento e o aumento da turbulência em redor dos edifícios. Por outro lado, os elevados custos envolvidos na realização de campanhas experimentais de medição dos parâmetros caracterizadores do vento constitui uma barreira importante ao desenvolvimento deste subsector da energia eólica. No entanto, e numa tentativa de contornar este problema, têm sido utilizadas outras fontes de dados para a caracterização do vento nestes ambientes, tais como, bases de dados da velocidade do vento e dados provenientes de atlas do potencial eólico regionais e/ou nacionais. Estas soluções são normalmente obtidas por aplicação de modelos de microescala – e.g. WASP (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) [Bowen e Mortensen, 1996], [Troen, 1990], [Mortensen et al., 2007] – em conjunto com resultados de modelos de mesoscala que, apesar da sua eventual validade pontual, não são adaptados a ambientes urbanos ou de acentuada complexidade orográfica. Em ambas as abordagens, e em especial no caso dos modelos de microescala, ocorre quase sempre uma sobrestimativa do potencial eólico nas zonas com edifícios [Li et al., 2010a]. Em vista do deficiente comportamento dos modelos de microescala (convencionais de escoamento potencial) e mesoscala em ambientes geomorfologicamente complexos, como as malhas urbanas, recentemente iniciou-se a aplicação de modelos computacionais de dinâmica

de fluídos (CFD) para a modelação do comportamento do escoamento atmosférico na envolvente de edifícios a estes espaços, o que, na actualidade constitui o estado da arte para o estudo de vento em cidades. Contudo, a aplicação destes modelos implica elevado custo computacional, principalmente quando se pretendem caracterizar áreas extensas (e.g. uma cidade inteira) devido, essencialmente, à complexidade da geometria exigida (elevado número de pontos que constituem a malha do domínio a simular) e obrigando à utilização de computadores com elevada capacidade de cálculo para a obtenção de resultados com a qualidade e a fiabilidade necessárias. Para além disso, a maioria das ofertas existentes no mercado dos CFDs são muito onerosas e, muito embora existam alguns modelos CFD disponíveis de forma gratuita, estes são, regra geral, de difícil utilização, dificultando assim o seu acesso ao utilizador menos experiente.

Actualmente, a existência de gabinetes de planeamento urbano na maioria dos municípios tem levado a que estas entidades manifestem interesse na integração de energias renováveis em diversas aplicações nos seus concelhos, em particular na que constitui o seu uso para consumo doméstico ou de serviços, para aquecimento e/ou arrefecimento, geração de electricidade para autoconsumo e para carregamento de veículos eléctricos. Para além disso, estas entidades têm, na maioria dos casos, a informação necessária aos estudos de caracterização do potencial renovável das cidades, como são exemplo a cartografia do terreno e as maquetes digitais das zonas urbanas.

Dado que o comportamento do escoamento atmosférico em ambiente urbano é normalmente caracterizado por fenómenos similares aos que se verificam em terrenos de elevada complexidade (separação e recirculação do escoamento, turbulência elevada, inversão do escoamento) e também porque a metodologia que se pretende desenvolver tem como objectivo adequar-se à identificação do potencial eólico numa área urbana num contexto de Cidades *Inteligentes*, com vista à sua utilização em planeamento urbano - e não ao estudo detalhado do escoamento atmosférico ao nível do edifício ou do bloco de edifícios - as características da metodologia a desenvolver passam pela simplicidade de aplicação a situações de orografia muito complexa e a não exigência de recursos computacionais sofisticados e onerosos. Para concretizar estes objectivos, a metodologia tem por base a geração de uma superfície de curvas de nível envolvendo os edifícios da área em análise, a qual é posteriormente tratada com se fosse um terreno com orografia muito complexa.

Assim, e muito embora a discretização utilizada em termos de malha de cálculo seja ligeiramente menos refinada do que as correntemente utilizadas em modelos CFD para ambientes urbanos (devido à extensão das áreas a simular) a precisão dos resultados obtidos é suficiente para os objectivos de planeamento energético urbano na escala que se pretende abranger. As ferramentas computacionais seleccionadas para este efeito, consistem num sistema de informação geográfica e dois modelos CFD desenvolvidos especificamente para o estudo da energia eólica.

Os dados de vento utilizados na aplicação da metodologia podem ser provenientes de dados experimentais (quando disponíveis) ou de um atlas de potencial eólico - e.g. o Atlas do Potencial Eólico de Portugal Continental [Costa et al., 2006a], [Costa et al., 2006b]. No presente caso, os dados do Atlas do Potencial Eólico de Portugal Continental foram adaptados à realidade urbana através de um procedimento de *calibração* que o adequou a aplicações de microgeração de electricidade por fontes de energia renováveis [Seabra, 2011].

No que respeita à avaliação do potencial solar, este trabalho incide especialmente na utilização de metodologias convencionais para a identificação do potencial solar de uma cidade com aplicação de ferramentas existentes em plataformas de informação geográfica. Neste caso, os dados de entrada referem-se ao mapa georreferenciado de curvas de nível com representação

dos edifícios que integram a área urbana a analisar, podendo ainda ser introduzida informação adicional, como é exemplo a contribuição das componentes directa e difusa da radiação solar.

O potencial renovável disponível é um tema que tem sido estudado ao longo dos últimos anos no sector das energias renováveis, essencialmente dirigido ao planeamento da instalação deste tipo de sistemas. Pode definir-se pela identificação da capacidade² passível de ser instalada numa dada região e que resulta da aplicação de um conjunto de condições e/ou restrições ao seu desenvolvimento – definição de valores mínimos de produção energética, restrições ambientais, distância à rede eléctrica, entre outras. A identificação do potencial renovável disponível pode ser efectuada recorrendo a um sistema de informação geográfica, com introdução dos mapeamentos obtidos por aplicação de ferramentas desenvolvidas para este efeito, sendo posteriormente estabelecidos limites mínimos aos aproveitamentos solar fotovoltaico e eólico de forma a identificar zonas com viabilidade energética para a instalação deste tipo de sistemas.

Neste caso, na metodologia desenvolvida faz-se uso de uma abordagem simplificada da malha urbana, de fácil acesso ao utilizador comum e recorrendo a plataformas informáticas disponíveis e/ou menos onerosas do que as habitualmente utilizadas no sector das energias renováveis (em especial na avaliação do potencial eólico). A metodologia é desenvolvida à custa da construção de uma superfície de cotas envolvendo os edifícios de uma zona urbana e o terreno circundante, a qual corresponde a um modelo digital de terreno “urbano” (MDT-U) de fácil implementação e que se adapta a zonas extensas, desde que seja possível obter informação geográfica e cartográfica da malha urbana com algum detalhe (e.g. informação sobre cotas de terreno e de edifícios, geometria de edifícios).

Assim, neste trabalho, e contribuindo para a maximização da utilização de recursos renováveis endógenos num contexto de Cidades *Inteligentes*, pretende-se desenvolver e apresentar metodologias de fácil implementação por utilizadores com conhecimentos suficientes na área das energias renováveis e na dinâmica computacional de fluidos, para que as mesmas possam ser aplicadas ao nível das entidades que se dedicam ao planeamento urbano e ao estudo da integração de energias renováveis para produção de electricidade em meio urbano, permitindo ainda identificar a dimensão da contribuição destas fontes renováveis endógenas.

1.2 Desenvolvimento dos aproveitamentos energéticos em meio urbano

A microgeração de electricidade por fontes de energia renovável pode ser definida pela produção de energia eléctrica por sistemas eólicos ou fotovoltaicos instalados em edifícios ou na sua envolvente. Este conceito pode igualmente ser atribuído à energia proveniente de edifícios, individualmente ou em pequenos grupos – calor ou electricidade. As tecnologias geradoras de energia que se incluem no conceito de microgeração correspondem igualmente sistemas combinados de calor e energia – CHP (*combined heat and power*)³, solar térmico, sistemas fotovoltaicos, *fuel cells*, e micro-sistemas hídricos.

Em contraste com os sistemas tradicionais de energia renovável (produção centralizada de energia, e.g. grande hídrica e eólica) as tecnologias de microgeração localizam-se próximo do consumidor de forma a permitir a sustentabilidade energética das suas habitações. Estima-se que exista um elevado potencial de utilização deste tipo de tecnologias de microgeração no ambiente urbano e construído, não apenas para satisfazer a procura de energia, mas também para auxiliar à redução de emissões de gases de efeito de estufa [Bahaj et al., 2007].

² Em aplicações de geração de energia eléctrica, o termo capacidade corresponde à potência nominal dos equipamentos e a sua unidade é o W.

³ Também denominados de sistemas de produção descentralizada ou cogeração. Referem-se à produção simultânea de calor e electricidade a partir de uma fonte de combustível, habitualmente, gás natural.

Num contexto de Cidades *Inteligentes* e de desenvolvimento sustentável, torna-se ainda necessária a existência de políticas incentivadoras à instalação de sistemas de produção de electricidade com origem em fontes renováveis. Nesta sequência, surgiu em Portugal nos últimos anos um novo quadro legislativo como forma de incentivar o desenvolvimento do mercado de microgeração de electricidade por fontes de energia renovável. Estes incidem especialmente na regulamentação da capacidade a instalar e no tarifário de venda da energia referente a cada tecnologia de produção.

Em 2007 surgiu o Dec. Lei 363/2007 de 2 de Novembro que regulamenta, pela primeira vez, de forma diferenciada a produção de electricidade por fontes de energia renovável, de acordo com a tecnologia, e vem impulsionar a instalação de sistemas de pequena dimensão, normalmente denominados “sistemas ou unidades de microgeração”. Este diploma estabelece dois regimes de remuneração de venda da energia – geral e bonificado – tendo como base a capacidade a instalar. No regime bonificado o limite situa-se nos 3.68 kW de capacidade e o regime geral tem como máximo 5.75 kW, independentemente do tipo de tecnologia a instalar. No que respeita ao tarifário de venda da energia, é estabelecida uma tarifa de referência correspondente à energia solar fotovoltaica, sendo as outras fontes de energia renovável afectadas de factores de redução em relação a esta última.

Em 2010, o Dec. Lei 118A/2010 de 25 de Outubro actualiza o Dec. Lei 363/2007 de 2 de Novembro introduzindo um limite anual de capacidade a instalar e altera o tarifário a aplicar. Com base neste Dec. Lei, a capacidade a instalar anualmente é alterada de 10MW para 25MW e o regime bonificado sofre alterações no seu limite de aplicabilidade e no tarifário de remuneração da energia vendida à rede eléctrica.

Na sequência da publicação dos diplomas legais referidos, verificou-se até 2011 um elevado crescimento na instalação de sistemas de energias renováveis de microgeração de electricidade, tendo-se verificado um decréscimo em 2012 e 2013, na sequência da alteração dos tarifários de venda da energia, como se pode ver pela figura 1.1.

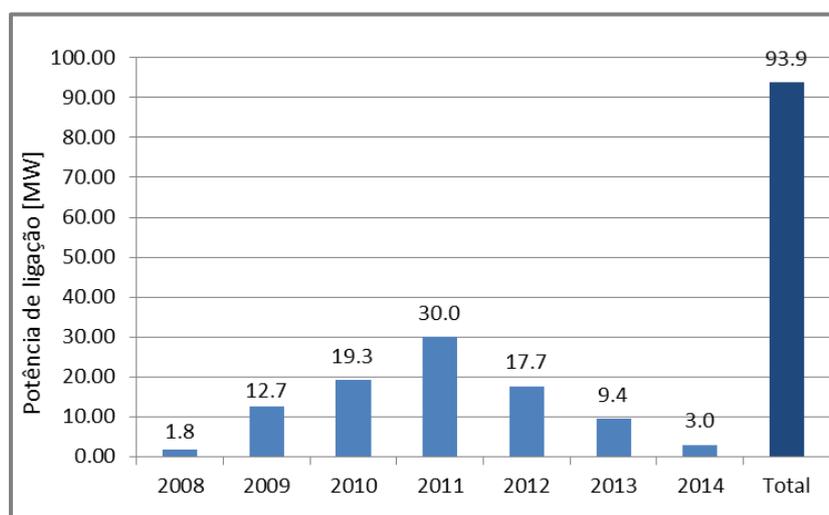


Figura 1.1 - Capacidade de microgeração instalada e acumulada entre 2009 e 2014⁴ [DGEG, 2014] .

Após a publicação do Dec. Lei 118A/2010 o tarifário aplicado em regime bonificado é válido por 8 anos, após ligação à rede eléctrica, e reduz-se gradualmente nos 7 anos seguintes até atingir a tarifa de mercado. A produção de energia eléctrica anual está limitada a 2.5MWh por cada kW instalado para as tecnologias solar e eólica. Assim, ao fim de 15 anos a remuneração assume valores de mercado (*net metering*). A remuneração referente à energia solar fotovoltaica corresponde a 100% da tarifa de referência no regime bonificado, enquanto a

⁴ Valores obtidos em 11 de Janeiro de 2015

tarifa aplicada aos sistemas de energia eólica passa, com este Dec. Lei, a ser 80% da tarifa de referência.

No final de 2012 é publicada a Portaria nº 431/2012 de 31 de Dezembro que estabelece para a microprodução de fonte solar com tecnologia fotovoltaica e com efeitos a partir de 2013, o valor da tarifa de referência de € 196/MWh, para o primeiro período de 8 anos e € 165/MWh, para o segundo período de 7 anos. Por outro lado, esta última portaria fixou ainda a quota anual de potência à actividade de microprodução fixando-a em 11 MW, a partir de 2013.

Em 26 de Dezembro de 2013, é publicado um despacho da DGEG [DGEG, 2013] e estabelece que o valor da tarifa de referência para todas as tecnologias de produção que não a solar fotovoltaica, em 2014, é de 218€/MWh durante o primeiro período de 8 anos e de 115€/MWh durante o segundo período de 7 anos. É ainda referido que, para o caso de unidades de microprodução que utilizem a tecnologia solar fotovoltaica, a tarifa de referência, em 2014, é de 66€/MWh durante o primeiro período de 8 anos e de 145€/MWh durante o segundo período de 7 anos. A quota de potência de ligação a alocar ao conjunto da actividade de microprodução é de 11.45 MW para o ano de 2014.

Em 20 de Outubro de 2014, foi publicado o Decreto-lei nº 153 que regulamenta a produção de electricidade por fontes renováveis e que vem substituir os anteriormente referidos neste documento, não se encontrando ainda em vigor à data de finalização deste documento.

Actualmente a maior parte dos sistemas de microgeração por fontes renováveis referem-se a sistemas solares fotovoltaicos, sendo seguidos pelos sistemas de energia eólica. As restantes energias renováveis são ainda, em 2013, pouco expressivas. Os gráficos apresentados na figura 1.2 apresentam a evolução da capacidade dos sistemas de energia eólica (a) e solar fotovoltaica (b) instalados entre 2008 e 2013.

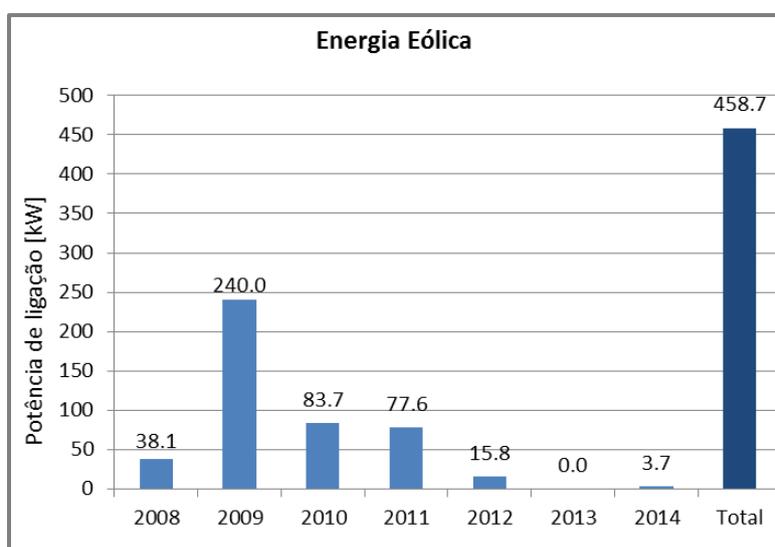


Figura 1.2a - Microgeração eólica ligada à rede eléctrica entre 2008 e 2014⁵ [DGEG, 2014].

Por análise dos gráficos da figura 1.2 pode concluir-se sobre a acentuada diferença existente entre a capacidade instalada referente às duas tecnologias de microgeração em análise. Esta diferença pode dever-se a duas situações, a primeira no que se refere ao custo de investimento das tecnologias, com a tecnologia solar fotovoltaica a verificar um decréscimo significativo nos últimos anos, e a segunda no que se refere às incertezas e dificuldades associadas à avaliação do recurso energético.

⁵ Valores obtidos em 11 de Janeiro de 2015

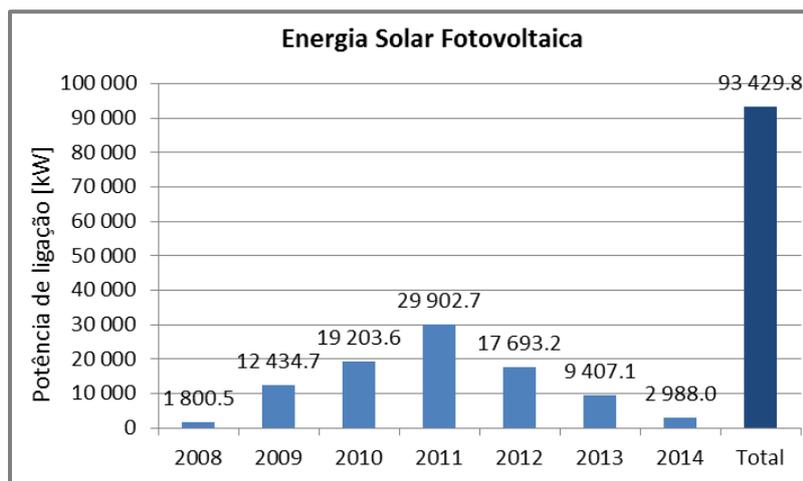


Figura 1.2b - Microgeração solar fotovoltaica ligada à rede eléctrica entre 2008 e 2014⁶ [DGEG, 2014].

A caracterização do recurso solar é, normalmente um processo menos complexo do que a caracterização do recurso eólico, sendo que este último apresenta valores mais reduzidos no interior das áreas urbanas devido às suas características de cobertura do solo – a rugosidade elevada constitui uma barreira importante ao escoamento atmosférico.

Microgeração Eólica

A microgeração eólica refere-se, de uma forma geral, à produção de energia eléctrica por turbinas de baixa potência nominal, normalmente denominadas de “microturbinas” e habitualmente instaladas em meios urbanos ou construídos. Tal como acontece com outras formas de energia renovável, as turbinas eólicas instaladas em meio urbano (em espaços relativamente livres ou em edifícios) podem produzir energia em quantidade suficiente para suprir as necessidades de energia eléctrica das populações e reduzir as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, desde que instaladas em locais com potencial eólico adequado.

No entanto, o crescimento da capacidade instalada referente a este tipo de sistemas eólicos enfrenta ainda algumas dificuldades, sendo uma das suas maiores barreiras a falta de métodos precisos para a caracterização do escoamento atmosférico em ambientes urbanos, eficazes e de baixo custo, [Millward-Hopkins et al., 2013].

A falta de regulamentação das turbinas eólicas de pequena dimensão, a emissão de ruído que ainda se verifica nalguns modelos comercialmente disponíveis e as vibrações provocadas nas estruturas de suporte e/ou nos locais onde se instalam (nos casos de integração de turbinas eólicas em edifícios) são alguns dos problemas associados ao desenvolvimento mais lento que se tem verificado neste sector da tecnologia eólica. No caso particular das emissões de ruído, Taylor et al. [2013], efectuaram medições num conjunto de locais próximos de habitações, bem como um questionário para perceber até que ponto os residentes sentiam o ruído emitido pelas microturbinas eólicas. Estes autores concluíram que muito embora alguns modelos emitam níveis de pressão sonora audíveis pela população vizinha das turbinas eólicas provocando sintomas de desconforto e perturbando a vida normal das mesmas, existe uma forte ligação entre a aceitação da presença de microturbinas localizadas na linha de vista das habitações e a sensibilidade manifestada pelos habitantes ao ruído emitido pelas mesmas. Pese embora o ruído possa ser um obstáculo à instalação de microturbinas é, no entanto, consensual entre os grupos de I&D que se dedicam a este sector, que a maior dificuldade na

⁶ Valores obtidos em 11 de Janeiro de 2015

disseminação da tecnologia das microturbinas reside na dificuldade em avaliar o potencial eólico a custos suportáveis pelos investidores domésticos.

O estudo do vento em ambiente urbano

O estudo do escoamento atmosférico em meio urbano tem assumido um papel importante nos últimos anos entre os investigadores devido à crescente sensibilização das populações para a redução dos gases potenciadores de efeito de estufa e para o aumento da eficiência energética num cenário de sustentabilidade. Os elevados custos da energia eléctrica que se têm verificado ao longo dos últimos anos, apresentam-se como um dos motivos para a procura de soluções sustentáveis do ponto de vista económico para fazer face aos consumos das famílias e do sector empresarial.

Os ambientes urbanos são naturalmente constituídos por elementos que influenciam de forma marcante o desenvolvimento do escoamento atmosférico e o microclima destes ambientes. Induzem elevada turbulência atmosférica e influenciam a dispersão e a deposição de poluentes da atmosfera. A ocorrência deste tipo de fenómenos e a necessidade de os estudar com maior precisão, impulsionou a comunidade científica para o estudo do escoamento atmosférico em ambiente urbano, quer para aplicações meteorológicas – clima urbano – quer para resolução de problemas relacionados com a dispersão de poluentes e/ou ventilação natural.

A falta de dados característicos do escoamento atmosférico em ambientes urbanos é um facto comum neste sector sendo apresentado por diversos autores o recurso a modelos CFD - *Computational Fluid Dynamics*, para colmatar esta lacuna. Da mesma forma, a utilização de medidas *in situ* para introdução em programas de simulação, enquanto condições iniciais ou fronteira é comum, muito embora seja frequentemente referido na bibliografia que esta prática pode conduzir a desvios significativos no mapeamento do potencial eólico de zonas urbanas devido à esparsa cobertura espacial dos pontos de medida existentes na maioria dos casos. É ainda comum o recurso a anemometria de ultra-sons considerada a mais adequada para a caracterização do recurso atmosférico e para efeitos de validação de resultados obtidos com CFD. Estas situações surgem no entanto na maioria das vezes inseridas em projectos de investigação financiados por programas nacionais e europeus, como é o caso do projecto WINEUR [Syngellakis et al., 2005], devido, principalmente, aos elevados custos destes sensores, bem como à necessidade de armazenamento das elevadas quantidades de dados medidos.

Muito embora muitos dos estudos publicados sobre o vento urbano, incidam nas áreas da ventilação natural, dispersão de poluentes e conforto pedestre, existem alguns dedicados ao aproveitamento energético do vento. Exemplos são os reportados por [Kalmikov et al., 2010], [Ledo et al., 2011], [Lackner et al., 2008], onde os dois primeiros grupos de autores apresentam métodos de avaliação do potencial eólico com recurso a modelos de dinâmica computacional de fluídos e o último grupo de autores recorre a métodos estatísticos do tipo *Measure-Correlate-Predict* (MCP) aplicados a dados obtidos por sensores de detecção remota (SODAR e LIDAR) para o mesmo fim.

Já no que respeita à identificação do potencial sustentável de áreas extensas (escala de cidade) ou regiões mais abrangentes (e.g. ao nível do distrito), a bibliografia consultada para a realização deste trabalho é parca nesta matéria. Nos parágrafos que se seguem apresenta-se um resumo dos aspectos mais importantes estudados na comunidade científica para caracterizar o escoamento atmosférico urbano, bem como as metodologias mais comuns nesta área para tratar este tema.

Modelos utilizados na caracterização do vento urbano

Os modelos de escoamento potencial existentes e habitualmente utilizados para o estudo energético do vento, não têm a capacidade de modelar o escoamento atmosférico em zonas com obstáculos de dimensões significativas e elevada ocupação do solo como é o caso das zonas urbanas. Exemplo deste tipo de modelos é o WAsP – *Wind Atlas Analysis and Application Program*, [Bowen e Mortensen, 1996], [Troen, 1990] [Mortensen et al., 2007]. Este modelo tem tido uma grande aceitação entre as entidades que se dedicam ao estudo da energia do vento e ao desenvolvimento de Parques Eólicos, tendo sido dos primeiros modelos a ser lançados no mercado com uma plataforma de fácil utilização. Como alternativa aos modelos lineares de escoamento potencial surgem os modelos numéricos baseados em metodologias de dinâmica computacional de fluídos – CFD – que conseguem resolver as equações de Navier-Stokes e assim, descrever de forma mais precisa o escoamento atmosférico em áreas urbanas.

Mesmo sabendo que o recurso a estes modelos acarreta elevados custos computacionais quando comparados com o uso de modelos simplificados, hoje em dia é possível recorrer a computadores convencionais para os utilizar. A aplicação das metodologias CFD à caracterização do recurso atmosférico passa pela resolução das equações de Navier-Stokes para o escoamento médio – RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) com recurso à parametrização da equação da turbulência como fecho das equações [Kalmikov et al., 2010].

No que respeita ainda aos modelos CFD, têm surgido no mercado diversas plataformas comerciais dedicadas à mais variada gama de aplicações e que se tornam de fácil utilização para quem inicia a sua actividade neste domínio. Por outro lado os CFD utilizados nos meios académicos e de investigação são habitualmente de utilização mais difícil mas permitem uma boa adaptação aos mais variados tipos de problemas permitindo ao utilizador experiente a introdução das variáveis e parametrizações adequadas ao seu problema. Assim, ao longo dos últimos anos o recurso a este tipo de modelos numéricos constitui o estado da arte no estudo do vento em ambiente urbano, muito embora, em grande parte, sejam aplicados a estudos relacionados com dispersão de poluentes [Chang e Meroney, 2003] [Xie e Castro, 2009] [Baik e Fernando, 2003] e ventilação natural [Jiang et al., 2003], [Wang e Chen, 2012]. Existem, no entanto, alguns trabalhos publicados onde este tipo de metodologias são aplicadas para a identificação de áreas adequadas à instalação de pequenas turbinas eólicas em ambientes urbanos, como em Martilli e Santiago [2009] onde os autores recorreram a modelos CFD para avaliar a energia do vento em ambiente urbano.

Os modelos CFD de escoamento atmosférico têm sido amplamente utilizados com geometrias simplificadas e têm-se obtido com eles resultados bastante encorajadores como se descreve em Coceal et al. [2006]. Neste caso, foram efectuadas simulações sobre uma área de edifícios de forma cúbica através de metodologias DNS (*Direct Numeric Simulation*). De acordo com os autores, os resultados são compatíveis com os obtidos em ensaios em túnel de vento, no que respeita a velocidade média do vento, turbulência e força de arrastamento. Como conclusão deste estudo, os autores referem que a estrutura do escoamento médio e a estrutura da turbulência dependem fortemente da configuração do conjunto de edifícios modelado (neste caso representados na forma de cubos). Da mesma forma, conclui-se que os efeitos de instabilidade assumem uma importância não desprezável na parte inferior da cobertura urbana (ao nível da altura média dos edifícios) onde as flutuações turbulentas são dominantes sobre o escoamento médio.

Da mesma forma, a aplicação de métodos LES (*Large Eddy Simulation*) tem sido frequentemente utilizada no estudo do escoamento em ambiente urbano em áreas com edifícios de forma cúbica, mas com menor incidência na avaliação do potencial eólico e estimativas de produção energética para microgeração de electricidade. De acordo com Xie e Castro [2009], a aplicação deste tipo de modelos apresenta resultados fiáveis ao nível das

escalas de quarteirão e de rua, mas acarreta elevados custos computacionais, sendo utilizados essencialmente, em estudos científicos.

Os modelos de turbulência (equações de fecho) mais utilizados são do tipo $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, sendo o primeiro igualmente utilizado na sua forma modificada [Yakhot e Orszag, 1986] [Wallbank, 2008]. Neste caso os parâmetros do modelo $k - \varepsilon$ são alterados de forma a aumentar a convergência do modelo. No entanto, alguns autores referem que para a caracterização da energia do vento em ambiente urbano, o modelo $k - \omega$ é o mais adequado, uma vez que $k - \varepsilon$ tende a sobrestimar a viscosidade turbulenta em situações de separação do escoamento [Ledo et al., 2011]. Detalhes sobre o modelo $k - \varepsilon$ podem encontrar-se no capítulo 2 desta dissertação. Os resultados das simulações numéricas por aplicação de metodologias CFD são normalmente validados através de simulações físicas à escala em túnel de vento [Yassin, 2009], [Beller, 2011], [Xie e Castro, 2009].

Apesar da sua popularidade entre os investigadores do escoamento atmosférico urbano, os modelos CFD apresentam dificuldades várias de aplicação para a obtenção de resultados fiáveis em ambiente real. A geração da malha de cálculo numérico é frequentemente difícil de realizar, em especial quando se tratam de situações que requerem modelação tridimensional, o mesmo acontecendo com a escolha apropriada e a introdução das condições iniciais e de fronteira dos domínios a estudar. Os custos computacionais são elevados, sendo esta modelação exigente, morosa e onerosa. Acresce ainda o facto de os resultados obtidos com este tipo de ferramentas computacionais apresentarem, frequentemente, problemas de convergência, muitas vezes motivados pela complexidade do problema e, conseqüentemente, da malha de cálculo associada. No que respeita à validação de resultados, é frequente recorrer-se a ensaios em túnel de vento, pese embora fosse desejável a utilização de medidas *in situ* dos parâmetros do vento.

À escala da cidade, os trabalhos mais referenciados na bibliografia disponível apresentam diversas abordagens para a avaliação do potencial eólico urbano. Em vários casos são referidas metodologias com recurso a modelação de mesoscala onde surge frequentemente o alerta para a sobrestimativa do potencial eólico. Neste particular, existem estudos realizados onde são referidas metodologias associando modelos de mesoscala a modelos CFD como é exemplo o realizado por Tewari et al. [2010], cujos resultados da modelação de mesoscala são introduzidos como condição fronteira em modelos numéricos de microescala – CFD, sendo, no entanto, quase sem excepção, usados em estudos de dispersão de poluentes. Este tipo de metodologias permite ainda a introdução de condições fronteira iniciais variáveis no tempo. De acordo com Baik e Kim [2009] os dados utilizados como condição fronteira nos modelos CFD (dados obtidos por radio sondagens e/ou campanhas experimentais) não contêm resolução espacial e temporal suficiente para descreverem de forma correta o escoamento atmosférico para este fim, podendo esta falha ser complementada com resultados obtidos a partir de modelação de mesoscala.

Os modelos de mesoscala mais utilizados e mencionados na literatura são o MM5 (Fifth Generation Mesoscale Model) [MM5, 2013], [Grell et al., 1995] desenvolvido pelo NCAR e o WRF (Weather Research and Forecasting), [Skamarock e Klemp, 2007], sendo na maioria dos casos, e em ambos os modelos, utilizados espaçamentos constantes entre pontos de grelha que variam entre 1000m e 3000m.

Para além da realização de campanhas experimentais de medição do vento, o recurso a ensaios em túnel de vento é a forma mais adequada e precisa de caracterizar o escoamento atmosférico numa zona urbana. Contudo, o acesso a túneis de vento de dimensão e características adequadas é por vezes difícil, e os custos associados à operação dos túneis e à construção de maquetes 3D nas escalas adequadas são elevados. Apesar dos elevados custos, são várias as metodologias apresentadas para a caracterização do escoamento atmosférico em

zonas urbanas com recurso à modelação física em túneis de vento [Bentham e Britter, 2003], [Macdonald, 2000].

As características do escoamento atmosférico em ambiente urbano

Nos últimos anos têm também surgido alguns trabalhos experimentais nesta área com recurso a sistemas LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Estes sensores, pela sua portabilidade, permitem efectuar medidas em diversos pontos de uma dada área urbana e assim medir a variabilidade espacial do vento médio na subcamada de rugosidade da área em análise. Da mesma forma, estes sensores, pelas suas características, têm a possibilidade de medir diversas variáveis a diferentes alturas, que podem ir na maioria dos modelos disponíveis até 200m acima do solo. Assim, é possível caracterizar o perfil vertical do vento num dado local com uma precisão relativamente elevada. Estas medições podem trazer valor acrescentado no estudo da estrutura da subcamada urbana tal como demonstram Gryning e Batchvarova [2009].

Outros métodos têm sido igualmente apresentados na comunidade científica com o objectivo de resolver o problema da falta de medições experimentais em ambiente urbano. Acosta e Djokic [2010], apresentaram um estudo com recurso à utilização de distribuições estatísticas da velocidade do vento para este fim. Os autores recorreram a um conjunto de séries de dados medidos em redor e no interior de zonas urbanas e procederam ao ajuste de distribuições de Rayleigh e de Weibull com o objectivo de estimar o potencial eólico de uma zona urbana – interior de uma cidade. Estas distribuições são obtidas através da obtenção do melhor ajuste recorrendo ao método da máxima verosimilhança. Como principal conclusão deste estudo, os autores referem a utilização da distribuição de Rayleigh (parâmetro de forma, $k=2$), como adequada a uma grande quantidade de situações alertando no entanto para a inadequação da sua utilização de forma generalizada. Por outro lado, o recurso à distribuição de Weibull, de acordo com os autores, permite efectuar uma avaliação adequada do potencial eólico e estimativa de produção energética de micro e mini turbinas eólicas, desde que a determinação dos parâmetros A e k (respectivamente, parâmetro de escala e parâmetro de forma), seja efectuada de forma precisa. É ainda de referir o recurso a dados provenientes de simulações de mesoscala. Em Portugal foi desenvolvido o Atlas do Potencial Eólico de Portugal continental [Costa et al., 2006a] obtido com recurso ao modelo numérico de mesoscala MM5 [MM5, 2013], que permite a obtenção de séries de vento (velocidade e direcção) para múltiplas utilizações na área da avaliação do potencial eólico. Este atlas foi obtido com uma discretização da malha de cálculo de 3x3km tendo posteriormente sido refinado com metodologias padrão (utilização de um modelo de microescala - WAsP) para 500x500m com vista ao mapeamento do potencial eólico de microgeração (figura 1.3).

Representação tridimensional dos elementos urbanos

São diversos os estudos publicados no que respeita a metodologias de caracterização do vento em zonas urbanas. No entanto, o factor comum à maior parte deles, é a lacuna existente entre a escala do edifício ou pequeno grupo de edifícios e a escala de cidade, 100 a 2000m [Bentham e Britter, 2003]. Já no que toca a estudos e/ou publicações referentes a grupos de edifícios onde área ocupada pelos mesmos é reduzida (da ordem das centenas de metros quadrados), o volume de trabalhos publicados é mais elevado, havendo, no entanto quase sempre como elemento comum, uma distribuição homogénea dos obstáculos, bem como geometrias simples e bem definidas. Numa perspectiva de avaliação do recurso eólico em meio urbano, uma das configurações de edifícios mais comum consiste na distribuição dos edifícios com espaçamentos iguais entre eles, e alinhados de forma homogénea. Noutros casos, surgem igualmente espaçados, mas desencontrados de linha para linha (*stagered*) ou considerando ambas as situações (alinhados e *stagered*) [Coceal et al., 2006] [Tutar e Oguz, 2007]. Existem

estudos que apresentam conjuntos de edifícios com definição da inclinação dos telhados, mas os casos mais frequentes, reportam-se a situações conceptuais com o objectivo de identificar os efeitos que a inclinação do telhado tem no escoamento atmosférico [Heath et al., 2007]. Um exemplo é o trabalho efectuado por Abohela et al. [2013] que estudaram diversas configurações de edifícios com recurso a modelação CFD com o objectivo de identificar o melhor local para colocar uma turbina eólica. Estes autores concluíram que a região de maior intensidade de turbulência se estende até cerca de $1.3H$ da base do telhado (na direcção dominante do vento), o que para qualquer configuração de telhado, uma turbina eólica deve ser instalada a uma altura igual ou superior a $1.3H$.

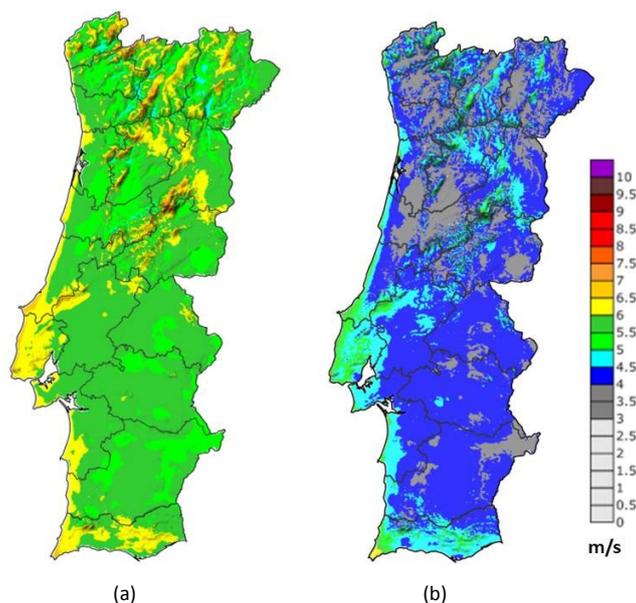


Figura 1.3 – (a) Atlas do potencial eólico para Portugal continental ($H=80m$) e (b) adaptado à microgeração eólica ($h=20m$).

Face ao exposto pode facilmente concluir-se que a representação tridimensional dos elementos constituintes de uma área urbana a modelar é fundamental para a obtenção de resultados precisos, em especial quando se trata de áreas de dimensão reduzida (da ordem das dezenas de metros). Esta representação é habitualmente feita com recurso a programas de desenho assistido por computador – CAD, ou semelhante – e encontra-se frequentemente incluída nas ferramentas comerciais disponíveis. Sempre que tal não acontece torna-se necessário recorrer a plataformas informáticas gráficas sendo esta habitualmente uma tarefa difícil especialmente quando se trata de geometrias com alguma complexidade. Por este motivo é frequente a representação dos elementos urbanos de forma simplificada – figuras geométricas 3D simples, como cubos ou paralelepípedos. Estas metodologias são de execução morosa quando se pretende representar áreas urbanas extensas. Neste caso, e quando a introdução da descrição do terreno é importante – cidades com elevada variabilidade de cotas de terreno – é comum a utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) como em [Kanda, 2009], tendo neste caso sido modeladas zonas de cidades reais.

Nos Estados Unidos da América é possível recorrer a bases de dados SIG com informação 2D e 3D da morfologia de algumas cidades. Como exemplo, existe o projecto NUDAPT – *National Urban Database with Access Portal Tool* (figura 1.4), com a participação de diversas entidades e financiado pelo governo dos Estados Unidos, o qual presta serviços ao público para a construção/caracterização morfológica de zonas urbanas com diversos níveis de detalhe [NUDAPT, 2012], bem como outros tipos de informação referentes às cidades – demografia, área urbana, indústria, etc. (e.g. figura 1.5) [Burian et al., 2002].

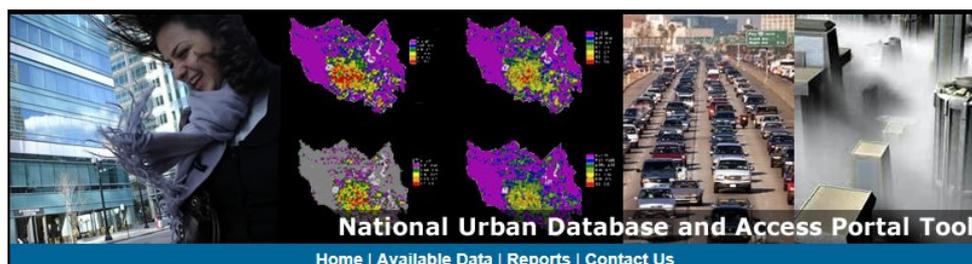


Figura 1.4 – Pagina de entrada da base de dados NUDAPT [NUDAPT, 2012].

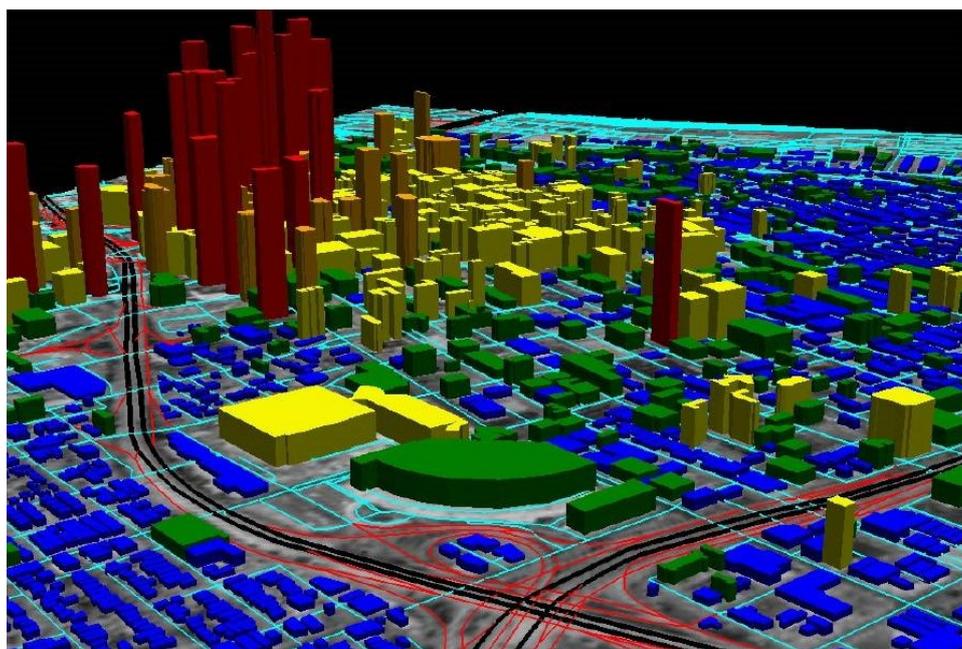


Figura 1.5 – Vista 3D do sudoeste da cidade de Los Angeles, correspondente a uma área de 3km por 4 km. Os edifícios são classificados por cores de acordo com a altura e são sobrepostos ao mapa de ruas e a um “ortofotomapa” [Burian et al., 2002].

Da mesma forma, o recurso a sensores LIDAR para a representação dos edifícios de uma dada área urbana, tem sido referido em diversos estudos direccionados para as zonas urbanas [Nguyen et al., 2012] [Brito et al., 2012] [Redweik et al., 2013]. Neste caso, muito embora os resultados sejam encorajadores, a representação dos edifícios com recurso a este tipo de sensores, é habitualmente grosseira (e.g. os edifícios surgem com as arestas arredondadas) o que implica, por vezes, imprecisões (ou erros) nos resultados obtidos na modelação. O complemento destes dados com informação existente nas câmaras municipais (plantas urbanas) pode reduzir os erros associados à utilização deste tipo de sensores na construção de modelos digitais de terreno para introdução em programas de modelação numérica.

O processamento de imagem surge também, frequentemente, como ferramenta para a representação de blocos de edifícios ou zonas urbanas mais extensas (>2000m) e posterior transformação para objecto 3D [Ribeiro et al., 2010].

Microgeração Solar

Existem actualmente diversos programas de trabalho visando impulsionar a energia fotovoltaica para um nível competitivo com outras energias renováveis como é exemplo a energia eólica. O SETPlan – *Strategic Energy Technology Plan* e a *European Solar Industrial Initiative*, constituem alguns dos exemplos de iniciativas com esta finalidade tendo como

objectivo a redução dos custos associados à tecnologia fotovoltaica e a transformação das oportunidades tecnológicas em realidades de negócio.

Neste contexto, na União Europeia, têm também surgido outras iniciativas visando o maior desenvolvimento da energia fotovoltaica, como são exemplo programas de financiamento europeus como o FP7 – sétimo programa quadro 2007-2013, IEE – Intelligent Energy Europe 2007-2013, e, a partir de 2014, o programa Horizonte 2020.

Do ponto de vista da avaliação do potencial solar, esta área das energias renováveis já atingiu o seu estado de maturidade. No entanto, a tecnologia e a penetração no mercado mundial ainda se mantém em evolução, em especial no caso português onde a capacidade instalada é ainda residual.

Da mesma forma, no que toca à tecnologia têm sido efectuados estudos no sentido de testar novos materiais para a concepção de células fotovoltaicas com o objectivo de tornar os sistemas mais práticos e menos onerosos para a utilização doméstica.

A energia solar fotovoltaica tem uma tecnologia que se afigura ideal para a utilização em ambientes urbanos, onde pode ser aplicada em terraços, coberturas e fachadas de edifícios para a produção de electricidade.

A electricidade gerada por esta via acarreta de uma forma geral custos mais elevados por kW instalado, do que a energia eléctrica convencional, mas os aumentos da capacidade de produção e os resultados obtidos na investigação e desenvolvimento tecnológico (I&DT) têm originado fortes reduções dos custos associados à tecnologia fotovoltaica, com o preço dos painéis solares fotovoltaicos a atingir recentemente os €0.49/Wp (0.66USD/Wp) [EnergyTrend, 2013].

De entre as energias renováveis para produção de electricidade, a solar fotovoltaica é a que tem maior potencial de longo termo e alguns peritos prevêem que num futuro a médio e longo prazo esta será a opção mais barata para a geração de electricidade, precisamente devido à redução dos custos de produção. Refere-se ainda o facto de esta tecnologia não comportar partes móveis (com excepção dos sistemas com seguidores) o que a torna silenciosa.

A energia solar fotovoltaica é também a que tem verificado maior número de aplicações como solução para a produção de electricidade em zonas urbanas. As coberturas ou fachadas oferecem uma enorme área de superfície inexplorada que pode ser ocupada com estes sistemas. A tecnologia fotovoltaica pode igualmente ser aproveitada como solução estética e funcional noutro tipo de aplicações como por exemplo sistemas de sombreamento dos edifícios ou como elemento visível de um conjunto de edifícios (figura 1.6).



(a)



(b)

Figura 1.6 – (a) Edifício Solar XXI e (b) parque de estacionamento do edifício Solar XXI do Laboratório Nacional de Energia e Geologia I.P (LNEG).

Actualmente, a instalação deste tipo de sistemas faz parte de iniciativas voluntárias decorrentes de condomínios ou proprietários individuais de edifícios, independentemente do tipo de edifício alvo; moradia, prédio, edifício público. No entanto, a quantidade de sistemas instalados está ainda longe de dar uma resposta visível no que respeita ao suprimento dos consumos de energia eléctrica de acordo com as metas definidas na directiva comunitária 2001/77/CE e promulgadas nacionalmente através das RCM 63/2003 e RCM 169/2005. Assim, torna-se premente a instalação de sistemas fotovoltaicos em larga escala para que a sua contribuição para as reduções de CO² no que respeita ao sector residencial assumam a expressão desejável.

Dados de radiação solar

Existem disponíveis dados de radiação solar, medidos e gerados para diversas plataformas de aplicação.



Figura 1.7 – Página de entrada da base de dados PVGIS (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>).

O acesso a este tipo de informação pode ser efectuado através de bases de dados *online*. Como exemplo existe a base de dados PVGIS [EC, 2013] que permite o acesso a dados de diversas fontes e com diferentes níveis de discretização temporal e espacial (figura 1.7).



Figura 1.8 – Mapa de estações de radiação solar incluídas na base de dados ESRA (<http://www.helioclim.org/esra/map.html>).

O *European Solar Radiation Atlas* [Helioclim, 2013] constitui outra fonte de informação de interesse para a obtenção de dados de radiação solar na Europa uma vez que contém dados, mapas de radiação solar global e algoritmos para o cálculo de parâmetros (figura 1.8).

O sítio da internet deste atlas integra ainda acesso ao SoDa – *Solar radiation Data, Energy Services for Professionals* [SoDa, 2013], plataforma que integra bases de dados de radiação solar gratuitas e serviços vários (figura 1.9).

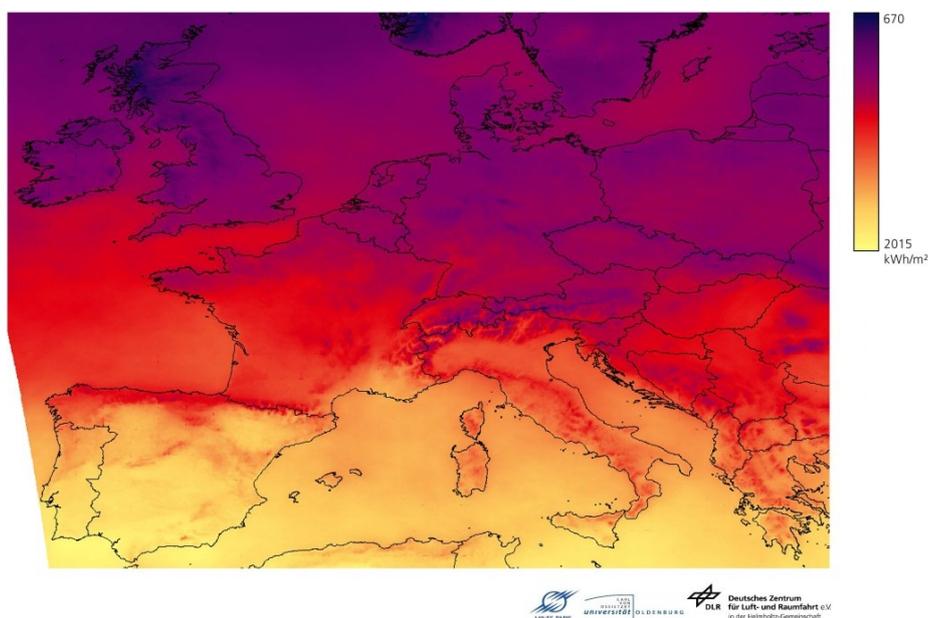


Figura 1.9 – Mapa obtido da base de dados SoDa (http://www.soda-is.com/eng/map/europe_2004_dlr_en.html).

Em Portugal há a referir a base de dados incluída no programa SolTerm, [Aguiar et al., 2010] gerados à custa de modelos desenvolvidos no LNEG.

Modelos de radiação solar

A modelação espacial da radiação solar nos últimos anos tem sido efectuada com base em dois grandes grupos de modelos espaciais. Os que recorrem a medidas da radiação solar *in situ*, a dados obtidos por satélite ou dados obtidos por modelação numérica [Monteiro et al., 2013], e os que recorrem a considerações astrofísicas, atmosféricas e geométricas [Montero et al., 2009].

Nos últimos anos têm sido publicados diversos trabalhos na área do recurso solar fotovoltaico e em especial na identificação do potencial fotovoltaico ao nível das cidades. Neste contexto, são diversos os autores que recorrem e/ou desenvolvem modelos para integração em sistemas de informação geográfica. Estes sistemas são utilizados com frequência uma vez que permitem a obtenção de estimativas da radiação solar sobre áreas extensas tendo em conta a inclinação da superfície, orientação e sombreamentos, de forma rápida e precisa. Hofierka e Suri [2002] desenvolveram o modelo *r.sun* para integração num sistema de informação geográfica – GRASS GIS [GRASS DT], e que tem a capacidade de calcular as três componentes da radiação (directa, difusa e reflectida) para céu limpo e nublado. Este modelo necessita apenas como dados de entrada de um modelo digital de terreno e do dia do ano. Contém um conjunto de outros parâmetros (e.g. albedo) que assumem valores padrão sempre que o utilizador não os introduz. De acordo com os autores, este modelo é apropriado para mapear a radiação solar em áreas extensas e com terrenos complexos, uma vez que os parâmetros solares podem ser introduzidos em formato *raster* (grelha de pontos). Este modelo, à data do seu desenvolvimento, tinha a vantagem de conter código aberto para facilitar a introdução de

melhoramentos e alterações diversas, sendo também este utilizado para estimar a radiação solar obtida na base de dados PVGIS.

Da mesma forma Hofierka e Kanuk [2009] recorreram mais uma vez ao modelo *r.sun* para estimar a radiação solar num ambiente urbano usando um sistema de informação geográfica para representar os edifícios de uma cidade. Neste caso a produção de energia eléctrica foi também determinada com recurso a um sistema de informação geográfica de forma a avaliar a relação entre os consumos e a produção energética. Neste caso as fachadas não foram contabilizadas.

O recurso a imagens de satélite para mapear as zonas urbanas no que respeita à caracterização e distribuição dos seus elementos tem sido igualmente utilizada. Jo e Otanicar [2011] desenvolveram uma metodologia para a integração de sistemas de energia solar nos topos de edifícios. Para tal recorreram a imagens de satélite para obter a geometria do tecido urbano incluindo a caracterização dos telhados (orientação, nº de águas e inclinação) e a um sistema de informação geográfica. Para a estimativa de produção energética recorreram ao programa informático RETScreen [Natural Resources, 2013]. Apesar de se considerarem bons os resultados obtidos, os autores apontaram algumas falhas a resolver na metodologia desenvolvida, tais como imprecisões na sobreposição das camadas de informação do sistema de informação geográfica e das imagens de satélite bem como a utilização de uma tecnologia específica o que impede a sua generalização a outras áreas geográficas com tipologias do edificado, distintas da estudada no seu trabalho.

Ainda na linha dos sistemas de informação geográfica, mais modelos foram desenvolvidos para integração nestes sistemas. São exemplo o SolarFlux para o ArcInfo [Dubayah e Rich, 1995], [Hethrick et al., 1993] e o *Solei* para o IDRISI GIS.

Outro exemplo é o *Solar Analyst* [Fu e Rich, 2000] desenvolvido inicialmente como extensão ao programa ArcView da ESRI e que actualmente integra a extensão *Spatial Analyst* da versão completa do sistema de informação geográfica ArcInfo da ESRI [ESRI, 2010]. Este modelo será apresentado mais adiante neste trabalho uma vez que será utilizado para o mapeamento da radiação solar nos casos de estudo a apresentar.

O cálculo dos sombreamentos constitui um dos maiores problemas referidos pelos investigadores nesta área, em especial quando se trata de áreas densamente urbanizadas e/ou terrenos complexos. Montero et al. [2009] estudaram este tema e desenvolveram um método para modelar o terreno de forma a introduzir melhoramentos no cálculo de sombreamentos do modelo *r.sun*. Para tal criaram um modelo numérico tendo como base malhas de cálculo 2D adaptativas com elementos triangulares. Como dados de entrada utilizaram a localização geográfica, topografia, albedo e dados observados. Como vantagem do desenvolvimento deste modelo, os autores referem, essencialmente, ter sido conseguido reduzir o tempo de simulação.

1.3 Planeamento do aproveitamento de recursos renováveis em ambiente urbano

O recurso a sistemas de informação geográfica (SIG) para o estudo das energias renováveis tem sido frequente, quer para efeitos de planeamento quer para a implementação de ferramentas capazes de manusear e processar elevados volumes de informação. Exemplo desta aplicação é o recurso a estas plataformas para a construção de modelos digitais de terreno para estudos de potencial eólico e/ou solar, ou de planeamento do ordenamento do território (e.g. arquivo dos dados dos Planos Directores Municipais a nível camarário).

O planeamento dos aproveitamentos energéticos por fontes renováveis apresenta um elevado número de condicionantes ao seu desenvolvimento, o que implica o manuseamento de um vasto conjunto de mapas e tabelas de dados, a qual se apresenta, frequentemente, em

formatos variados e georreferenciada em distintos sistemas de coordenadas, ou mesmo, sem georreferenciação atribuída. A possibilidade de introdução e manuseamento dos mais variados tipos de informação num leque alargado de formatos e de sistemas de georreferenciação, faz dos sistemas de informação geográfica ferramentas valiosas e poderosas para o planeamento de aproveitamentos de energias renováveis em macroscale.

Na última década a comunidade científica no sector das energias renováveis tem tido a capacidade de aproveitar as potencialidades disponíveis nestas plataformas para desenvolver trabalhos nesta área. Dagdougui et al. [2011] utilizaram um sistema de informação geográfica para identificar locais favoráveis ao aproveitamento eólico e solar com vista à produção de hidrogénio. Charabi e Gastil [2011], efetuaram um estudo para a identificação de locais adequados à instalação de sistemas fotovoltaicos. [Simões et al., 2008] desenvolveram uma metodologia para a identificação do potencial eólico sustentável, a qual foi já aplicada ao caso Português e está em aplicação para o planeamento do desenvolvimento do sector eólico na Venezuela. Este trabalho teve em conta o potencial eólico disponível na região em análise (território continental Português) e um conjunto de condições e restrições a ter em conta no desenvolvimento de parques eólicos (e.g. restrições ambientais, rede eléctrica nacional, declive do terreno, ocupação/uso do solo, entre outras). A metodologia desenvolvida nesse trabalho permite uma aplicação a diferentes áreas geográficas, constituindo, actualmente, uma valiosa ferramenta de planeamento para este Laboratório.

Os sistemas de informação geográfica têm ainda sido utilizados como ferramenta de apoio à decisão sobre que tipo de tecnologia renovável a utilizar numa dada região. Estes sistemas têm a capacidade de efectuar operações sobre grelhas de pontos, tais como álgebra de mapas, cálculo de distâncias, aplicação de funções, áreas de influência/acção, entre outras. Amador e Domínguez [2005] realizaram um estudo para identificação de tecnologias a instalar (fotovoltaica, híbrido fotovoltaica-eólica, eólica-diesel) em diversas áreas da província de Múrcia em Espanha. Estes autores recorreram a um sistema de informação geográfica onde introduziram um variado conjunto de informação – densidade demográfica, potencial eólico, potencial solar – e determinaram o parâmetro económico LCOE (*Levelized cost of energy*) de forma a poder definir a melhor tecnologia a instalar na área em análise.

Existem nesta data algumas ferramentas de planeamento e tomada de decisão desenvolvidas em ambiente SIG, sendo de referir o trabalho GISA Sol 1.0 de Tiba et al. [2010]. Estes autores desenvolveram uma ferramenta de informação geográfica para planeamento da instalação de energias renováveis dando especial incidência à tecnologia solar, contendo um vasto conjunto de informação mapeada e georeferenciada que permite a realização de análises espaciais para planeamento ao nível macro-espacial – regiões e/ou países, e micro-espacial – concelhos e/ou cidades. A metodologia desenvolvida permite o planeamento de sistemas de energia renovável e a gestão de sistemas já instalados e distribuídos por áreas espaciais extensas.

Outro exemplo de ferramenta de planeamento é o SOLARGIS [GeoModelSolar, 2010-2013] que consiste num sistema de informação geográfica para a electrificação rural tendo como base fontes de energia renováveis. O principal objetivo desta ferramenta foi a demonstração do valor das metodologias SIG para o desenvolvimento e instalação de sistemas de energia com base em fontes renováveis. A metodologia utilizada permite a identificação de áreas de interesse para o cumprimento dos objectivos impostos pela Comunidade Europeia considerando utilizações finais com sistemas autónomos ou ligados a uma rede eléctrica local. Este trabalho prevê ainda a utilização de diversas fontes renováveis.

A questão da identificação do potencial renovável disponível (ou sustentável) reveste-se da maior sensibilidade quando a escala de interesse corresponde à dimensão de uma cidade. A caracterização do vento neste tipo de ambientes é, normalmente, difícil e pouco precisa,

sendo necessária a implementação de metodologias que envolvam recursos adequados e somente disponíveis em Laboratórios de investigação e Universidades.

McIntyre et al. [2011] desenvolveram um trabalho para implementar sistemas de energia renovável na cidade de Guelph no Canadá, recorrendo a dados de diversas estações anemométricas e meteorológicas e à aplicação da metodologia clássica⁷ para avaliação do potencial eólico. Estes autores recorreram igualmente a um atlas do potencial eólico desenvolvido para o Canadá e que disponibiliza dados anuais de diversos pontos de medida distribuídos pelo território Canadano [Environment Canada, 2003]. O potencial eólico foi estimado para a área da cidade considerando uma relação entre a área total da mesma e a área ocupada por uma turbina (10 diâmetros de espaçamento na direcção do escoamento dominante não havendo referência ao espaçamento considerado na direcção perpendicular ao escoamento dominante), e aplicando esta metodologia às dimensões de diversos modelos de microturbinas. McIntyre et al. [2011] apresentam ainda um método para a identificação da capacidade passível de ser instalada na cidade de Guelph, quer instalando pequenas turbinas (10kW) quer turbinas multi-megawatt (2MW) para o desenvolvimento de um parque eólico comunitário. Neste trabalho é notória a disponibilidade de um elevado conjunto de dados de vento medidos em ambiente urbano tendo sido, inclusivamente, possível efectuar um estudo de variabilidade inter-anual do escoamento atmosférico.

Nos Estados Unidos da América onde a disponibilidade de informação é vasta e de onde são originários a maior parte dos programas SIG comerciais, têm sido publicados alguns estudos sobre o assunto. Exemplo é o trabalho desenvolvido para o estado americano do Iowa, onde se desenvolveu uma metodologia SIG para o aproveitamento de energias renováveis [Grassi et al., 2012]. O modelo desenvolvido pelos autores teve em conta os diversos usos do solo, o recurso eólico – dados obtidos com modelação de mesoscala – e as condições ambientais, não tendo no entanto, sido desenvolvido para aplicação a zonas urbanas.

Face ao exposto, pode dizer-se que estes sistemas constituem valiosas ferramentas de planeamento no sector das energias renováveis. Estes permitem um manuseamento preciso de elevados volumes de informação bem como a programação de ferramentas e operações sobre diversos formatos e tipos de informação mantendo a sua georeferenciação. Da mesma forma, é possível com este tipo de ferramentas a actualização automática de mapeamentos, tabelas e outros elementos, de forma fácil e precisa, permitindo ainda a disseminação e disponibilização de resultados em rede.

Organização do documento

O trabalho a apresentar neste documento encontra-se organizado da seguinte forma:

Capítulo 2 - Neste capítulo é apresentado, de uma forma geral, a meteorologia no ambiente urbano. São descritas as formulações características do escoamento atmosférico, da radiação e da turbulência tipicamente presente neste tipo de ambientes. São ainda apresentadas as metodologias mais utilizadas na avaliação do potencial eólico, com especial incidência na problemática da sua avaliação em ambiente urbano. São abordados os modelos estado da arte nesta temática – microescala lineares e CFD no caso do vento e as ferramentas mais utilizadas no sector da energia solar para o cálculo do potencial solar. São ainda descritos, de uma forma genérica, os modelos seleccionados para aplicação da metodologia desenvolvida no âmbito deste trabalho.

Capítulo 3 – O Capítulo 3 tem como objectivo a apresentação das metodologias definidas neste trabalho para a avaliação do potencial solar e para a avaliação do potencial eólico.

⁷ Metodologia de base estatística utilizada no desenvolvimento do “European Wind Atlas” descrita no capítulo 2 deste documento.

Capítulo 4 – O capítulo apresenta a aplicação das metodologias de avaliação do potencial eólico e solar a dois casos de estudo em ambiente urbano bem como a validação e uma breve discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 5 – Neste capítulo apresenta-se a metodologia e as formulações gerais para a identificação do potencial disponível (ou sustentável) eólico e solar no interior de uma área urbana, bem como a sua aplicação aos dois casos de estudo seleccionados para este trabalho. É ainda apresentada uma breve discussão dos resultados obtidos.

Capítulo 6 – Finalmente são apresentadas as conclusões sobre os métodos desenvolvidos e resultados obtidos, assim como ideias de trabalho futuro nesta área de actividade.

2. A METEOROLOGIA NO AMBIENTE URBANO

2.1 Equações do Movimento na Atmosfera

O escoamento atmosférico pode ser descrito à custa das suas equações do movimento. Neste capítulo apresentam-se as equações do movimento vertical e horizontal, bem como alguns dos parâmetros relevantes que as constituem.

As equações de Navier-Stokes

As equações de Navier-Stokes descrevem o movimento de um fluido e são constituídas pelas equações do movimento e pela equação da continuidade. Esta última pode ser descrita através da equação 2.1 [Jensen e Bush, 1982] [Holton, 1972].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0. \quad (2.1)$$

A conservação da quantidade de movimento é expressa em termos da aceleração \vec{a} e do tensor de Cauchy $\vec{\sigma}$ (2.2).

$$\rho a_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad i = 1,2,3; \quad (2.2)$$

onde $\vec{a} = (a_1, a_2, a_3)$ e $\vec{\sigma} = (\sigma_{ij})_{ij} = 1,2,3$ e $\vec{f} = (f_1, f_2, f_3)$ representa as forças de volume aplicadas ao fluido.

O vector aceleração $\vec{a} = \vec{a}(\vec{x}, t)$ do fluido na posição \vec{x} e instante de tempo t , pode ser descrito através da derivada material:

$$\vec{a} = \frac{D\vec{u}}{Dt} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u}; \quad (2.3)$$

ou:

$$a_i = \frac{u_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad i = 1,2,3. \quad (2.4)$$

Inserindo a equação 2.4 em 2.3 no primeiro termo, obtém-se:

$$\rho \vec{a} = \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla})\vec{u}; \quad (2.5)$$

ou:

$$\rho a_i = \frac{u_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad i = 1,2,3. \quad (2.6)$$

O termo $\rho(\vec{u} \cdot \nabla)\vec{u}$ é o único termo não linear das equações de Navier-Stokes, denominado termo de inércia.

Para fluidos newtonianos⁸ o tensor das tensões é expresso em termos do campo da velocidade através da fórmula:

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + (\lambda_s \operatorname{div} \vec{u} - p) \delta_{ij}; \quad (2.7)$$

onde $p = p(\vec{x}, t)$ é a pressão, δ_{ij} é o símbolo de Kroenecker e μ e λ são constantes. A constante μ é o coeficiente de viscosidade de corte e $3\lambda_s + 2\mu$ descreve a relação de Stokes onde $\mu > 0$ e $3\lambda_s + 2\mu \geq 0$ [Hirsch, 2007].

Inserindo 2.7 em 2.5 obtém-se a equação:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\lambda_s \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - p) + f_i. \quad (2.8)$$

A equação da continuidade para um fluido incompressível e homogéneo é dada por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.9)$$

e a equação 2.8 vem:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + f_i. \quad (2.10)$$

Como a densidade é constante é possível dividir a equação da quantidade de movimento, 2.10, por ρ e considerar a denominada viscosidade cinemática, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, a pressão e a força de volume, \vec{f} . Tendo em conta a conservação da massa, as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível, homogéneo e viscoso são dadas por:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{f_i}{\rho}. \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.12)$$

⁸ Fluido newtoniano: Fluido incompressível com viscosidade constante.

Equação do movimento vertical

A segunda lei de Newton aplicada ao movimento vertical pode ser escrita como [Panofsky, 1982]:

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + F_z + CF_z ; \quad (2.13)$$

onde w é a velocidade vertical, g é a aceleração da gravidade, $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$ representa o gradiente da força de pressão e CF_z a componente vertical da força de Coriolis que, normalmente, é desprezada em comparação com a gravidade (tipicamente 10^4 vezes superior a CF_z). $\frac{dw}{dt}$ deve ser considerado em movimentos de escala reduzida tais como em escoamentos sobre pequenas montanhas e colinas, mas para movimentos em larga escala a equação 2.13 reduz-se à equação hidrostática:

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho . \quad (2.14)$$

Esta equação estabelece um equilíbrio entre a gravidade e o gradiente vertical da força de pressão, ou por outras palavras, da pressão com o peso da atmosfera.

Se se eliminar a densidade através da equação dos gases perfeitos, obtém-se a equação hipsométrica:

$$\frac{\partial(\ln p)}{\partial z} = \frac{g}{RT_v} . \quad (2.15)$$

De acordo com a equação 2.15 a pressão decresce mais rapidamente com a altitude em ar húmido e/ou quente do que em ar seco e/ou frio.

A variável g que representa a gravidade, varia dos polos para o equador. De forma a reduzir os efeitos desta variação, é introduzida a variável h – altura do geopotencial⁹ – que substitui a altura geométrica, z . Da mesma forma, g é substituída pela constante g_0 que toma o valor 9.8 m/s^2 . Desta forma obtém-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial p}{\partial h} = -g_0\rho ; \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial(\ln p)}{\partial h} = -\frac{g_0}{RT_v} . \quad (2.17)$$

A equação 2.16 é a forma mais conhecida da equação hipsométrica. Esta equação pode ser utilizada para obter diversas variáveis como a altura do geopotencial, substituir a altitude pela pressão ou mesmo para obter o gradiente adiabático para o ar seco (equação 2.18).

⁹ O valor do Geopotencial assume-se nulo ao nível médio do mar. O geopotencial à altura h corresponde ao trabalho necessário para elevar uma unidade de massa para a altura h a partir do nível médio do mar.

$$\Gamma = g_0/c_p \sim 9.8^\circ\text{C}/\text{km} . \quad (2.18)$$

Para uma atmosfera padrão, a expressão 2.18 corresponde a: $\Gamma = g_0/c_p \sim 6.5^\circ\text{C}/\text{km}$ [Panofsky, 1982]. A relação (2.17) é importante para definir as condições de estabilidade de um dado ambiente. O significado prático de gradiente adiabático é que, em atmosfera estável, a turbulência é, habitualmente, muito reduzida. Em camadas adiabáticas (e instáveis), a convecção produz forte turbulência e mistura vertical. Estas definições são, no entanto, apenas aplicadas a regimes de equilíbrio hidrostático e omitem a influência perturbadora da variação vertical dos ventos horizontais [Panofsky, 1982].

O vento geostrófico

O tipo de escoamento atmosférico mais simples, sem aceleração e sem atrito é o escoamento ou vento geostrófico dado por:

$$G = -g\nabla_p h \times \vec{k} ; \quad (2.19)$$

onde \vec{k} é o vector unitário vertical e o índice p significa que o gradiente é calculado a pressão constante. A equação 2.19 indica que:

- o vento geostrófico sopra paralelamente às linhas de h constante nas superfícies isobáricas deixando as altitudes mais baixas à esquerda no hemisfério Norte e à direita no hemisfério Sul;
- a magnitude do vento geostrófico é inversamente proporcional à distância entre as curvas de nível (linhas de igual altitude) e proporcional à magnitude dos declives das superfícies isobáricas;

Na maior parte da atmosfera, 10% dos ventos correspondem ao vento geostrófico e as direcções do vento fazem ângulos de 20° com as isolinhas (linhas de corrente). As excepções mais relevantes são:

- no quilómetro inferior da atmosfera (Camada de atrito ou Camada limite planetária) onde o atrito turbulento é importante. Aqui o vento sopra perpendicularmente às linhas de corrente, no sentido decrescente, tipicamente com ângulos de 20° a 40° , sendo mais fraco do que o vento geostrófico;
- em regiões com forte curvatura onde o vector aceleração é elevado;
- perto do Equador onde a força de Coriolis e o gradiente de pressão são reduzidos.

Considerando um escoamento com gradiente horizontal de densidade desprezável, como por exemplo em escoamentos barotrópicos, o gradiente de pressão não varia com a altitude e pode escrever-se:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \rho \left[fV_{gr} \pm \frac{V_{gr}^2}{r} \right] ; \quad (2.20)$$

onde V_{gr} é a velocidade do gradiente, r é o raio de curvatura das isóbaras e n é a direcção do vento do gradiente. Se a aproximação do vento geostrófico puder ser aplicada então tem-se:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = fV_g ; \quad (2.21)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = -fU_g ; \quad (2.22)$$

onde U_g e V_g são as componentes de G ao longo dos eixos x e y (figura 2.1, onde os eixos se encontram alinhados com as tensões de corte¹⁰. O eixo do x encontra-se alinhado com a tensão de corte à superfície).

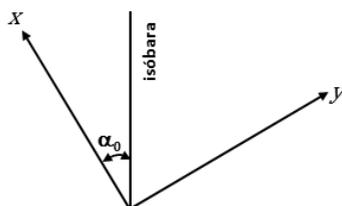


Figura 2.1 – Representação dos eixos coordenados (adaptado de [Simiu e Scanlan, 1986]).

As condições fronteiras podem ser estabelecidas da seguinte forma: junto ao solo a velocidade é nula enquanto numa elevação do solo igual à espessura da camada limite a tensão de corte torna-se desprezável e o vento sopra com a velocidade do gradiente [Simiu e Scanlan, 1986].

A equação 2.23 é a conhecida lei do arrastamento geostrófico e é incluída em vários modelos de microescala utilizados no estudo do vento para aplicações energéticas;

$$G = \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\left[\ln \left(\frac{u_*}{f z_0} \right) - F_1 \right]^2 + F_2^2} ; \quad (2.23)$$

onde u_* é a velocidade de atrito, κ é a constante de Von-Karman que toma o valor 0.4 e F_1 e F_2 são funções da estabilidade que para condições neutras tomam o valor 1.8 e 4.5 respectivamente. Se o vento geostrófico for conhecido é possível calcular u_* para um dado coeficiente de rugosidade z_0 e utilizar a lei logarítmica ou a lei de potências para calcular a velocidade do vento a uma dada altura z [Petersen et al., 1997].

A tensão de corte de uma superfície (média sobre uma superfície urbana) i.e., acima da camada de cobertura urbana, define a velocidade de fricção (ou atrito), u_* , que pode ser utilizada para obter os perfis de velocidade do vento e de turbulência. É assumido que, independentemente da superfície inferior, a velocidade do vento no topo da camada limite atmosférica ($h=500$ a $1000m$) é aproximadamente igual à velocidade do vento resultante do equilíbrio definido pela teoria do vento geostrófico, que se baseia no gradiente da pressão sinótica. Para valores elevados de rugosidade a força de arrastamento (ou u_*) é superior face a situações de rugosidade reduzida, e a velocidade do vento a qualquer nível da camada limite é inferior.

¹⁰ Traduzido de “shear stress”

A camada de Ekman

A camada limite formada por gradientes de pressão em sistemas rotativos é denominada camada de Ekman e é frequentemente utilizada como modelo simples para a camada limite atmosférica [Marlatt et al., 2011], [Simiu e Scanlan, 1986].

Para resolver as equações do movimento, é necessário definir equações de fecho. Estas equações de fecho podem ser estabelecidas em termos das tensões, τ_u e τ_v , que podem, por sua vez, ser definidas com base na viscosidade turbulenta $K(x, y, z)$:

$$\tau_u = \rho K(x, y, z) \frac{\partial U}{\partial z}; \quad (2.24a)$$

$$\tau_v = \rho K(x, y, z) \frac{\partial V}{\partial z}; \quad (2.24b)$$

onde U e V representam as componentes da velocidade do vento nas direcções x e y . Em condições de equilíbrio e para escoamentos homogéneos horizontais, as equações do movimento podem ser escritas à custa do vento geostrófico na forma:

$$V_g - V = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial \tau_u}{\partial z}; \quad (2.25a)$$

$$U_g - U = -\frac{1}{\rho f} \frac{\partial \tau_v}{\partial z}. \quad (2.25b)$$

Se se assumir que a viscosidade turbulenta é constante o modelo obtido é denominado de espiral de Ekman. Assumindo as condições fronteira $U = V = 0$ para $z = 0$ e $U_g = V_g = \infty$, a solução do sistema de equações 2.25a e 2.25b é dada por:

$$U = \frac{1}{\sqrt{2}} G [1 - e^{-az} (\cos az - \sin az)]; \quad (2.26a)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{2}} G [1 - e^{-az} (\cos az + \sin az)]; \quad (2.26b)$$

onde $a = (f/2K)^{1/2}$. As equações 2.26a e 2.26b descrevem a espiral de Ekman [Simiu e Scanlan, 1986] e podem ser representadas esquematicamente pela figura 2.2.

O número de Ekman pode ser definido como:

$$E_k = \frac{\nu}{\Omega H^2}; \quad (2.27)$$

onde ν é a viscosidade cinemática, Ω é a velocidade de rotação do fluido e H é a escala de profundidade (ou espessura) do movimento do fluido.



Figura 2.2 – Espiral da velocidade do vento na camada limite atmosférica [Simiu e Scanlan, 1986].

Os escoamentos geofísicos típicos têm números de Ekman reduzidos. Quanto menor é o número de Ekman menor é o papel do atrito vertical no balanço de forças do escoamento e pode por isso ser desprezado nas equações da quantidade de movimento. No entanto, estes termos são os que têm derivadas de maior ordem e sendo desprezados a ordem do conjunto de equações diferenciais é também reduzida o que faz com que não seja possível aplicar todas as condições fronteira em simultâneo. De acordo com L. Prandtl, sob certas circunstâncias o sistema do fluido tem dois comportamentos distintos [Simiu & Scanlan, 1986]. A uma dada distância da fronteira superior, no que é habitualmente denominado de “interior” no domínio de simulação, o atrito é desprezável, e perto de uma fronteira (parede) até uma curta distância considera-se uma fina camada limite onde a velocidade do “interior” decresce para zero na parede. A espessura desta fina camada limite é tal que o nº de Ekman é da ordem de 1:

$$\frac{v}{\Omega d^2} \sim 1 \Leftrightarrow d = \sqrt{\frac{v}{\Omega}}. \quad (2.28)$$

Turbulência

Em 1973, Taylor e Von Karman¹¹ propuseram a seguinte definição de turbulência: “*Turbulência é um movimento irregular que surge, em geral, nos fluidos, gasosos ou líquidos, quando passam por uma superfície sólida, ou mesmo quando fluxos vizinhos do mesmo fluido passam uns pelos outros*” [Wilcox, 1993].

Este movimento faz com que as diversas camadas do fluido se misturem intensamente. Dado que há um aumento da quantidade de movimento e trocas de energia entre as moléculas e as paredes do sólido, os fluxos turbulentos conduzem nas mesmas circunstâncias que os escoamentos ligeiramente turbulentos a maior atrito e maior transferência de calor. A natureza irregular da turbulência contrasta com o movimento laminar (fluido move-se em lâminas suaves, ou camadas). Análises cuidadas das soluções das equações de Navier-Stokes, mostram que a turbulência se desenvolve como instabilidade do escoamento laminar [Wilcox, 1993].

¹¹ Referência à publicação [Goldstein, 1938] não encontrada à data da redacção desta dissertação

Sendo a turbulência de difícil caracterização, Reynolds [1976] refere o desenvolvimento de 5 métodos para a resolução do sistema de equações e que consideram uma equação diferencial parcial para a turbulência em conjunto com as equações diferenciais parciais do movimento médio.

- modelos algébricos (“zero-equações”) – modelos que recorrem a uma equação às derivadas parciais (PDE) para o campo da velocidade e não utiliza PDEs para a turbulência;
- modelos de uma equação – modelos que incorporam a uma PDE adicional relacionada com a escala de velocidade turbulenta;
- modelos de duas equações – modelos que incorporam uma PDE adicional relacionada com uma escala de comprimento de turbulência;
- modelos de equações de tensão – modelos que incorporam PDEs para todas as componentes do tensor das tensões turbulentas;
- *Large eddy simulation* (LES) – modelação da estrutura turbulenta tridimensional e variável no tempo e um modelo para a turbulência de pequena escala.

Modelação da turbulência

A teoria estatística da turbulência refere-se à evolução dos parâmetros estatísticos e das distribuições *densidade de probabilidade* da velocidade ou de outras funções do escoamento. A aproximação para a solução dos problemas de fluxos turbulentos considerando as médias temporais e resolvendo as equações do movimento para estas variáveis deve-se a O. Reynolds, ao assumir que é possível considerar a velocidade instantânea como a soma de um valor médio com a sua flutuação, no instante considerado [Jensen e Bush, 1982]. Assim, considerando a velocidade e a pressão com esta decomposição, tem-se:

$$\begin{cases} u = \bar{u} + u' \\ p = \bar{p} + p' \end{cases} \quad (2.29a, b)$$

Substituindo 2.29 a,b em 2.11 obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{u}_i + u'_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j)] = \frac{\partial}{\partial x_j} v \left(\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i + u'_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_j + u'_j) \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{p} + p') + \frac{f_i}{\rho} \quad (2.30)$$

Desenvolvendo e aplicando a média temporal vem:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \overline{(\bar{u}_i + u'_i)} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(\bar{u}_i \bar{u}_j + \bar{u}_j u'_i + \bar{u}_i u'_j + \bar{u}_j u'_j + \bar{u}_i u'_i + u'_j u'_i)} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} v \left(\frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(\bar{u}_i + u'_i)} + \frac{\partial}{\partial x_i} \overline{(\bar{u}_j + u'_j)} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{(\bar{p} + p')} + \frac{\bar{f}_i}{\rho}; \end{aligned} \quad (2.31)$$

onde $\overline{u'} = 0$ e $\bar{u} = \text{const}$. Da mesma forma, o termo $\overline{u'_j u'_i}$ não é nulo desde que as variáveis u'_i e u'_j sejam correlacionadas. Então a equação 2.31 fica:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_j u'_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\bar{f}_i}{\rho}; \quad (2.32)$$

e multiplicando por ρ obtém-se a equação para o escoamento médio conhecida por *Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS*.

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} - \rho \overline{u'_j u'_i} \right) - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{f}_i; \quad (2.33)$$

onde o termo $\rho \overline{u'_i u'_j}$ representa o tensor das tensões de Reynolds.

Pode notar-se que os termos convectivos da equação da quantidade de movimento (2º termo do lado esquerdo da equação 2.33) são não lineares e correspondem ao produto da velocidade pelas componentes das derivadas da velocidade. Este facto levou à geração das tensões de Reynolds que representam transferência adicional de quantidade de movimento devido às flutuações de turbulência.

Assim, o principal objectivo do modelo de turbulência é prever o efeito das tensões de Reynolds no escoamento médio. Consequentemente, o passo seguinte no processo de modelação da turbulência passa pela formulação e aplicação de um modelo adequado, que possa representar de forma precisa essas tensões num conjunto de campos do vento.

Parte dos modelos utilizados na resolução de problemas no sector eólico [Meteodyn, 2010], [WindSim, 2012], resolvem estas equações num contexto de escoamento incompressível (2.34):

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2.34)$$

$$-\frac{\partial (\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_j u'_i} \right] + f_i = 0. \quad (2.35)$$

Os escoamentos turbulentos são parametrizados através da viscosidade turbulenta. Este método é baseado na hipótese de Boussinesq. Assim de acordo com Wallbank [2008], Martilli et al. [2007], Wilcox [1993] e Tennekes e Lumley [1972]:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho E_{ct} \delta_{ij}; \quad (2.36)$$

onde $\overline{u'_i u'_j}$ representa as tensões de Reynolds e μ_t , é a viscosidade turbulenta. A expressão 2.36 relaciona as tensões de Reynolds com os gradientes da velocidade média.

A viscosidade turbulenta, μ_t , é determinada através da equação 2.37, onde L_T representa uma escala de comprimento, E_{ct} a energia cinética turbulenta e ρ a densidade.

$$\mu_t = \rho E_{ct}^{1/2} L_T. \quad (2.37)$$

A Energia cinética turbulenta é determinada através da utilização da equação de transporte incluindo os termos da produção e dissipação de turbulência.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho \bar{u}_i E_{ct} - \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial E_{ct}}{\partial x_i} \right] = P_k - \varepsilon . \quad (2.38)$$

A taxa de produção, P_k , e a dissipação, ε , da energia cinética turbulenta são calculadas por:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j}; \quad (2.39)$$

$$\varepsilon \sim \frac{E_{ct}^{3/2}}{L_T} . \quad (2.40)$$

O número de Reynolds e a turbulência

Para que exista escoamento turbulento as forças de inércia que actuam nas partículas de um fluido devem ser suficientemente elevadas para ultrapassar o efeito de estrangimento da viscosidade. Assim, para poder definir as características de um escoamento, torna-se necessário avaliar a razão entre as forças inerciais e viscosas presentes no escoamento. A medida da razão entre estas duas forças define um nº adimensional denominado nº de Reynolds [Simiu e Scanlan, 1986].

$$R_e = \frac{lu}{\nu}; \quad (2.41)$$

onde R_e é o número de Reynolds, l é a escala de comprimento característica, u é a velocidade característica do escoamento e ν é a viscosidade cinemática (viscosidade normalizada pela densidade).

O escoamento turbulento é caracterizado por números de Reynolds elevados, pelo que a turbulência é afectada pela viscosidade e densidade do fluido, bem como pela escala de comprimento.

O número de Reynolds pode ainda ser definido pela equação (2.42):

$$R_e = \frac{\tau}{T}; \quad (2.42)$$

onde $\tau = \frac{l^2}{\nu}$ representa o intervalo de tempo necessário às trocas moleculares numa distância l e $T = \frac{l}{u}$ é a escala de tempo referente às diferenças de velocidade u verificadas numa distância l . Quando τ é elevado relativamente a T , formam-se vórtices e o fluxo é turbulento. Assim, pode considerar-se que a camada limite atmosférica se encontra, quase sem excepção, num estado turbulento [Jensen e Bush, 1982].

Plate [1982] refere que um valor adequado para o estudo do escoamento atmosférico sobre obstáculos é $R_e \geq 5 \times 10^4$.

A cascata de energia

A teoria da turbulência de Richardson estabelece que o escoamento turbulento é constituído por escalas ou dimensões diferentes de turbilhões. As escalas maiores são instáveis e podem eventualmente fraccionar-se em turbilhões cada vez mais pequenos. A energia cinética dos grandes turbilhões vai, assim, sendo sucessivamente transferida através das várias escalas de turbilhões, num processo denominado de “cascata de energia”. Eventualmente os turbilhões atingirão uma dimensão crítica onde as forças viscosas irão dissipar energia internamente (em calor). Esta escala final é conhecida como microescala de Kolmogorov, e as suas escalas típicas são da ordem de 10^{-3} m. Como comparação, a maior escala de turbilhões pode ter comprimentos da ordem dos 3 km (escala da altura da camada limite planetária).

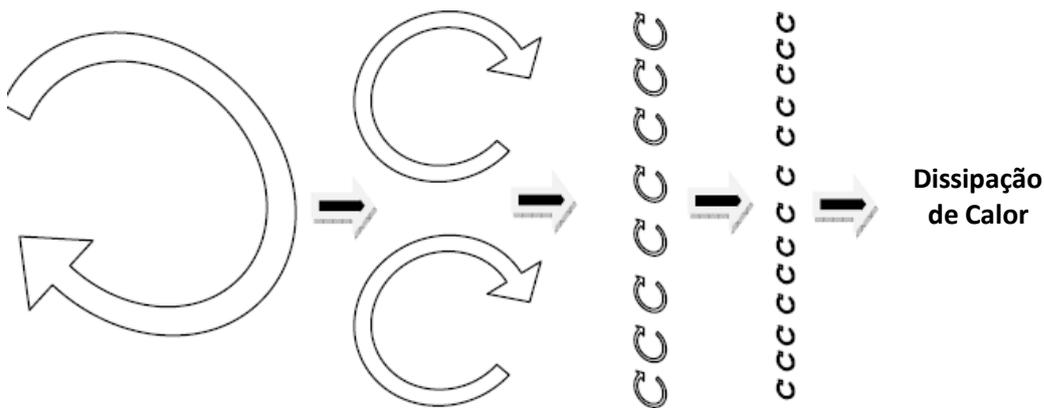


Figura 2.3 – Representação da cascata de energia – a degradação dos vórtices turbulentos [Wallbank, 2008].

Energia cinética turbulenta

A energia cinética (E_c) pode ser dividida em duas componentes, uma associada ao vento médio (energia cinética média – $\overline{E_c}$) e a outra associada ao vento turbulento (energia cinética turbulenta – E_{ct}). A energia cinética é definida por:

$$E_c = 0.5mU_i^2; \quad (2.43)$$

onde m é a massa e U_i é a velocidade média do vento. Se for dividida nas duas componentes acima mencionadas para cada direcção (x, y e z), E_c pode ser representada pelas duas equações abaixo:

$$\frac{\overline{E_c}}{m} = \frac{1}{2}(\overline{u}^2 + \overline{v}^2 + \overline{w}^2); \quad (2.44)$$

$$e = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2); \quad (2.45)$$

onde \overline{u} , \overline{v} e \overline{w} representam as três componentes médias da velocidade do vento, e e representa a energia cinética turbulenta por unidade de massa. Tomando a média de e pode obter-se uma relação mais directa para a energia cinética turbulenta:

$$\frac{E_{ct}}{m} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) = \bar{e}; \quad (2.46)$$

onde u' , v' e w' representam as flutuações das três componentes do vento.

O modelo de turbulência $k - \varepsilon$

O modelo de turbulência $k - \varepsilon$ é um modelo a duas equações, comum em aplicações CFD que inclui duas equações de transporte para modelar a turbulência [Jones e Launder, 1972] [Reynolds, 1976]. A primeira das duas equações descreve a energia cinética turbulenta (que determina a energia da turbulência) e a segunda equação descreve a dissipação turbulenta (que determina a escala da estrutura turbulenta).

O modelo $k - \varepsilon$ é dado por:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P_K - \varepsilon; \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (U_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_K - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (2.48)$$

onde C_μ , σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são constantes como as definidas na tabela 2.1, v_T representa a viscosidade cinemática turbulenta e P_K é o termo de produção de energia cinética turbulenta dados, respectivamente, por:

$$v_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (2.49)$$

$$P_K = v_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j}. \quad (2.50)$$

Tabela 2.1 – Constantes do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ [Launder e Sharma, 1974] [Wallbank, 2008],

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

O modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$ (Renormalizado)

Yakhot e Orszag [1986] propuseram uma variante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$ onde as características de desempenho são melhoradas relativamente ao modelo padrão e é denominado de RNG $k - \varepsilon$. Este modelo é semelhante na formulação ao anterior, no entanto difere do modelo padrão na introdução de um termo adicional na equação da dissipação de turbulência para ter em conta as taxas de deformação em “não-equilíbrio” e emprega valores diferentes para os vários coeficientes do modelo [Tutar e Oguz, 2004]. A equação da dissipação da turbulência no modelo RNG $k - \varepsilon$ inclui o seguinte termo:

$$\frac{C_{\mu}\rho\eta^3\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)\varepsilon^2}{1+\beta\eta^3} \frac{1}{k}; \quad (2.51)$$

onde $\eta_0=4.38$ e $\beta=0.012$. O termo acima recorre igualmente do parâmetro η que corresponde à razão das escalas características da turbulência e do campo do escoamento médio e se calcula para:

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}; \quad (2.52)$$

onde:

$$S = \sqrt{2\overline{S_{ij}S_{ij}}} = \sqrt{\frac{G_k}{\mu_t}}; \quad (2.53)$$

e G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido a gradientes de velocidade médios no tempo (kg/m^3); S_{ij} representa a média temporal da taxa de variação do tensor das tensões (s^{-1}) e μ_t representa a viscosidade turbulenta (Ns/m^2).

A tabela 2.2 representa os valores recomendados para as constantes a utilizar neste modelo de turbulência.

Tabela 2.2 – Constantes do modelo de turbulência RNG $k - \varepsilon$ [Yakhot e Orszag, 1986]

C_{μ}	σ_k	σ_{ε}	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0.085	0.7179	0.7179	1.41	1.68

2.2 Caracterização do potencial eólico e solar

2.2.1 O vento nas cidades

As cidades são compostas por edifícios de várias formas e alturas agrupados em blocos e intersectados por ruas. Este tipo de complexidade da superfície terrestre origina interferências significativas com a estrutura da camada limite atmosférica urbana. Alguns dos efeitos mais importantes induzidos pelas zonas urbanas no escoamento atmosféricos são [Martilli et al., 2007]; a presença de uma intensa camada de corte no topo da subcamada de cobertura urbana e a conversão da energia cinética média do escoamento em energia cinética turbulenta. As esteiras turbulentas geradas pelos elementos de rugosidade misturam e difundem momento, calor, e poluentes. A dimensão dos turbilhões está relacionada com a dimensão dos elementos de rugosidade. Existe ainda efeito de arrastamento devido à presença dos edifícios, i.e., devido às diferenças de pressão ao longo dos elementos individuais de rugosidade. Os edifícios induzem aquecimento diferencial das superfícies iluminadas (ou sombreadas), retenção da radiação nas ruas e redução dos fluxos de calor latente que afectam o fluxo de calor sensível para a atmosfera. Da mesma forma, o calor gerado pelos transportes e estruturas de ar condicionado contribuem fortemente para o balanço térmico urbano. Estes fenómenos podem originar o efeito de ilha de calor.

Para a caracterização do vento em áreas urbanas é necessário efectuar uma análise detalhada do escoamento atmosférico tendo em conta a tridimensionalidade do escoamento neste tipo

de ambientes. Para tal a modelação numérica dinâmica com recurso a modelos CFD – *Computational Fluid Dynamics*, apesar do elevado custo computacional destes, tem a capacidade de resolver as equações de Navier-Stokes (recorrendo a uma equação de fecho) com uma resolução suficientemente elevada que consiga descrever os efeitos tridimensionais do escoamento em zonas urbanas.

No contexto deste trabalho apenas se irão referir os parâmetros relevantes no estudo dos recursos energéticos eólico e solar fotovoltaico podendo consultar-se no Anexo I outros parâmetros relacionados com a meteorologia urbana.

Camada limite atmosférica sobre uma área urbana

A camada limite sobre uma área urbana pode ser dividida num conjunto de subcamadas principais, a subcamada de cobertura urbana, a subcamada de rugosidade, a subcamada de inércia e a subcamada de mistura (acima da subcamada de inércia). Na figura 2.4 pode ver-se o perfil da camada limite sobre uma zona urbana.

A subcamada de inércia é a região onde a camada limite se adapta ao efeito provocado pela subcamada de superfície abaixo desta e onde se aplicam e são válidas as descrições matemáticas da camada limite atmosférica. De acordo com Rotach [1999], a teoria da similitude de Monin-Obukhov (MOST) pode ser aplicada nesta camada.

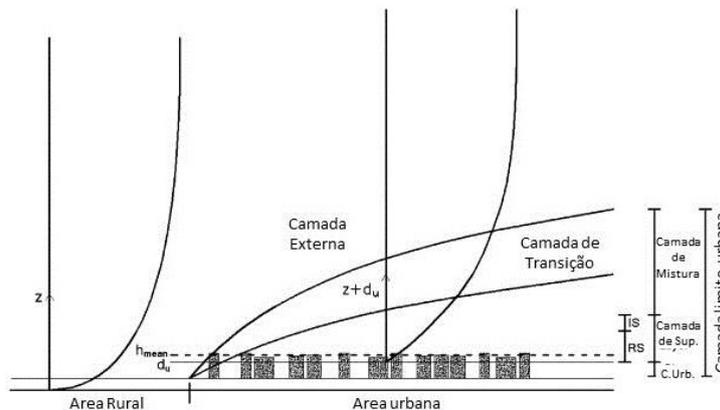


Figura 2.4 - Perfil da camada limite sobre uma zona urbana (adaptado de [Bitter e Hanna, 2003]).

A estrutura da subcamada de inércia é relativamente bem conhecida quando comparada com a subcamada de rugosidade, e é também definida como a camada onde as tensões de Reynolds são constantes [Simiu e Scanlan, 1986], [Millward-Hopkins et al., 2012]. Como consequência a velocidade horizontal do vento obedece ao perfil logarítmico dado pela equação 2.54, também conhecida por “Lei da Parede”, [Davenport, 1982]:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[\frac{z-d}{z_0} \right]; \quad (2.54)$$

onde $\kappa \approx 0.4$ é a constante de Von Karman, u_* é a velocidade de fricção ou de atrito (definida por $u_*^2 = K_m \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ onde K_m representa a viscosidade turbulenta), z é a altura acima do solo e os

parâmetros aerodinâmicos z_0 e d são o comprimento de rugosidade e a altura de deslocamento, respectivamente.

Tipicamente, estes parâmetros aerodinâmicos podem ser obtidos para uma superfície recorrendo a métodos geométricos ou meteorológicos [Millward-Hopkins et al., 2012], [Plate e Kiefer, 2001].

Em zonas urbanas os valores de d podem ser determinados de pela equação 2.55 [Simiu e Scanlan, 1986].

$$d = \bar{H} - \frac{z_0}{\kappa}; \quad (2.55)$$

onde \bar{H} é a altura do topo dos edifícios.

O conhecimento da altura dos edifícios e do espaçamento entre eles podem conduzir a estimativas mais precisas de z_0 e d . Para tal torna-se necessário definir um conjunto de parâmetros geométricos [Britter e Hanna, 2003], [Grimmond e Oke, 1999].

De uma forma geral, à medida que a densidade na distribuição dos obstáculos aumenta, verifica-se igualmente um aumento do comprimento de rugosidade z_0 até um ponto onde o escoamento se torna rasante¹² sobre os obstáculos. Neste caso o comprimento de rugosidade começa a decrescer. Esta situação ocorre quando a densidade da área frontal relativa aos edifícios de uma dada área, λ_f (equação 2.56) atinge o valor 0.20 [Macdonald, 2000].

$$\lambda_f = \frac{A_f}{A_d}; \quad (2.56)$$

onde A_f representa a área frontal de cada obstáculo exposto ao vento e A_d é área da superfície ocupada pelo obstáculo que corresponde à área total da superfície ocupada, A_T , dividida pelo número total de obstáculos.

Outro parâmetro relevante para a descrição dos conjuntos de obstáculos de uma dada área urbana é a densidade de área plana, λ_p dada por:

$$\lambda_p = \frac{A_p}{A_d}; \quad (2.57)$$

onde A_p é a área em planta de um obstáculo. Millward-Hopkins et al. [2011], apresentaram um método para a estimativa dos parâmetros d , e z_0 , tendo como base as grandezas/relações geométricas definidas em 2.56 e 2.57 e a força de arrastamento provocada por um edifício no escoamento sobre uma área urbana. Historicamente, a primeira representação do perfil médio do vento é dada por:

$$(z_{g1}) = U(z_{g2}) \left(\frac{z_{g1}}{z_{g2}} \right)^\alpha; \quad (2.58)$$

¹² "skimming flow"

onde α é um expoente que depende da rugosidade do terreno e z_{g1} e z_{g2} são alturas acima do solo [Simiu e Scanlan, 1986].

A tabela 2.3 apresenta os valores de α de acordo com o tipo de terreno apresentados por Ray et al. [2006] e a tabela 2.4 apresenta valores de z_0 para vários tipos de terreno de acordo com Simiu e Scanlan [1986].

Tabela 2.3 – Valores de α de acordo com o tipo de terreno [Ray et al., 2006].

Tipo de terreno	α
Terra batida, lago ou oceano	0.10
Erva rasteira, terreno não cultivado	0.14
Campo com erva e poucas árvores	0.16
Barreiras vegetais, árvores	0.20
Muitas árvores e alguns edifícios	0.22-0.24
Floresta, pequenas vilas e subúrbios	0.28-0.30
Áreas urbanas com edifícios altos	0.4

Tabela 2.4 – Comprimento de rugosidade z_0 para vários tipos de superfícies.

Tipo de superfície	z_0 (cm)
Areia	0.01-0.1
Neve	0.1-0.6
Erva (~0.01m)	0.1-1
Erva baixa, estepe	1-4
Campo de pouso	2-3
Erva alta	4-10
Pequenas árvores, caniçais	10-30
Pinhal (altura média das árvores ~15m; uma árvore por cada 10m ²)	90-100
Subúrbios de cidades, aldeias com distribuição urbanística esparsa	20-40
Subúrbios, aldeias densamente construídas, cidades	80-120
Centros de grandes cidades	200-300

A subcamada de rugosidade é a camada adjacente à zona rugosa da superfície onde o escoamento é influenciado pelos elementos individuais da rugosidade. O escoamento é horizontalmente heterogéneo, determinado por escalas locais de comprimento tais como a altura dos elementos de rugosidade (e.g. edifícios), a sua largura ou separação [Roth, 2000] e a forma dos edifícios [Rafailidis, 1997]. Nesta camada o escoamento ainda se está a adaptar aos efeitos dos vários obstáculos.

A subcamada de cobertura urbana¹³ corresponde à zona inferior da subcamada de rugosidade, e refere-se à altura média dos edifícios de uma área urbana. O escoamento é fortemente heterogéneo do ponto de vista espacial e pode originar efeito de arrastamento [Belcher et al., 2003]. Nesta subcamada, onde têm lugar a maioria das observações do vento nas zonas urbanas, o escoamento num dado ponto é directamente afectado pelos obstáculos locais. Aqui o escoamento é dominado pelas estruturas turbulentas associadas aos elementos de rugosidade individuais, sendo pouco afectado pelas características do escoamento nas

¹³ Da tradução de *urban canopy layer*

camadas superiores. Neste caso a transferência de energia entre as camadas superiores da camada limite urbana e a subcamada de cobertura urbana governam os movimentos do ar (nos desfiladeiros urbanos) e as características do escoamento dentro da cobertura urbana são apenas marginalmente dependentes das características do escoamento incidente.

O conhecimento das características do escoamento na subcamada de cobertura urbana é relevante devido a um conjunto de razões, nomeadamente, por permitir:

- a) a análise da dispersão de poluentes
- b) avaliação do vento para conforto pedestre
- c) desenvolvimento e instalação de sistemas de aproveitamento de energia eólica de pequena e média dimensão em ambiente urbano.

A investigação nesta área tem demonstrado maior incidência nos temas a) e b) mas pouco tem sido desenvolvido nos anos mais recentes, no que toca ao ponto c).

Para além destas camadas, existe acima da subcamada de inércia, a subcamada de mistura. Aqui o escoamento e a temperatura potencial são rapidamente misturados resultando em perfis horizontalmente homogéneos e verticalmente uniformes. A camada de mistura pode também ser limitada por uma camada de inversão na parte superior da camada limite [Roth, 2000].

Escalas típicas das zonas urbanas

O comportamento do escoamento atmosférico apresenta aspectos de maior ou menor relevância de acordo com a escala espacial horizontal em análise, sendo por isso tratado de diferentes formas. De acordo com Britter e Hanna [2003] podem definir-se quatro escalas principais:

Escala regional (100, 200km): As dimensões desta escala são caracterizadas por distâncias de 100 ou 200km que representam igualmente a dimensão da pluma urbana de poluentes. Esta escala sofre a influência da área urbana especialmente no que respeita às circulações motivadas pelo aquecimento gerado pelo efeito de ilha de calor urbano (*“urban heat Island”*). Na escala regional, normalmente caracterizada meteorologicamente pelos parâmetros sinóticos, a área urbana representa uma perturbação que provoca desaceleração e deflexão do escoamento e é possível analisar as alterações ao balanço energético na atmosfera, quer junto à superfície quer em termos da sua estrutura térmica. A escala regional corresponde à maior área que envolve ou influencia os fenómenos que ocorrem na escala urbana.

Escala urbana (10, 20km): Representa o diâmetro médio da área urbana. Nesta escala as variações do escoamento em redor de edifícios individuais ou grupos de edifícios estão pouco representadas. Os modelos de escoamento que analisam esta dimensão equivalente não tratam especificamente os detalhes do escoamento dentro da malha urbana. A maior parte da massa de qualquer nuvem de poluentes que se desloque esta distância ocorrerá acima dos edifícios. Aqui estão presentes, de uma forma global, os parâmetros que contribuem para o efeito da ilha de calor urbano. Efectivamente, nesta escala, o movimento das massas de ar ocorre acima da rugosidade, pelo que não se consideram os detalhes junto ao solo. O balanço de energia à superfície para uma área urbana e sua envolvente é afectado de forma significativa pelas diferenças de calor e de humidade induzidos pela actividade humana. Os fluxos de calor adicionais e o armazenamento de calor da superfície urbana conduzem ao fenómeno da ilha de calor já estudado por vários autores (e.g. [Unger, 2004], [Alcoforado e Andrade, 2008]). O fluxo de calor adicional aquece o ar sobre a zona urbana que, naturalmente, adquire uma componente ascendente. O balanço de massa impõe o fluxo horizontal e convergente de ar exterior e mais frio. Da mesma forma, a velocidade do vento numa área urbana é reduzida devido à rugosidade elevada característica destas regiões. A

direcção do vento é alterada como resultado das circulações na ilha de calor ou da deflexão do escoamento em redor da área urbana.

Escala de quarteirão (1-2km): Nesta escala os edifícios ainda podem ser tratados de forma estatística, i.e., tendo em conta a sua distribuição em termos de área e densidade espacial, o que permite a sua modelação numérica considerando parametrizações gerais do escoamento atmosférico [Bitter e Hanna, 2003], [Carpentieri et al., 2012]. No entanto, a abordagem pode ser diferente da utilizada para a escala de cidade. Na escala de quarteirão é importante conhecer com maior detalhe o escoamento dentro da malha urbana. Naturalmente, o escoamento atmosférico sofre alterações à medida que passa de um quarteirão para outro. Nesta escala, é exequível a modelação do escoamento atmosférico com resolução elevada.

Escala de rua (100 a 200m): Esta escala destina-se ao escoamento dentro ou perto de duas ruas distintas, edifícios ou cruzamentos. Esta zona pode ser de interesse quando se pretende estudar a influência da turbulência no conforto pedestre e a exposição directa dos transeuntes e edifícios residenciais às emissões de gases dos veículos. De igual forma, permite o estudo do vento para aproveitamento da aceleração do vento do ponto de vista energético com origem na geometria das ruas quando estas formam desfiladeiros urbanos¹⁴. A existência de estações de medida a este nível permite o detalhe necessário à caracterização do vento para alguns tipos de aplicações – energia, dispersão de poluentes, conforto térmico, embora apresente reduzida representatividade espacial.

A influência de uma zona urbana no escoamento atmosférico

A influência de uma zona urbana no escoamento pode ser descrita com base no estudo das variações induzidas no escoamento atmosférico por alterações na rugosidade de uma determinada área com dimensão limitada. Muitas das alterações importantes nas condições da superfície ocorrem sobre uma determinada área limitada, como por exemplo, numa cidade, num lago, numa floresta, etc.

Se no percurso de um escoamento sobre uma superfície plana, a rugosidade se altera de z_{01} para z_{02} , a perturbação induzida no escoamento depende da razão z_{02}/z_{01} . Os principais efeitos do aumento (ou decréscimo) de z_0 são, uma variação na tensão da superfície, u_*^2 e variação da velocidade na zona influenciada pela alteração da rugosidade originando uma camada limite interna em crescimento com altura $l_z(x)$ [Hunt e Simpson, 1982].

Da mesma forma, à medida que o escoamento avança sobre uma dada área urbana, os obstáculos presentes vão originar forças devido aos gradientes de pressão que se fazem sentir. Em particular, se se considerar a secção de um corpo sólido imerso num fluido com velocidade U , o escoamento vai originar pressões locais, p , sobre o corpo de acordo com a equação de Bernoulli:

$$\frac{1}{2}\rho U^2 + p = cte ; \quad (2.59)$$

onde a constante (cte), a energia total, se mantém ao longo de uma linha de corrente e U representa a velocidade média de referência na linha de corrente adjacente ao corpo. A integração da distribuição de pressões sobre a superfície do corpo resulta numa força e numa determinada quantidade de movimento. As componentes da força nas direcções alinhada e perpendicular ao escoamento, denominam-se respectivamente, de arrastamento e

¹⁴ Geometria constituída por uma grande extensão de edifícios de altura significativa, e idêntica em ambos os lados dos arruamentos por ela definidos

sustentação. As forças de arrastamento, sustentação e quantidade de movimento são afectadas pela forma do corpo e pelo nº de Reynolds.

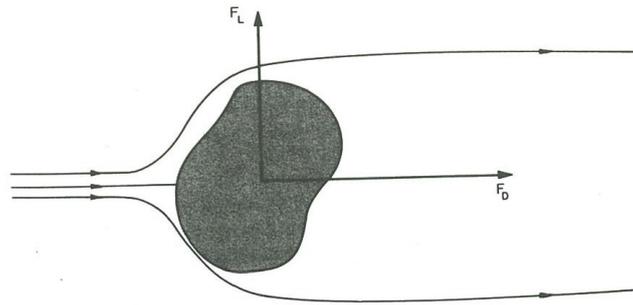


Figura 2.5 – Representação das forças de sustentação e arrastamento num corpo de forma arbitrária [Simiu e Scanlan, 1986].

O corpo pode ser moldado de forma a minimizar a força de arrastamento e maximizar a força de sustentação tendo como caso extremo último uma forma alar (*airfoil*).

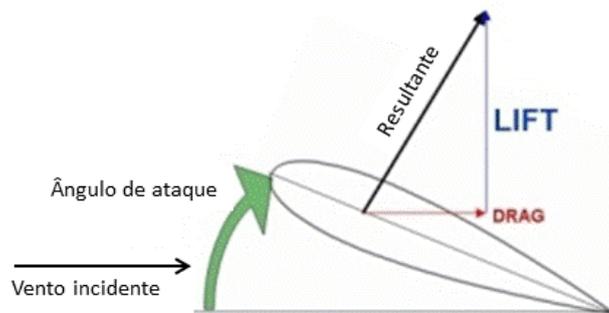


Figura 2.6 – Representação das forças de sustentação e arrastamento num perfil alar (fonte: <http://www.dreeseencode.com/primer/airfoil3.html>).

É usual quantificar as pressões medidas na superfície de uma estrutura como a razão entre a pressão relativa local e a pressão dinâmica, $\frac{1}{2}\rho U^2$, do escoamento não perturbado. Assim, podem definir-se coeficientes de pressão adimensionais C_p [Simiu e Scanlan, 1986]:

$$C_p = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2}\rho U^2}; \quad (2.60)$$

onde U é o valor médio da velocidade do vento de referência e $p - p_0$ representa a diferença de pressão entre a pressão local (junto aos edifícios) e a pressão estática de referência p_0 . Da mesma forma, as forças de pressão do vento F_L e F_D nas direcções de sustentação e arrastamento, podem ser dadas na forma adimensional e expressas em função dos coeficientes de sustentação, C_L , e de arrastamento, C_D :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho U^2 B}; \quad (2.61)$$

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 B}; \quad (2.62)$$

onde B é a área de referência do corpo.

A determinação dos coeficientes acima apresentados é frequentemente utilizada para a modelação do vento em ambientes urbanos em especial no que se refere à determinação da força de arrastamento tal como reportam Coceal e Belcher [2004], que apresentam um método baseado nas relações geométricas definidas anteriormente neste capítulo. Estes autores desenvolveram um modelo para a subcamada de cobertura urbana, baseada nas equações do movimento de acordo com a aproximação de Reynolds (Reynolds Averaged Navier-Stokes), já definidas neste capítulo. Assim, considerando que cada elemento de rugosidade exerce uma força de arrastamento no escoamento médio, esta força pode ser definida como:

$$F_D = \frac{1}{2} \frac{C_D(z)\lambda_f}{h(1-\beta)} U^2; \quad (2.63)$$

onde $\lambda_f = \sum \frac{A_f}{A_t}$ representa a área frontal total por unidade de área do solo, $C_D(z)$ representa o coeficiente de arrastamento e depende da altura z para a qual se está a determinar a força de arrastamento. $(1 - \beta)$ representa a fracção de volume ocupado pelo ar na cobertura urbana. Neste caso β não é mais do que a densidade de área plana, $\lambda_p = \sum \frac{A_p}{A_t}$, onde A_p representa a totalidade da área plana dos edifícios da zona urbana e A_t a área total do solo ocupada pelos edifícios. Coceal e Belcher [2004], atribuem também a λ_f a designação de densidade de rugosidade.

De acordo com Meroney [1982], e considerando o caso particular de um edifício de forma cúbica, referem-se alguns aspectos relevantes relacionados com o escoamento atmosférico junto ao mesmo:

- O escoamento sobre o edifício origina uma zona de pressão positiva no lado a barlavento e zonas de pressão negativa no topo, sotavento e faces laterais do edifício. Apesar de a pressão variar com a velocidade do vento para uma dada orientação, as magnitudes relativas não são afectadas.
- As zonas de pressão induzem deflexão das linhas de corrente, movimentos secundários do escoamento, separação e turbulência adicional.
- Quando o vento é perpendicular à face a barlavento de um edifício simples de forma cúbica, a zona de vórtices na esteira terá de largura, aproximadamente, 1.5 vezes a altura do edifício e o seu comprimento será de aproximadamente 2.5 a 6 vezes a altura do edifício medida a partir da face a barlavento. Se o edifício é longo, a partir de um determinado ponto do topo do edifício, o escoamento “recola” (Figs. 2.7). A esteira de um edifício longo pode estender-se por 7 alturas do edifício para sotavento do mesmo [Meroney, 1982].

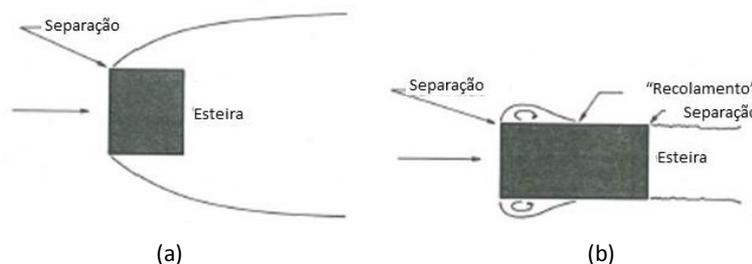


Figura 2.7 – Separação do escoamento e esteira em torno de um edifício de forma (a) cúbica e (b) rectangular [Simiu e Scanlan, 1986].

- Quando o vento se aproxima de um edifício de forma paralelepédica segundo uma orientação de $\sim 45^\circ$, geram-se dois vórtices anti-horários nos bordos de barlavento da cobertura que tendem a reduzir a altura da zona de vórtices e a aumentar a velocidade na esteira central à medida que varrem fluido a alta velocidade no sentido descendente. Estes vórtices podem persistir até 80 vezes a altura do edifício para sotavento.

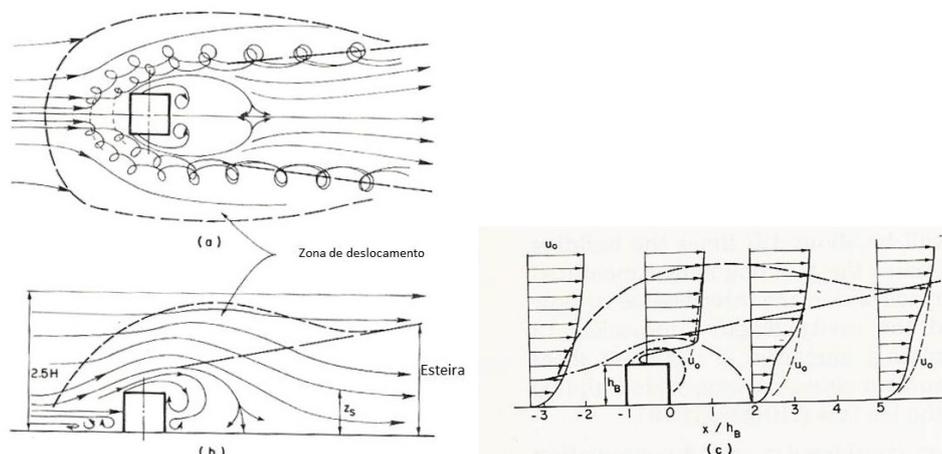


Figura 2.8 – (a) e (b) efeitos da turbulência, e (c) perfil vertical do vento em redor e no topo de um edifício de forma cúbica [Meroney, 1982].

Da mesma forma, numa cidade ou conjunto de edifícios, ocorre redução da velocidade do vento (habitualmente $> 20\%$), aumento do efeito corte da velocidade do vento e deflexão das linhas de corrente sendo igualmente formada uma zona de vórtices a sotavento do conjunto de edifícios que se pode estender até 5 a 20 alturas dos mesmos [Meroney, 1982].

A direcção do vento incidente nos edifícios assume uma importância elevada no desenvolvimento do escoamento quando este atravessa uma área urbanizada. Na maioria dos trabalhos publicados sobre vento em ambiente urbano, são dominantes as geometrias cúbicas (ou prismáticas) com distribuição esparsa onde o vento incide na direcção perpendicular às faces dos edifícios, [Baik e Fernando, 2003], [Coceal et al., 2006]. Na realidade não é isso que se passa, sendo que o vento nas cidades sofre diversas alterações à medida que se depara com os mais variados tipos de obstáculos. Da mesma forma, é frequente o vento incidir nos obstáculos em direcções distintas da perpendicular às faces dos edifícios o que provoca efeitos diversos na determinação dos comprimentos de rugosidade e forças de arrastamento. De acordo com estudos realizados por Kanda et al. [2007] e Takimoto et al. [2011] quando analisado o escoamento incidente num grupo de edifícios com orientação igual a 45° face ao escoamento dominante, observam-se comprimentos de rugosidade elevados o que implica um efeito de arrastamento superior ao verificado para direcções de 0° e 90° . O recente trabalho de Claus et al. [2012] vem confirmar estas características relativas ao vento urbano.

Desfiladeiros urbanos

Os processos físicos que ocorrem nos desfiladeiros urbanos (DU) assumem um papel importante ao nível do conhecimento do microclima existente dentro do DU bem como na compreensão do clima urbano no geral, como por exemplo, no acoplamento entre a cobertura urbana e as camadas limites acima desta. Da mesma forma, o estudo dos DU interessa para a análise da eficiência energética e climatização de edifícios, dispersão de poluentes e questões ambientais [Eliasson et al., 2006].

A figura 2.9 representa uma configuração simples onde se apresentam as dimensões típicas de um conjunto de edifícios distribuídos de forma regular sendo o vento incidente na direcção da rua (ou DU formado pelos edifícios).

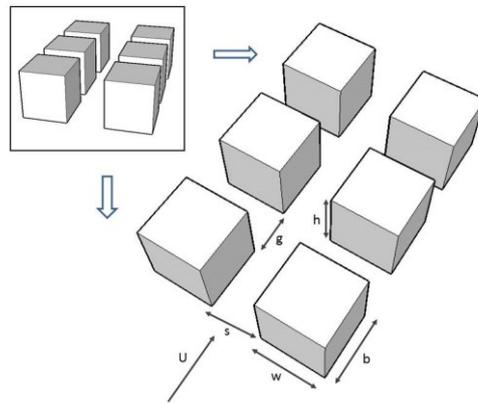


Figura 2.9 Principais dimensões a considerar num conjunto de edifícios (baseado em [Zajic et al., 2011]).

Na figura, g representa a separação entre edifícios na direcção dominante do vento, w representa a largura do edifício, b a profundidade do edifício e s a separação entre edifícios na direcção perpendicular ao vento incidente.

À medida que o vento passa pelo desfiladeiro a comunicação com o escoamento principal depende de diversas razões de aspecto¹⁵, tais como:

$$\lambda_{bs} = \frac{b}{s}; \lambda_{bw} = \frac{b}{w} \text{ e } \lambda_{hg} = \frac{h}{g}. \quad (2.64)$$

Se $\lambda_{bs} > 1$ e $\lambda_{hg} \ll 1$, os edifícios estão suficientemente afastados para que as esteiras respectivas sejam quase independentes. Para o caso em que os edifícios são longos com escoamento perpendicular ao desfiladeiro urbano, existem diversos estudos que se referem ao comportamento do vento neste tipo de geometrias [Zajic et al., 2011] onde se identificam alguns tipos de regimes típicos de escoamento bidimensional.

- a) Regime isolado: Ocorre quando $g > 2.5h$, ou quando a distância frontal $x_f \approx h$ e a distância a sotavento do edifício $x_j \approx 1.5h$. Nesta situação, o escoamento que se aproxima da parte a sotavento do obstáculo torna-se aproximadamente paralelo à base do desfiladeiro e começa a restabelecer-se da influência do obstáculo. Neste caso ocorre um vórtice secundário na esquina lateral do obstáculo a jusante [Simoens et al., 2007]. De uma forma geral, pode dizer-se que este tipo de escoamento ocorre quando os edifícios e árvores presentes na área urbana têm dimensões reduzidas e se encontram distribuídos de forma esparsa [Ahmed e Bharat, 2012].
- b) Regime de esteira de interferência: ocorre para separações de edifícios mais reduzidas, i.e., $1.4 < \frac{g}{h} < 2.4$. A esteira de um edifício interfere com a do edifício a sotavento. Neste caso parte do fluido acima dos obstáculos é descendente na parte a sotavento do vórtice formado no interior do desfiladeiro ocorrendo um reforço do mesmo. Em termos de caracterização dos edifícios, este tipo de escoamento ocorre quando os edifícios têm dimensão mais elevada, tipicamente quatro andares e ocupam mais de 30% da área da superfície criando pequenos desfiladeiros urbanos e áreas abertas entre o edificado [Ahmed e Bharat, 2012].

¹⁵ Razão de aspecto – relação de proporção entre duas medidas com as mesmas unidades.

- c) Regime de escoamento rasante: ocorre para separações ainda mais reduzidas e o escoamento desliza sobre o desfiladeiro urbano gerando vórtices estáveis no topo dos edifícios, cujo número depende da razão $\frac{g}{h}$ [Raupach et al., 1980]. Neste caso os vórtices gerados têm uma interação reduzida com o escoamento dominante acima do topo dos edifícios. Tipicamente, este tipo de escoamento tem lugar quando a densidade urbanística é elevada (e.g. centros de cidades antigas), i.e., quando os edifícios se encontram distribuídos de forma compacta e têm alturas semelhantes [Ahmed e Bharat, 2012].

As figuras 2.10 ilustram os tipos de escoamento acima referidos.

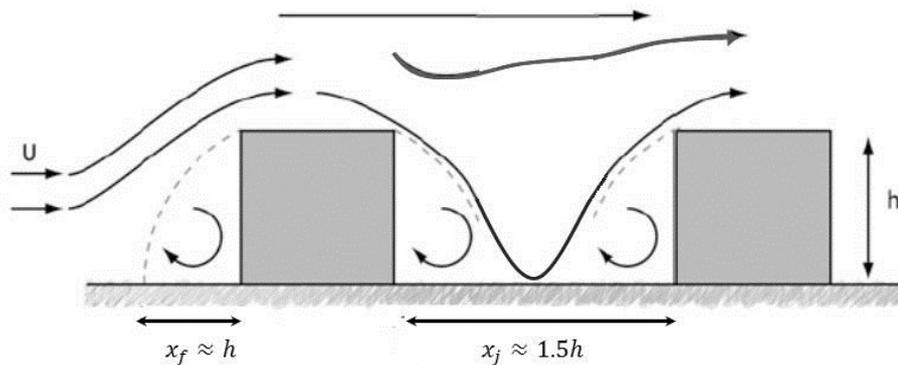


Figura 2.10a – Regime de escoamento isolado (adaptado de [Zajic et al., 2011]).

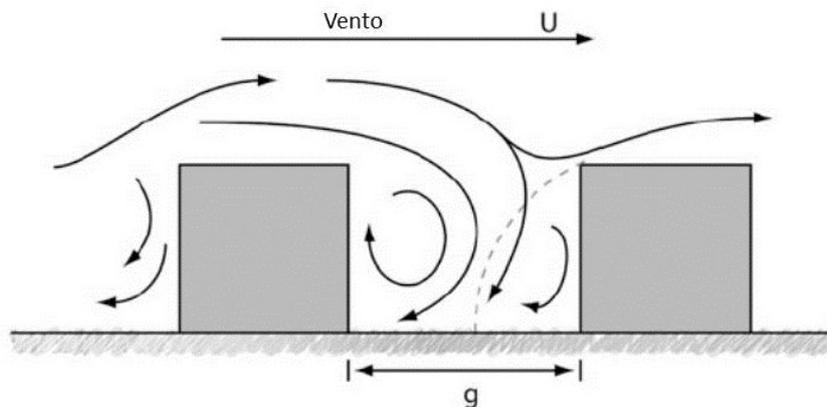


Figura 2.10b – Regime de escoamento esteira de interferência (adaptado de [Zajic et al., 2011]).

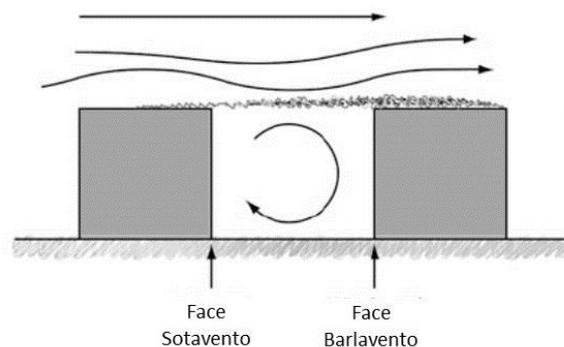


Figura 2.10c – Regime de escoamento rasante (adaptado de [Zajic et al., 2011]).

Ahmed e Bharat [2012] referem ainda a existência de um outro tipo de escoamento, o escoamento de mistura, que tem lugar quando a área urbana é densamente construída e apresenta conjuntos de “arranha-céus” de diferentes alturas rodeadas de zonas urbanizadas de forma densa (e.g. grandes cidades modernas).

Para edifícios com diferentes alturas, o padrão do escoamento depende das alturas de cada edifício (a sotavento e a barlavento) e da distância de separação g , sendo que, nesta situação, dificilmente ocorre escoamento rasante [Millward-Hopkins et al., 2011].

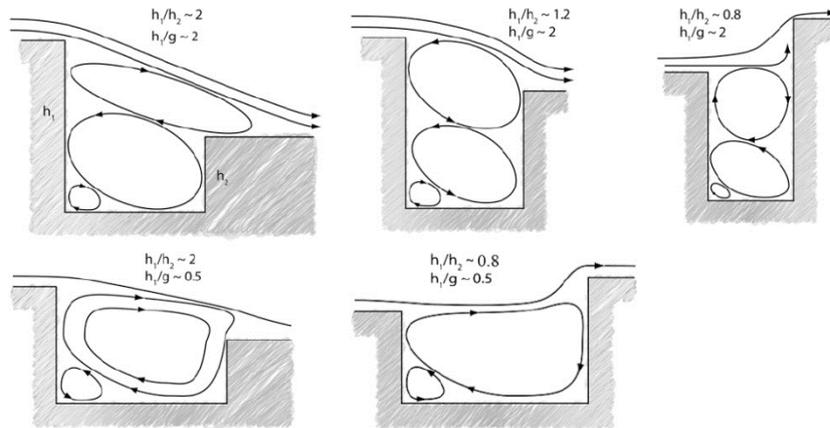


Figura 2.11 – Escoamento sobre edifícios de alturas distintas [Zajic et al., 2011].

Quando a velocidade do vento é reduzida os efeitos térmicos assumem um papel relevante, pelo que domina a convecção térmica. Neste caso a estabilidade dos vórtices que se formam no desfiladeiro é reduzida originando um aumento da intensidade de turbulência relativa face à velocidade média do vento.

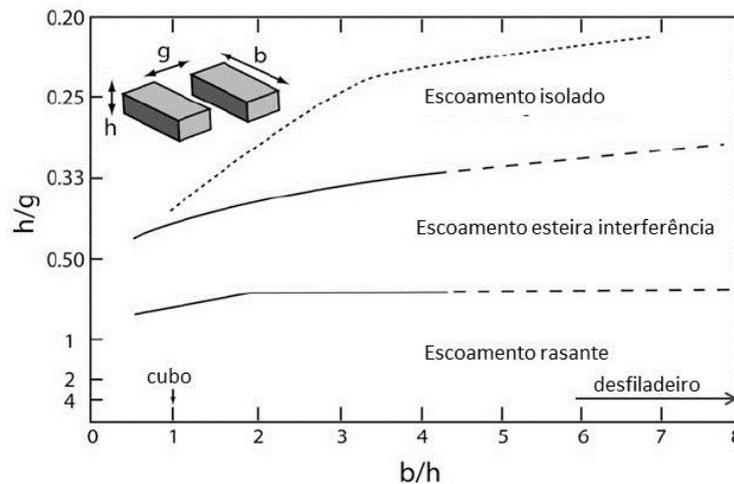


Figura 2.12 – Efeito da tridimensionalidade de um conjunto de edifícios na transição entre regimes de escoamento [Zajic et al., 2011]

Quando o escoamento se torna tridimensional ([Barkley e Henderson, 1996], [Ryan et al., 2005] referem que tal sucede quando $Re > 190$), os efeitos dos bordos laterais dos edifícios assumem um papel relevante. Para edifícios altos, $\frac{h}{b} \gg 1$, a bolha de recirculação a montante do edifício é ampliada pela camada de separação lateral originando maior turbulência [Zajic et al., 2011]. Quando os edifícios estão próximos, pode ocorrer aceleração do escoamento em

zonas entre edifícios. Quando as alturas dos edifícios são equivalentes, a transição entre regimes de escoamento depende de parâmetros adimensionais, como por exemplo de λ_p (densidade de área plana). A figura 2.12 apresenta o efeito da tridimensionalidade de um conjunto de edifícios na transição entre regimes de escoamento.

2.2.2 A radiação solar

A radiação electromagnética emitida pelo Sol e que atinge a superfície da Terra, bem como a que deixa o sistema Terra-Atmosfera compreende um vasto conjunto de comprimentos de onda. A parte do espectro electromagnético que é importante para o balanço energético da atmosfera contempla comprimentos de onda desde a região do visível até à região do ultravioleta (figura 2.13).

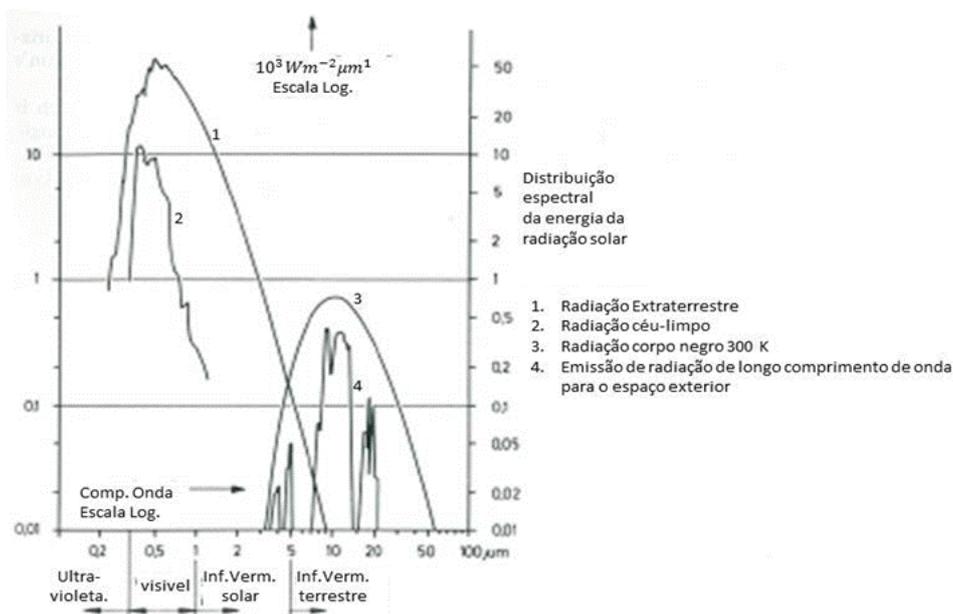


Figura 2.13 – Distribuição da radiação com o comprimento de onda [Bullrich, 1982]

O comprimento de onda λ da radiação solar (de pequeno comprimento) que é recebida pelo topo da atmosfera varia entre $0.29 \mu\text{m}$ e $3 \mu\text{m}$ correspondendo à temperatura solar de 6000 K de acordo com a Lei de Planck da radiação (equação 2.65).

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}; \tag{2.65}$$

onde E é a intensidade de radiação emitida por um corpo negro (o radiador tem pouca interação com o ambiente encontrando-se num estado de equilíbrio), $Temp$ é a temperatura do corpo radiador, h é a constante de Planck e toma o valor de $6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$, k_B é a constante de Boltzmann e tem o valor $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ e c é a velocidade da luz com o valor $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$.

Da lei de Planck podem derivar-se duas outras leis da radiação, a lei de Stefan-Boltzmann e a lei do deslocamento de Wien (equações 2.66 e 2.67). A lei de Stefan-Boltzmann estabelece a energia total emitida em todos os comprimentos de onda por um corpo negro e a lei de Wien estabelece o comprimento de onda do pico da distribuição da radiação.

$$E = \sigma T^4 ; \quad (2.66)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e tem o valor de $5.6705 \times 10^{-5} W/m^2 \cdot K^4$.

$$\lambda_{Max} = \frac{3 \times 10^{-7}}{T} ; \quad (2.67)$$

com λ em Angström e T em Kelvin.

A radiação que é emitida da superfície da Terra para a atmosfera é de elevado comprimento de onda e é denominada de radiação terrestre. Tem um comprimento de onda entre $4 \mu m$ e $100 \mu m$ de acordo com as temperaturas predominantes do solo e da atmosfera junto ao solo. Para a temperatura predominante da superfície da Terra, 288K, o máximo da radiação de longo comprimento de onda toma o valor $10 \mu m$. A direcção da radiação pode ser definida por dois ângulos, o ângulo de zénite, θ_z , e o ângulo de azimute, φ . Em geral o ângulo de zénite é definido como o ângulo que o feixe de radiação faz com a vertical através do ponto segundo o qual atinge o solo. O ângulo de azimute é definido sobre uma superfície horizontal. De acordo com a figura 2.14 é definido como a intersecção do plano formado entre o feixe solar e o eixo vertical, com o plano da superfície horizontal, e pela intersecção do plano formado entre o raio e o plano N-S [Bullrich, 1982].

A quantidade total de energia radiante de pequeno comprimento de onda emitida pelo disco solar juntamente com a que é reflectida e difundida pela atmosfera e pelas nuvens, passando através de uma unidade de área na horizontal por unidade de tempo é referida de uma forma geral por radiação solar global [Ramachandra, 2007].

Numa escala global, os gradientes latitudinais de radiação são causados pela geometria da Terra, a sua rotação e a sua revolução em torno do Sol. Nas escalas regionais e locais, o terreno é o factor que mais influência tem na distribuição da radiação. A variabilidade do terreno, altitude, declive e orientação, bem como os sombreamentos provocados pelas diversas ocorrências do terreno, cria fortes gradientes locais de radiação.

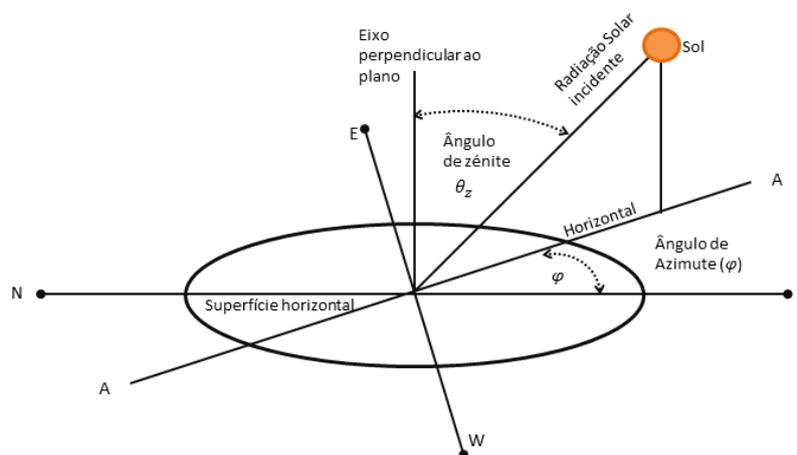


Figura 2.14 - Representação dos ângulos de zénite e de azimute que atingem a superfície terrestre (adaptado de [Bullrich, 1982]).

A heterogeneidade temporal e espacial da radiação solar que atinge a superfície da Terra determina a dinâmica de muitos processos à superfície que têm impacto na sociedade humana – temperatura e humidade do ar e do solo, derretimento da neve, fotossíntese e evapotranspiração. Assim, é importante a existência de dados fiáveis de radiação solar bem como a sua distribuição espacial para aplicações diversas – ciência ambiental, climatologia, ecologia, concepção de edifícios, detecção remota, aplicações fotovoltaicas, ordenamento do território, etc.

A interacção da radiação solar com a atmosfera terrestre e a sua superfície é determinada por 3 grupos de factores:

1. A geometria da Terra, revolução e rotação (declinação, latitude, ângulo solar)
2. O terreno (elevação, inclinação e orientação da superfície, sombras);
3. Atenuação atmosférica (dispersão, absorção) por:
 - a. Gases (moléculas de ar, ozono, CO₂ e O₂)
 - b. Partículas líquidas e sólidas (aerossóis, incluindo água não condensada)
 - c. Nuvens (água condensada)

O primeiro grupo de factores determina a radiação extraterrestre baseada na posição solar sobre o horizonte e pode ser calculada com precisão recorrendo a fórmulas astrofísicas. A radiação que entra na Terra é então modificada pela topografia do terreno – declive e orientação, bem como efeitos de sombra dos elementos do terreno envolvente. A elevação acima do nível do mar determina a atenuação da radiação pela espessura da atmosfera.

A radiação solar que entra na atmosfera é modificada pelas propriedades físicas da atmosfera. Os gases e aerossóis aí presentes, atenuam a intensidade da radiação de forma que a parte desta que atinge o solo (ou elementos da superfície) é muito inferior à radiação incidente.

De acordo com a figura 2.15 (balanço global da radiação solar que incide na Terra), 28% da radiação global total é devolvida ao espaço por reflexão da radiação directa e difusa da Terra e da atmosfera. A esta quantidade chama-se “albedo planetário”, α_{pl} .

A quantidade de radiação solar de pequeno comprimento de onda que atinge a superfície da Terra corresponde em média a 50% da radiação solar incidente. Desta, parte é radiação directa e parte é indirecta. 3% desta é reflectida directamente através do albedo da superfície, α_s . A outra metade da radiação solar é retida na atmosfera por uma série de processos e nunca atinge o solo.

A radiação solar que atinge a superfície da Terra passa por um conjunto de processos físicos de atenuação.

a) Dispersão

A dispersão da radiação solar é causada pela presença de partículas ou de moléculas de gás de grandes dimensões presentes na atmosfera. Estas partículas interagem com a radiação electromagnética e fazem com que a esta seja desviada do seu caminho original. A dispersão depende do comprimento de onda da radiação, da abundância de partículas ou gases e da distância percorrida pela radiação através da atmosfera. Na atmosfera, podem ocorrer dois tipos de dispersão, a de Rayleigh e a de Mie. A dispersão de Rayleigh ocorre quando a radiação tem um comprimento de onda muito superior ao raio das partículas (ou conjuntos de moléculas) presentes na atmosfera (e.g. átomos atmosféricos e pequenas moléculas). Neste caso a dispersão dá-se de forma equivalente em todas as direcções. A dispersão de Mie ocorre quando a dimensão das partículas é superior ao comprimento de onda da radiação (e.g. nuvens).

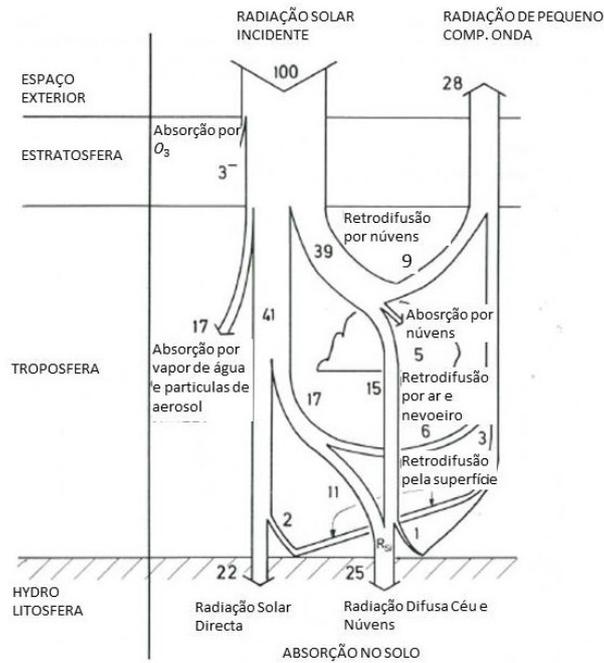


Figura 2.15 - Fluxo de radiação solar de pequeno comprimento de onda que incide na superfície da Terra [Bullrich, 1982].

b) Absorção

A absorção por gases atmosféricos é selectiva para comprimentos de onda específicos bem conhecidos. A tabela 2.5 apresenta algumas substâncias absorvedoras e os correspondentes intervalos de comprimentos de onda.

Tabela 2.5 – Intervalos de absorção para alguns constituintes da atmosfera [Bullrich, 1982].

Substância absorvedora	Comprimento de onda [μm]
O ₃	<0.30; 0.4-0.7; 9.6
O ₂	0.69; 0.76; 1.25
Vapor de H ₂ O	0.72; 0.81; 0.93; 1.37; 1.85; 2.66; 5-8; >15
(H ₂ O) _x	8-13
CO ₂	1.46; 1.6; 2.0; 2.7; 4.2; 13-17

Ao contrário da dispersão, a absorção deve-se à conversão irreversível da radiação em calor. A absorção é mais ou menos significativa de acordo com o comprimento de onda do espectro de radiação. A radiação atenuada pela atmosfera que não é reflectida, difundida ou absorvida, e que atinge directamente o solo, é denominada de *Radiação Directa* e provém exclusivamente do disco solar. A radiação difundida que atinge o solo (e os elementos presentes na superfície da Terra, e.g. prédios) é denominada de *Radiação Difusa* e a pequena parte da radiação que é reflectida pelo solo é denominada de *Radiação Reflectida*. O conjunto destas três componentes da radiação dá origem à *Radiação Global* [Hofierka e Suri, 2002].

Radiação solar directa

Díaz et al. [2012] desenvolveram um método para estimar as componentes da radiação global tendo como base uma malha de cálculo com elementos triangulares, cujo método utilizado para o cálculo das três componentes da radiação solar se apresenta de seguida por se

considerar suficientemente claro no que respeita aos conceitos que são aplicados a este tipo de análise. Considere-se a constante solar fora da atmosfera à distância média solar, I_0 , com o valor 1367 W/m^2 . Devido à excentricidade da órbita da Terra, é necessário aplicar um factor de correcção ϵ para o cálculo da irradiância extraterrestre.

$$G_o = I_0 \epsilon ; \quad (2.68)$$

onde ϵ depende do ângulo diário. A irradiância directa normal ao feixe solar, G_{b0} (W/m^2), é atenuada pelos constituintes da atmosfera e é calculada através de:

$$G_{b0c} = G_o \exp\{-0.8662 T_{LK} m \delta_R(m)\} . \quad (2.69)$$

O termo $-0.8662 T_{LK}$ é o factor de turbidez atmosférica de Linke corrigido, de acordo com Kasten [1996]. O índice c assinala o cálculo da irradiância para a situação de céu limpo. O parâmetro m é a massa óptica relativa e $\delta_R(m)$ é a espessura óptica de Rayleigh para a massa de ar m .

Tendo em conta o exposto acima, a irradiância directa numa superfície horizontal para a condição de céu limpo, $G_{bc}(0)$, vem:

$$G_{bc}(0) = G_{b0c} L_f \sin(\alpha) ; \quad (2.70)$$

onde α é o ângulo de altitude solar e L_f é o factor de iluminação que corrige a irradiância directa à medida que a superfície é iluminada ou sombreada.

A irradiância directa numa superfície inclinada para condições de céu limpo, $G_{bc}(\beta)$ é obtida através de:

$$G_{bc}(\beta) = G_{b0c} L_f \sin(\delta_{exp}) ; \quad (2.71)$$

onde β é o ângulo entre a superfície inclinada e a horizontal e δ_{exp} é o ângulo de incidência solar medido entre a direcção do raio solar e a sua projecção numa superfície inclinada.

Radiação difusa

A estimativa da componente difusa em superfícies horizontais $G_{dc}(0)$ (W/m^2) é efectuada através da equação:

$$G_{dc}(0) = G_o T_n(T_{LK}) F_d(\alpha) . \quad (2.72)$$

Pela equação (2.72) pode ver-se que $G_{dc}(0)$ é função da função de transmissão difusa T_n que ao mesmo tempo depende do factor de turbidez de Linke T_{LK} . Depende ainda da função F_d que por sua vez depende da altitude solar α [Díaz et al., 2012].

Radiação reflectida

A última componente a considerar é a irradiância reflectida pelo solo para condições de céu limpo $G_{rc}(\gamma_N)$. De acordo com Muneer [1997], esta componente é proporcional à irradiância

global horizontal $G_c(0)$, ao albedo médio do solo, ρ_g , e à fracção de solo vista por uma superfície inclinada $r_g(\gamma_N)$:

$$G_{rc}(\gamma_N) = \rho_g G_c(0) r_g(\gamma_N); \quad (2.73)$$

onde:

$$r_g(\gamma_N) = (1 - \cos(\gamma_N))/2; \quad (2.74)$$

e,

$$G_c(0) = G_{bc}(0) + G_{dc}(0). \quad (2.75)$$

2.3 Metodologias de avaliação de recursos renováveis

2.3.1 Potencial Eólico

O vento é usualmente, representado de uma forma adequada à avaliação do seu conteúdo energético pela distribuição de probabilidades de ocorrência de Weibull [Justus, 1980]. A determinação dos parâmetros que permitem definir para cada local, a distribuição de Weibull, carece de valores de velocidade registados na zona em estudo, devido à elevada variabilidade espacial e temporal do vento. No entanto, a realização de campanhas experimentais de medição de vento é morosa (duração mínima de doze meses) e onerosa, verificando-se o recurso a campanhas experimentais praticamente inviável no domínio das microturbinas, já que os custos associados são próximos do investimento numa pequena turbina eólica.

O recurso energético do vento em ambiente urbano é de difícil caracterização devido aos fenómenos locais motivados pela presença dos elementos característicos das áreas urbanas. Por este motivo recorre-se frequentemente a modelação CFD – *Computational Fluid Dynamics* – em zonas de extensão reduzida e/ou ensaios em túnel de vento, para caracterizar o escoamento atmosférico neste tipo de ambientes, [Walker, 2011].

A utilização dos modelos de escoamento potencial em uso no sector eólico [Troen, 1990] não permite descrever os fenómenos tridimensionais do escoamento atmosférico que caracterizam este tipo de ambientes. Assim, a determinação do campo do vento numa área urbana deve ser efectuada com base na resolução das equações de *Navier-Stokes*, normalmente recorrendo ao método RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes* – com fecho de turbulência, sendo esta a metodologia adoptada pela maioria dos modelos CFD [WindSim, 2012], [ESI, 2011], [Meteodyn, 2010].

A maioria dos modelos de simulação especificamente desenvolvidos para a avaliação do potencial eólico recorre ao método conhecido como “Método Clássico” que se baseia na distribuição de Weibull da velocidade do vento.

A lei de distribuição de Weibull exprime-se matematicamente através da expressão:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{A} \left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^k\right); \quad (2.76)$$

onde $f(\bar{u})$ representa a frequência de ocorrência da velocidade média do vento \bar{u} . Os parâmetros A (m/s) e k (adimensional) representam respectivamente o parâmetro de escala e o parâmetro de forma da distribuição de Weibull. Para $k = 1$ a distribuição de Weibull

transforma-se na distribuição exponencial e para $k = 2$ na distribuição de Rayleigh. A figura 2.16 apresenta curvas da distribuição de Weibull para uma velocidade média anual igual a 8 m/s e variação dos valores de k .

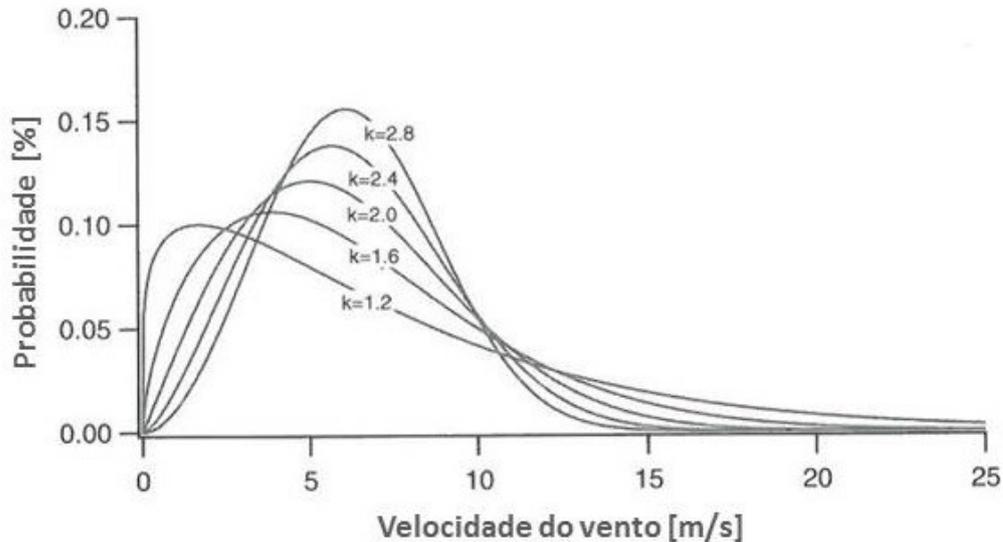


Fig. 2.16 – Distribuição de Weibull para diversos valores de k e velocidade média igual a 8.0 m/s. [Manwell et al., 2002].

A distribuição acumulada de Weibull $F(\bar{u})$ dá a probabilidade da velocidade do vento exceder o valor u e é dada pela expressão:

$$F(\bar{u}) = \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^k\right). \quad (2.77)$$

O fluxo de potência incidente disponível no vento, (W/m^2), é dado por:

$$FPI = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right); \quad (2.78)$$

onde ρ representa a massa volúmica do ar ($1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$ para uma temperatura de 15°C e pressão padrão de 1013 mb) e $\Gamma(x)$ é a função gama dada por:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty \exp(-t) t^{x-1} dt \text{ com } x > 0. \quad (2.79)$$

As velocidades do vento às quais correspondem maiores valores de densidade de potência são dadas por [Troen e Petersen, 1989]:

$$u = A \left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k}. \quad (2.80)$$

Os parâmetros da distribuição de Weibull podem determinar-se com recurso a vários métodos. Uma vez conhecidos o valor médio e o desvio padrão da velocidade do vento, estes parâmetros podem determinar-se através das equações:

$$\frac{\bar{u}}{A} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right); \quad (2.81)$$

$$\frac{\sigma}{\bar{u}} = \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{1/2}; \quad (2.82)$$

onde o desvio padrão pode ser dado por:

$$\sigma = (\overline{u^2} - \bar{u}^2)^{1/2}. \quad (2.83)$$

A este método de cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull chama-se o método da função Gama. Existem outros métodos para a determinação destes parâmetros, sendo um dos mais usuais o método dos mínimos quadrados, aplicado à série de valores da velocidade do vento, [Justus et al., 1978].

Utilizando a curva de potência de uma turbina pode estimar-se a energia produzida pela mesma num determinado local.

As curvas da figura 2.17 apresentam formas semelhantes, podendo ambas ser divididas em intervalos de velocidade de 1 m/s. O cálculo da estimativa anual de produção de energia num local é feita através da integração do produto da função de distribuição do vento, $f(u)$, pela curva de potência de uma turbina eólica, P_{WT} .

$$E_{WT} = t \int_0^{\infty} f(u) P_{WT}(u) du; \quad (2.84)$$

onde E_{WT} é a energia produzida pela turbina, $P_{WT}(u)$ representa a curva de potência da turbina eólica em função de u e t o período de tempo para o qual se pretende obter a energia produzida.

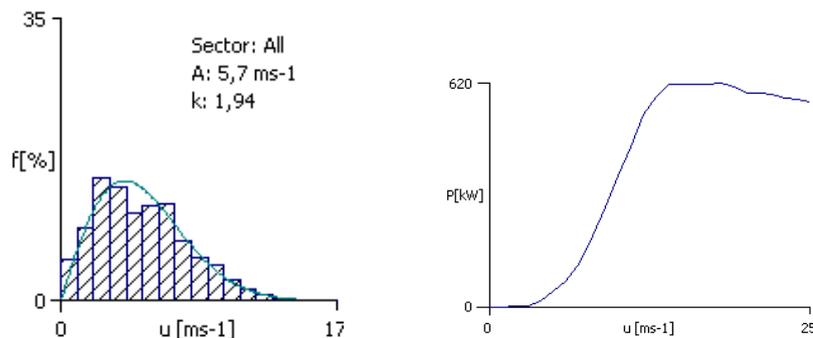


Fig. 2.17 – Distribuição da velocidade do vento e curva de potência de uma turbina.

Para o caso da distribuição de Weibull, a equação 2.84 pode ser escrita como:

$$E_{WT} = t \int_0^{\infty} \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{u}{A}\right)^{k-i} \exp\left(-\frac{u^k}{A}\right) P_{WT}(u) du . \quad (2.85)$$

A avaliação do potencial eólico, pode no entanto, ser efectuada com base em diversos modelos, os quais podem dividir-se em duas categorias, os modelos de microescala e os modelos de mesoscala. Os modelos de microescala podem ainda ser subdivididos em modelos CFD e modelos de escoamento potencial.

Modelos de microescala

Os modelos de microescala são utilizados com frequência em estudos de avaliação do potencial eólico sendo os mais comuns no sector eólico, os modelos de escoamento potencial, ou lineares (e.g. WASP) e os modelos CFD. No caso das zonas urbanas, os modelos lineares introduzem desvios significativos na caracterização do escoamento, uma vez que não têm a capacidade de lidar com os efeitos tridimensionais motivados pelos elementos presentes neste tipo de ambientes. Efeitos como separação do escoamento e forte turbulência são característicos destas zonas e são normalmente bem modelados com modelos CFD.

Modelos de escoamento potencial

Um escoamento potencial é irrotacional e satisfaz a equação de Laplace, i.e., descreve o campo da velocidade como o gradiente de uma função escalar; a velocidade potencial [Li et al., 2010b]:

$$u(\phi) = \nabla\phi ; \quad (2.86)$$

$$\text{rot } u = \text{rot } \nabla\phi = 0 . \quad (2.87)$$

Os campos vectoriais satisfazem a equação:

$$\text{div } u = 0 . \quad (2.88)$$

E o potencial ϕ satisfaz a equação de Laplace:

$$\text{div } u(\phi) = \text{div } \nabla\phi = \nabla^2\phi = 0 . \quad (2.89)$$

Um dos modelos de escoamento potencial mais utilizados no sector eólico para avaliação do potencial eólico e estimativa de produção energética de Parques Eólicos é o modelo WASP – *Wind Atlas Analysis and Application Program* [Mortensen et al., 2007], [Troen, 1990], [Bowen e Mortensen, 1996]. Este modelo foi desenvolvido pelo laboratório RISØ (RISOE) e a caracterização do potencial eólico é baseada no método clássico descrito no ponto anterior.

Os cálculos do modelo são baseados numa combinação de modelos aplicados à camada limite atmosférica. Estes consideram as alterações na velocidade do vento devidas a variações na orografia (e.g. aceleração devido a uma elevação), variações da rugosidade da superfície (efeito do atrito de vários tipos de solo – água, floresta, etc.), ao bloqueio por obstáculos (habitações, pequenas construções ou conjuntos de árvores, formações rochosas, entre outros elementos obstrutivos aos quais é atribuída uma porosidade) e às condições de estabilidade da

atmosfera. Este modelo foi desenvolvido no pressuposto de que a atmosfera é neutra, a variação de cotas do terreno do local de interesse é suficientemente suave para evitar ou minimizar separação do escoamento, que o escoamento é maioritariamente potencial e que o local de origem e o local de destino têm características climáticas semelhantes.

O programa opera através do cálculo de um ficheiro de estatísticas da velocidade do vento obtido a partir de registos locais, que contém informação para várias alturas acima do solo e várias classes de rugosidade para o local onde os dados foram medidos.

Numa primeira fase a série temporal de dados é transformada numa representação estatística do vento através do ajuste de uma distribuição de Weibull atribuindo aos dados os coeficientes de Weibull A e k para um conjunto de sectores de direcção (múltiplo de 2 – habitualmente utilizam-se 12 sectores, mas o utilizador pode definir os que pretender de acordo com a situação que pretende caracterizar). A descrição da orografia, rugosidade e obstáculos existentes no local de origem vai permitir a extrapolação para uma série de alturas acima do solo “corrigindo” os dados dos efeitos do terreno e correspondentes características através da lei do arrastamento geostrófico. A informação resultante é considerada representativa do vento nos níveis de extrapolação como se o local não estivesse sujeito às características do terreno circundante. Esta informação é posteriormente transferida para o local a estudar introduzindo as correspondentes características de orografia, rugosidade e obstáculos. Os obstáculos são modelados pela sua dimensão horizontal, altura e porosidade actuando como barreira ao vento.

Modelos CFD

Os modelos CFD conseguem resolver as equações de Navier-Stokes (N-S) em domínios reduzidos, da ordem das centenas de metros, com elevadas resoluções espaciais na ordem do metro ou inferior e descrevem explicitamente o comportamento do vento em torno e acima de edifícios e estruturas. Resolvem sistemas complexos de equações diferenciais parciais num domínio geométrico dividido em pequenas partes (elementos, volumes,...) – malha de cálculo – permitindo simular o escoamento de fluidos sem recorrer a instrumentação para a medição de diversas variáveis de escoamento nos locais de interesse ou em ambiente de laboratório. Apesar do exposto, existem algumas desvantagens na sua utilização, tais como; elevado custo computacional; a construção da geometria do problema que é frequentemente complexa e de difícil concepção; dificuldade na convergência do modelo gera frequentemente erros nos resultados, e a dificuldade em garantir que os resultados são credíveis quando não é possível a comparação com dados experimentais. Estas desvantagens podem ter um peso significativo na selecção da metodologia a seguir, em especial quando a área em análise é extensa.

Os modelos CFD são classificados em diferentes tipos de acordo a forma de resolução das equações e especialmente dependendo da forma como a turbulência é representada [Martilli et al., 2007].

A forma mais precisa para modelar numericamente o escoamento de um fluido é através de “simulação numérica directa” (DNS – *direct numeric simulation*), que envolve a discretização das equações numa malha de cálculo com dimensão inferior ao comprimento de escala de Kolmogorov (dimensão dos vórtices mais pequenos no fluxo turbulento, 0.1mm a 1 mm para o vento). Assim, este tipo de simulação tem como objectivo modelar a escala completa das flutuações estatísticas da turbulência em todas as escalas físicas relevantes. Infelizmente, na prática, a modelação com esta discretização exige elevados custos computacionais, razão pela qual é comum recorrer-se a modelos de turbulência para modelar a componente não linear das equações de Navier-Stokes. No entanto, a modelação DNS é frequentemente utilizada como ferramenta básica de investigação para compreender os mecanismos fundamentais da turbulência com o objectivo de estabelecer uma base de dados de informação para usar no

melhoramento de aproximações de nível inferior tais como LES – *Large Eddy Simulations* e modelos de turbulência para simulações RANS [Hirsch, 2007].

As aplicações dos CFD a escoamentos em ambiente real, na natureza ou em aplicações tecnológicas, requerem a capacidade de lidar com escoamentos turbulentos. Desta forma é necessário ter em conta os efeitos da turbulência no escoamento médio, o que requer modelos aproximados, sendo que os DNS não são opções de curto-prazo. Assim, em alternativa, actualmente existem duas famílias de modelos; os LES e os RANS, já mencionados nesta dissertação. Os LES, são da mesma categoria que os DNS e resolvem directamente as flutuações turbulentas no tempo e no espaço, mas apenas até um determinado comprimento de escala. Abaixo desta escala, denominada *subgrid scale*, a turbulência é modelada através de leis semi-empíricas. Os RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*, ignoram as flutuações turbulentas e têm como objectivo calcular apenas o escoamento médio turbulento. Estes modelos são, actualmente, os mais utilizados [Hirsch, 2007].

De uma forma geral, a resolução de um problema com recurso a modelação CFD, comporta um conjunto de passos essenciais. Em primeiro lugar é seleccionado o modelo matemático, definindo o nível de aproximação à realidade que será simulado, e posteriormente a fase de discretização que comporta duas componentes principais, nomeadamente, a discretização do espaço definida pela geração da malha seguida da discretização das equações definindo o esquema numérico mais adequado ao problema. O esquema numérico deve ser analisado e as suas propriedades de estabilidade e precisão devem ser estabelecidas. A solução do esquema numérico deve ser obtida seleccionando os métodos de integração no tempo mais adequados, bem como o subsequente método de resolução do sistema algébrico, incluindo técnicas de aceleração da convergência. Finalmente é efectuado o pós-processamento gráfico dos dados numéricos por forma a compreender e interpretar as propriedades físicas dos resultados obtidos na simulação [Hirsch, 2007]. No Anexo IV podem consultar-se outros aspectos relacionados com os tipos de métodos numéricos, esquemas numéricos e tipos de malha de cálculo utilizados na modelação CFD.

Modelos de mesoscala

Os modelos de mesoscala têm como principal objectivo reproduzir em larga escala escoamentos não estacionários. Para tal, têm em conta variáveis como a velocidade do vento, pressão atmosférica, temperatura e humidade [Gasset et al., 2012].

Num contexto de avaliação do potencial eólico, os modelos de mesoscala são capazes de discretizar a evolução espacial e temporal das grandezas meteorológicas para áreas de dimensão considerável, com elevada resolução espacial (e.g. 1×1km), chegando a cobrir um país inteiro. Por este motivo, os modelos de mesoscala desde cedo prometeram ser uma ferramenta adequada à obtenção de estimativas do potencial eólico em regiões de interesse [Kalnay et al., 1996]. Contudo, as dimensões de interesse no estudo da produção energética de turbinas eólicas correspondem a uma escala de dezenas de metros, a qual não é bem descrita por estes modelos. Apesar de o mapeamento do recurso eólico obtido com estes modelos, poder ser utilizado no domínio do ambiente e ordenamento do território, constituindo uma ferramenta valiosa de apoio à decisão de futuros investimentos em campanhas experimentais para caracterização do escoamento atmosférico e de planeamento de redes eléctricas e demais infra-estruturas, a sua utilização isolada na fase de caracterização do escoamento atmosférico para produção de energia pode conduzir desvios significativos nos resultados a obter.

Os seus resultados podem no entanto ser úteis para a introdução em modelos de microescala como parâmetro de entrada, ou como condições iniciais ou de fronteira. Neste trabalho, os dados utilizados nos mapeamentos do potencial eólico foram obtidos no Atlas do Potencial

Eólico de Portugal continental. Este atlas foi desenvolvido com base em modelação de mesoscala com recurso ao modelo MM5.

2.3.2 Potencial solar fotovoltaico

O cálculo do potencial solar é, à semelhança do caso do vento, desejavelmente calculado à custa de medições da radiação solar. No caso presente a inexistência de medidas suficientes impossibilita este procedimento havendo que recorrer a outras fontes ou métodos. As hipóteses existentes para este fim passam pela obtenção de dados de radiação (irradiação, irradiância) de satélite ou gerados através da aplicação de modelos adequados. O recurso a modelos integrados em sistemas de informação geográfica é actualmente prática corrente dependendo do objectivo pretendido. Neste trabalho recorreu-se à ferramenta de radiação solar incluída no programa de informação geográfica ArcGIS [ESRI, 2010]. Esta opção prendeu-se com o facto de se pretender uma metodologia simples e de fácil aplicação que possibilitasse o mapeamento em macroscale dos parâmetros necessários à avaliação do potencial solar de uma dada zona urbana e posteriormente à identificação da capacidade solar fotovoltaica passível de ser instalada na mesma.

A determinação do potencial solar deve ter em conta um conjunto de factores tais como a descrição do local e o seu enquadramento, dados de radiação/meteorológicos, a tecnologia a utilizar (em particular a eficiência dos painéis) e finalmente os indicadores económicos referentes ao caso a estudar [Wittmann et al., 1997]. No que diz respeito à avaliação do potencial solar, de acordo com [Izquierdo et al., 2008] existe um conjunto de variáveis que devem ser analisadas tais como: o potencial físico que se refere à quantidade total de radiação incidente na área em análise, o potencial geográfico que restringe as zonas onde efectivamente se poderão instalar sistemas de captação de energia fotovoltaica e o potencial técnico que como o próprio nome indica se refere às características técnicas do equipamento a instalar (área, rendimento, etc.).

O potencial geográfico é normalmente calculado com base no potencial físico através da aplicação de restrições ao uso de determinadas áreas. O potencial técnico é calculado com base nas características da tecnologia a instalar, como por exemplo, área e rendimento.

O potencial físico é indicativo do limite máximo de energia que pode ser obtido do recurso existente. Para tal torna-se necessário recorrer a dados de radiação que podem ser medidos ou obtidos através de ferramentas disponíveis para este efeito. É ainda necessário conhecer parâmetros como a percentagem de radiação difusa e directa característica da zona em análise para um dado período de tempo. Esta informação pode ser obtida em bases de dados disponíveis ao público como é exemplo PVGIS [European Commission, 2012].

A base de dados PVGIS recorre ao modelo já mencionado neste documento *r.sun*. Este modelo utiliza como dados de entrada informação espacial *raster* facilmente obtida com um sistema de informação geográfica e opera em dois modos distintos. O modo 1 (modo instantâneo) calcula a distribuição espacial da irradiância solar (W/m^2) e o ângulo de incidência dos raios solares ($^\circ$). No modo 2 com base na integração dos valores de irradiância obtidos no modo 1 calcula a distribuição espacial da irradiação expressa em (Wh/m^2) ou o número equivalente de horas de sol num período de tempo definido pelo utilizador [Hofierka e Suri, 2002].

3. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO RECURSO EÓLICO E SOLAR NUMA ÁREA URBANA

A falta de metodologias para a identificação em macroscale do potencial renovável existente nas cidades, que evitem a utilização de sistemas de medição experimentais por longos períodos de tempo, torna os projectos de aproveitamento de energias renováveis para a produção de electricidade onerosos para a maioria dos investidores. A grande maioria das metodologias existentes para a caracterização do potencial eólico baseia-se na utilização de modelos CFD em áreas reduzidas o que limita a sua aplicação a áreas extensas devido aos elevados custos computacionais envolvidos. Da mesma forma, a construção de geometrias adequadas para a caracterização de cidades inteiras torna-se difícil do ponto de vista do seu desenvolvimento e da obtenção de maquetes digitais 3D contendo o detalhe dos edificios. No que respeita às metodologias para identificação do potencial solar, estas encontram-se actualmente num estado de maturidade avançado como prova o elevado número de ferramentas existentes nas plataformas de informação geográfica. Apesar disso, a sua integração a par da tecnologia eólica não está ainda bem identificada no que respeita ao potencial renovável disponível (ou sustentável) conjunto.

Assim, e face ao exposto, desenvolveu-se uma metodologia de aplicação simples e com recursos facilmente disponíveis que permite a identificação do potencial renovável em ambiente urbano para a instalação de sistemas de produção de electricidade (eólica e solar fotovoltaico).

Este trabalho assenta no pressuposto de que o comportamento do escoamento atmosférico sobre áreas urbanas se assemelha ao que ocorre em zonas com orografia muito complexa. Apesar de se saber que a maioria dos modelos de microscale não lidam de forma correcta com este tipo de orografias, considera-se possível definir coeficientes de correcção espacial que corrijam os mapeamentos do vento obtidos com este tipo de modelos de forma a aproximá-los tanto quanto possível de situações reais.

Face ao exposto, a metodologia desenvolvida, baseia-se na geração de uma superfície de cotas envolvente aos edificios de uma dada área urbana, que em termos práticos constituiu um modelo digital de terreno “urbano” – MDT-U, o qual é posteriormente tratado como se fosse um terreno com orografia muito complexa. A avaliação do potencial eólico e correspondente mapeamento são então efectuados por aplicação de um modelo computacional para terrenos complexos que no caso presente assenta na tipologia de modelos CFD (e.g. WindSim). Estes modelos, quando desenvolvidos especificamente para aplicações eólicas, apresentam custos computacionais mais reduzidos que os modelos CFD convencionais, pelo que no caso presente se optou por recorrer a um destes modelos aplicado a terrenos de elevada complexidade em vez de utilizar um modelo convencional de escoamento potencial (e.g. WASP) que apresenta normalmente desvios significativos em terrenos muito complexos.

É, no entanto, necessário referir que, quando se pretende caracterizar o potencial eólico em zonas extensas, principalmente quando a existência de dados de vento é escassa, o mapeamento do recurso eólico pode apresentar zonas com desvios não desprezáveis na velocidade do vento e restantes parâmetros característicos de uma avaliação energética do vento. Assim, e para que se conseguisse definir uma metodologia estruturada e facilmente aplicável a zonas urbanas, optou-se por definir igualmente factores de correcção do mapeamento do potencial eólico de forma a tornar a sua distribuição espacial tão próximo quanto possível da realmente existente.

A definição de factores de correcção é efectuada com base num modelo CFD desenvolvido para ambientes urbanos, no qual se simularam várias zonas das áreas urbanas estudadas de forma a tentar estabelecer um padrão de desvios entre a metodologia proposta e um modelo

adaptado ao ambiente que interessa caracterizar. Em cada zona simularam-se conjuntos de cerca de 50 edifícios.

A altura considerada para a estimativa do potencial eólico foi de 10m acima dos topos dos edifícios. No entanto, várias considerações podem ser feitas em relação a este assunto. Weekes e Tomlin [2013] estudaram a altura acima do edifício para a qual é adequada a instalação de turbinas eólicas. Neste caso particular são apontadas diversas alturas que variam entre 1.3h do edifício e 2h de acordo com a altura relativa do edifício e sua envolvente. Outros autores abordaram também esta questão apresentando uma grande diversidade de conclusões onde a maioria converge no intervalo 1h a 2h como por exemplo no projecto *Carbon Trust* [WindPower, 2012].

No caso da metodologia apresentada neste trabalho, não só seria complexa a atribuição de várias alturas de acordo com cada zona de edifícios, como isso poria em causa a generalização da metodologia a outras zonas geográficas pela imposição de alturas de simulação de acordo com a tipologia da malha urbana. Desta forma, a opção por uma altura padrão constante em toda a área urbana (em zonas livres e urbanizadas) permite a identificação de áreas de interesse e permite ao “planeador urbano” decidir em que área (ou áreas) pode detalhar os seus estudos com vista ao desenvolvimento de projectos desta natureza.

3.1 Avaliação do potencial eólico

O método de avaliação do potencial eólico definido para este trabalho, pressupõe-se adequado à maioria dos utilizadores mesmo aqueles que não se inserem num meio académico ou de investigação. Assim, optou-se por recorrer a modelos de fácil utilização por parte de utilizadores minimamente conhecedores do sector eólico e do comportamento do vento neste tipo de ambientes.

Os modelos seleccionados para este trabalho correspondem a:

1. Modelo CFD desenvolvido para aplicações energéticas no domínio do vento aplicado a orografias com elevada complexidade [WindSim, 2012] – modelo CFD terrenos complexos (CFD-TC);
2. Modelo CFD desenvolvido para aplicações energéticas aplicado a geometrias naturais de edifícios em zonas urbanas e construídas [Meteodyn, 2010] – modelo CFD urbano (CFD-U).

Modelo CFD-TC

O modelo utilizado para terrenos complexos, foi igualmente desenvolvido especificamente para o estudo do potencial eólico e estimativas de produção energética de parques eólicos, assumindo como dados de entrada os mencionados na descrição do modelo de escoamento potencial. Neste caso a malha de cálculo é estruturada e cartesiana.

Este modelo resolve as equações do escoamento médio (RANS) com o método dos elementos finitos, começando com condições iniciais que se referem a estimativas da solução. A evolução da convergência do modelo pode ser visualizada num ponto seleccionado à semelhança da maioria dos modelos CFD disponíveis. Podem ser visualizados os valores dos parâmetros do escoamento e dos resíduos da simulação numérica. As variáveis resolvidas são a pressão, as três componentes da velocidade, a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta.

Este modelo conta com dois tipos de *solver*, *Segregated* e *Coupled*. Uma das desvantagens do primeiro é a dificuldade de convergência do modelo quando se modela um número muito

elevado de células. O *Coupled* (MIGAL) [Ferry, 2002] recorre à técnica de acoplamento – velocidade–pressão e um *solver* linear que actualiza simultaneamente os campos da velocidade e da pressão em todo o domínio. Dado que este é um *solver* linear algébrico, apenas executa a primeira parte da iteração velocidade–pressão e após concluído este processo, o modelo PHOENICS [CHAM Ltd, 2013] completa a parte não-linear da iteração. Em termos de convergência, este *solver* apesar de exigir maior capacidade de armazenamento, converge com muito menos iterações do que o anterior. O processo adoptado por este modelo passa pela execução de diversos módulos cujos modelos incluídos vão sendo operados de forma encadeada até à produção dos resultados.

Modelo CFD-U

Actualmente existem diversos tipos de modelos CFD para estudo do vento muito embora na sua maioria se refiram a aplicações no âmbito da meteorologia urbana e dispersão de poluentes. Tal como já foi referido neste documento, são poucos os modelos disponíveis para aplicações eólicas pelo que surge muitas vezes a necessidade de adaptar os resultados aos objectivos pretendidos. No caso do modelo seleccionado para este trabalho, este problema não se coloca uma vez que a sua aplicação se refere única e exclusivamente ao estudo do vento para produção de energia.

Assim, este modelo resolve as equações RANS com fecho de turbulência onde recorre ao modelo $k - \varepsilon$.

A dimensão do domínio computacional é estabelecida de forma automática para que a distância mínima entre um edifício e uma condição fronteira seja 6 vezes a altura do edifício mais alto da área a simular (em todas as direcções). A grelha é não estruturada e cartesiana (permite sobreposição), com refinamento automático perto do solo, dos edifícios e dos pontos onde se pretende obter resultados. A geração automática da grelha permite ao modelo lidar com as situações mais complexas sem a necessidade de efectuar ajustes, como é o caso de muitos códigos de dinâmica computacional de fluidos.

Para além do exposto, este modelo recorre ao método dos volumes finitos para resolver as equações que regem o fluido e gera automaticamente as condições fronteira.

A condição fronteira na zona de entrada do escoamento no domínio de cálculo é normalmente denominada de “*Inlet*” onde o perfil da velocidade média no domínio de simulação é dado pela lei logarítmica na camada de superfície e pela função de Ekman [Kalmikov et al., 2010]. Para a interpretação do atrito vertical, a razão adimensional utilizada refere-se ao número de Ekman definido pela equação 2.27 (que se repete em 3.1):

$$E_k = \frac{\nu}{\Omega H^2}; \quad (3.1)$$

onde ν é a viscosidade cinemática, Ω é a velocidade de rotação do fluido e H é a escala de profundidade (ou espessura) do movimento do fluido.

Os perfis do vento são obtidos de acordo com um vento de referência teórico e a energia cinética turbulenta é constante e é avaliada em função dos dados de rugosidade do domínio de simulação.

É ainda implementada uma lei do tipo Blasius para modelar o atrito (componentes da velocidade e energia cinética turbulenta) à superfície (solo e edifícios), i.e., as equações diferenciais parciais da camada limite, sobre certas condições (similaridade entre camadas

limite e introdução de uma função de corrente) podem ser reduzidas a uma equação diferencial de 3º ordem.

São ainda aplicadas condições fronteira ao solo (condição *Wall*), fronteiras laterais e de topo do domínio, habitualmente uma condição de simetria (não há escoamento através da fronteira), e à zona de saída do domínio (normalmente uma condição fronteira de pressão – *pressure outlet*).

Método aplicado a avaliação do potencial eólico em ambientes urbanos

O modelo CFD-TC é utilizado para modelar o vento com base na superfície de cotas e o modelo CFD-U para modelar pequenas áreas dentro da zona urbana a caracterizar. Os resultados obtidos com este último modelo servirão para definir factores de correcção a aplicar aos mapeamentos obtidos por aplicação do primeiro modelo e assim obter um mapeamento final do potencial eólico numa zona urbana.

Como dados de entrada em cada um dos modelos, recorreu-se ao atlas do potencial eólico de Portugal continental desenvolvido em 2004 no LNEG, que teve como base modelação numérica de mesoscala, a qual permitiu a geração de séries de dados sintéticas de velocidade e direcção do vento em vários pontos da região urbana a estudar. Dado que os modelos de mesoscala tendem a sobrestimar o vento em zonas urbanas, foi desenvolvido no LNEG um atlas do potencial eólico de Portugal Continental para microgeração de electricidade através da instalação de sistemas eólicos [Seabra, 2011]. Assim, e para utilizar séries de dados mais próximas da realidade, os dados do atlas inicial foram calibrados de forma a obter séries sintéticas com características semelhantes (no caso, a velocidade média nos sectores dominantes) às que se obteriam do atlas para microgeração eólica. Esta calibração foi obtida por aplicação da expressão 3.2.

$$v_{calibA_i} = C_{calib} \times v_{Atlas_i}; \quad (3.2)$$

em que v_{calibA_i} é a velocidade de cada registo da série de dados de vento do ponto i obtida do Atlas do Potencial Eólico calibrada com a velocidade média no mesmo ponto do Atlas do Potencial Eólico para Microgeração, v_{Atlas_i} é a velocidade de cada registo da série de dados obtida do Atlas do Potencial Eólico obtida para o ponto i e C é o coeficiente de calibração obtido pela expressão 3.3.

$$C_{calib} = \frac{v_{Mg}}{\bar{v}_{Atlas}}; \quad (3.3)$$

onde v_{Mg} é a velocidade média anual do vento no Atlas do Potencial Eólico para Microgeração (correspondente ao ponto i) e \bar{v}_{Atlas} é a velocidade média anual da série de dados obtida no Atlas do Potencial Eólico no ponto i .

3.1.1 Geração da superfície de cotas

Actualmente, em Portugal e na maioria dos países desenvolvidos, grande parte dos municípios possui planos de ordenamento do território que são, normalmente, efectuados com recurso a tecnologias CAD e a Sistemas de Informação Geográfica – SIG. Para tal, está disponível por vezes, a cartografia das cidades, com maior ou menor detalhe, onde são incluídos os polígonos dos edifícios e respectivas cotas das coberturas. A informação de cotas pode ser apresentada

como atributo dos polígonos ou representada numa camada de pontos cotados coincidentes com o centro dos polígonos que representam os edifícios. No primeiro caso a geração da superfície de cotas é uma tarefa relativamente simples, pois pode através de uma série de processos, ser incluída num eventual mapeamento da orografia da região (método 1). Quando os polígonos não têm atributo de cota (sendo a cota representada por pontos numa camada distinta) o processo pode ser mais complexo e moroso, sendo no entanto sempre possível a execução de uma superfície envolvente aos edifícios e demais elementos característicos das zonas urbanas, mesmo que com menor detalhe.

A geometria dos edifícios e correspondentes cotas é introduzida num sistema de informação geográfica, de forma a se poder efectuar a correspondência entre as cotas dos telhados e os polígonos dos edifícios (caso estes não estejam já associados). Estes são posteriormente sujeitos a um processo de rasterização de forma a transformar a superfície numa grelha de pontos que após associação a uma grelha de orografia dará origem a um modelo de terreno “urbano” – MDT-U (que integra os edifícios e o terreno circundante).

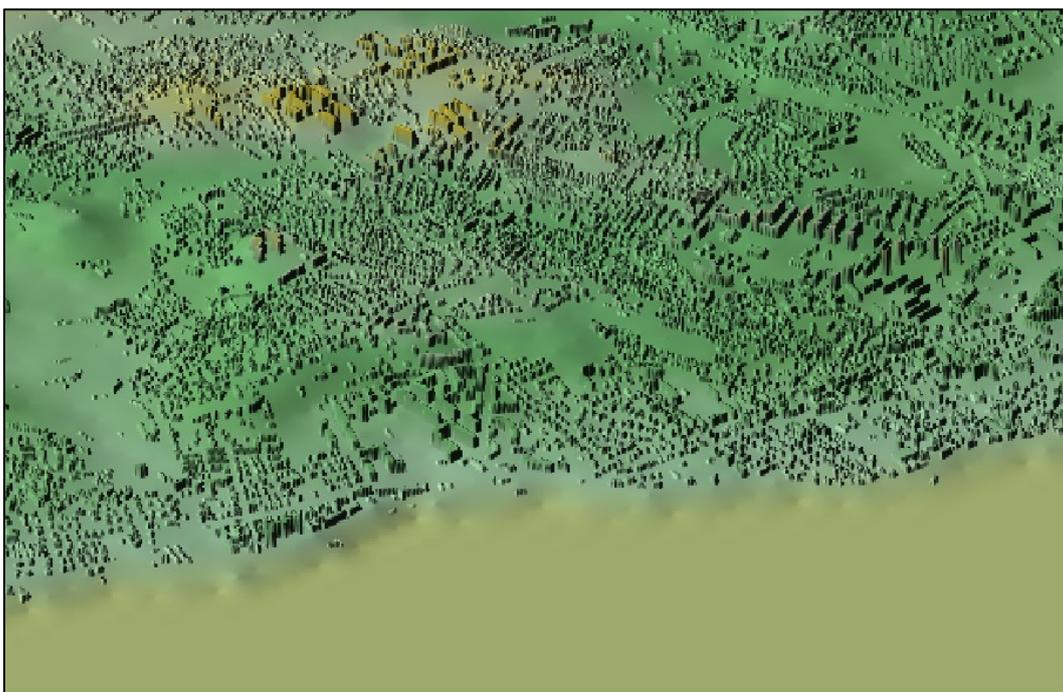


Figura 3.1 – Excerto de mapa de orografia obtido por aplicação do método 1 numa área do concelho de Cascais.

Este método (MDT-U) pode ser aplicado em zonas onde a informação disponível permita atribuir uma cota aos polígonos que representam os edifícios. Sempre que esta informação não esteja disponível na totalidade da área de interesse, mas sim para uma área significativa quando comparada com a área que se pretende estudar, mesmo não abrangendo todos os edifícios, a geração do modelo digital de terreno “urbano” pode ser efectuada com a ajuda de um método de interpolação (e.g. *kiriging*, [Abramowitz e Stegun, 1964], [Cressie, 1990]) sendo que neste caso o detalhe da geometria dos edifícios é mais grosseiro, mas permite, ainda assim, representar de forma aproximada a presença dos edifícios na zona urbana em análise (método 2).

A figura 3.1 representa o MDT-U obtido pela aplicação do método 1 descrito, e como se pode observar o detalhe é muito elevado. Na figura 3.2 o MDT-U é obtido por aplicação do método 2 (para uma zona da cidade de Torres Vedras).

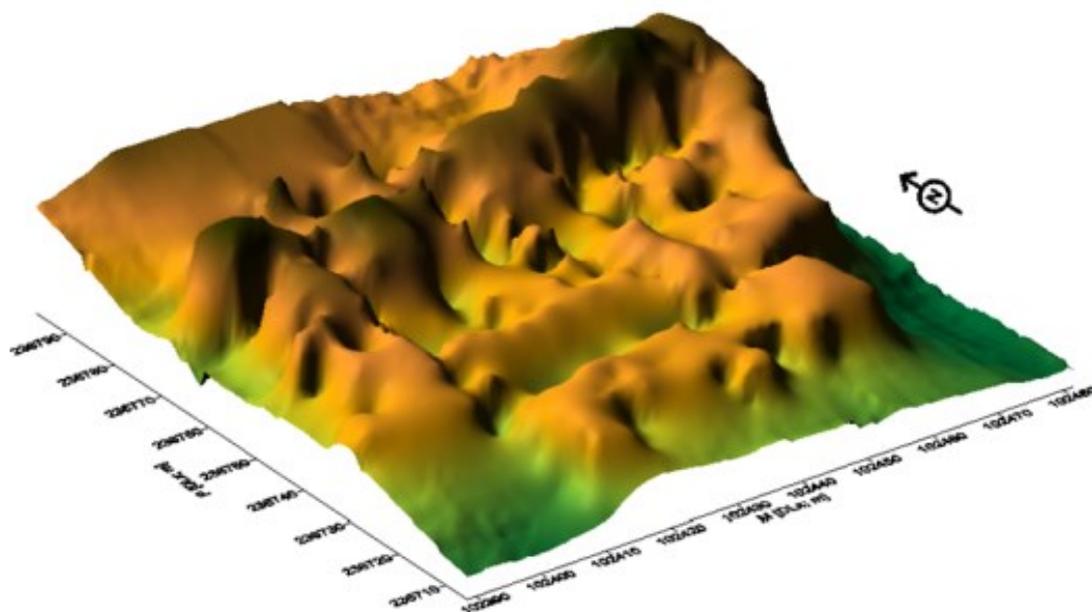


Figura 3.2 – Excerto de mapa de orografia obtido por aplicação do método 2 numa zona da cidade de Torres Vedras.

3.1.2 Factores de correcção dos mapeamentos obtidos por aplicação do método desenvolvido

A geração do mapa final de distribuição espacial dos parâmetros do vento relevantes para a identificação do potencial eólico, deve ser corrigida e validada. Muito embora o pressuposto do método a desenvolver assente na utilização do modelo digital de terreno “urbano”, o resultado final com esta aproximação contará sempre com desvios no potencial eólico em diversas áreas consoante a geometria e concentração do edificado de base. É claro que seria inexequível e fora do âmbito deste trabalho (uma vez que a metodologia proposta se pretende simples e de fácil aplicação), identificar isoladamente todas as áreas em que existem desvios bem como quantificá-los, mas é, no entanto possível aplicar factores de correcção médios de forma a aproximar os mapeamentos obtidos a valores tão próximos quanto possível da realidade.

Assim, a modelação de pequenas áreas com a geometria natural dos edifícios com um modelo CFD, ou preferencialmente a existência de medidas em zonas distribuídas pela zona urbana, devem ser utilizados quer para efeitos de correcção, quer, no limite, para validação dos mapeamentos obtidos.

Recorrendo aos dois modelos CFD-TC e CFD-U, é possível estabelecer factores de correcção dos mapeamentos finais. Há que ressaltar um aspecto importante: na ausência de medidas em quantidade suficiente, a modelação de áreas extensas com modelos CFD aplicados a sólidos, torna-se uma tarefa exaustiva, morosa e nalguns casos inexequível. Assim, neste trabalho, optou-se por modelar pequenas áreas nalguns pontos e efectuar uma comparação entre os resultados dos dois modelos nos topos de alguns edifícios, nas áreas livres circundantes e entre eles. Os factores de correcção podem ser obtidos através da expressão 3.4.

$$F_{corr_i} = 1 - \left(\frac{v_{ref_i}}{v_{model_i}} \right); \quad (3.4)$$

onde F_{corr_i} é o factor de correcção, v_{ref_i} é a velocidade média do vento obtida com o CFD para sólidos ou nos pontos de medida e v_{model_i} é a velocidade média obtida com o método do MDT-U, para o ponto i da grelha de cálculo.

De acordo com a dimensão da área a estudar os factores de correcção podem ser em número maior ou menor. Neste caso, propõe-se determinar um factor de correcção para a totalidade da área estudada. O mapeamento final (cada ponto da grelha de recurso energético) vai ser afectado da média de todos os factores obtidos (equação 3.5).

$$F_{corr} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{corr_i} ; \quad (3.5)$$

onde F_{corr} é o factor de correcção médio a aplicar a todos os pontos da grelha de velocidade do vento da área de interesse e n o número de pontos de teste que serviram de base à determinação dos factores de correcção iniciais.

É de notar que pode ser interessante definir factores médios de correcção para zonas com tipologias diferentes, como por exemplo, zonas com e sem edifícios . Assim, para esta situação, a equação 3.5 pode escrever-se:

$$F_{corr,edif} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{c,edif_i} \quad ; \quad F_{corr,livre} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{c,livre_i} ; \quad (3.6)$$

onde $F_{corr,edif}$ é o factor de correcção médio obtido para a área ocupada pelos edifícios, $F_{corr,livre}$ é o factor de correcção obtido para a área livre de edifícios. O método foi apresentado para a velocidade do vento, mas pode igualmente ser aplicado a outros parâmetros do vento, tais como, fluxo de potência incidente, parâmetro A da distribuição de Weibull ou energia produzida. A figura 3.3 apresenta o esquema ilustrativo da metodologia proposta para avaliação do potencial eólico.

Os mapeamentos finais do potencial eólico são obtidos por aplicação da metodologia inerente ao modelo CFD-TC, i.e., a resolução das equações RANS do escoamento atmosférico num contexto de escoamento incompressível estabelecidas no capítulo 2 (2.34 e 2.35) e que se repetem em 3.7 e 3.8 recorrendo ao modelo de turbulência $k - \varepsilon$ modificado (RNG) como fecho do sistema de equações.

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad (3.7)$$

$$-\frac{\partial(\rho \bar{u}_j \bar{u}_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + f_i = 0. \quad (3.8)$$

A informação sobre o vento (velocidade e direcção) é inserida no modelo na forma de distribuição de frequências de ocorrência de classes de velocidade e direcção do vento, de forma a normalizar e “escalar” o campo do vento para que os resultados não sejam apenas baseados nas condições fronteira, tornando os mapeamentos finais mais próximos da realidade do local. O cálculo da energia pode, posteriormente ser calculado com base nos mapeamentos do campo do vento (em particular nos parâmetros A e k da distribuição de

Weibull) e na curva de potência de uma turbina eólica através da expressão 3.9 (2.85 no capítulo 2).

$$E = t \int_0^{\infty} \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{u}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{u^k}{A}\right) P_{WT}(u) du . \quad (3.9)$$

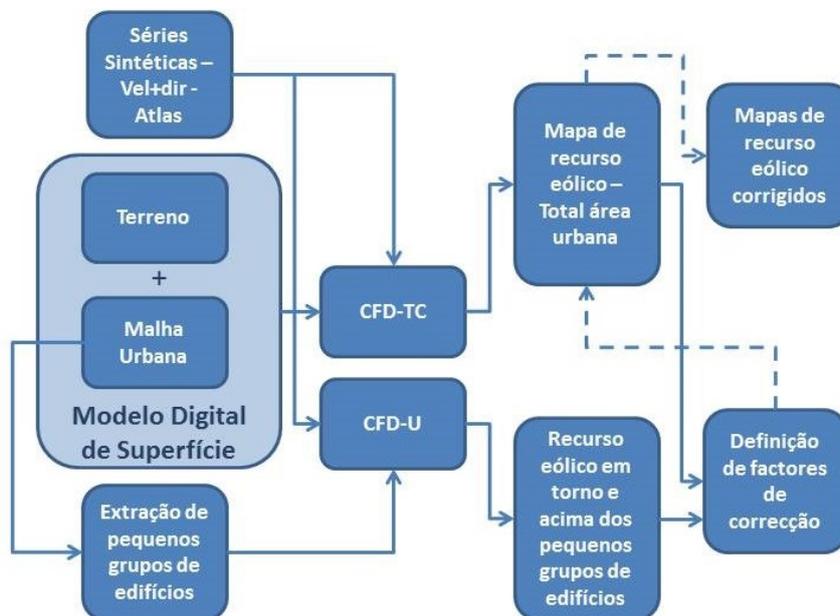


Figura 3.3 – Esquema ilustrativo da metodologia de avaliação do potencial eólico de uma área urbana.

3.2 Avaliação do potencial solar

A avaliação do potencial solar é feita com base numa ferramenta incluída no Sistema de Informação Geográfica que determina para cada ponto de uma grelha de pontos com informação de altitude a radiação solar global, as componentes de radiação directa e difusa e o nº de horas de sol numa dada área de interesse. Esta ferramenta necessita apenas da informação de altitude de cada ponto da grelha de terreno e da latitude local para obter os resultados pretendidos. É no entanto possível fornecer como dado de entrada adicional a percentagem de radiação difusa na área em análise.

Modelo de radiação solar

Neste trabalho, recorreu-se às ferramentas disponíveis num sistema de informação geográfica – ArcGIS [ESRI, 2012] – para o cálculo do potencial solar. Esta opção prendeu-se com a actual acessibilidade deste tipo de ferramentas o que se enquadra nos objectivos deste trabalho, i.e., desenvolver metodologias de aplicação simples e de baixo custo.

Este sistema de informação geográfica inclui um modelo de radiação que permite mapear e analisar os efeitos da radiação solar sobre uma dada área geográfica para períodos de tempo específicos. São tidos em conta efeitos atmosféricos, latitude e altitude do local, declives e orientação sectorial (“aspecto”), deslocações sazonais do ângulo solar e sombreamentos provocados pela topografia local. Os resultados podem facilmente ser introduzidos noutras plataformas SIG ou em modelos numéricos para diversas finalidades.

De uma forma geral a radiação directa é a componente mais expressiva da radiação total seguida da radiação difusa. A radiação reflectida constitui geralmente apenas uma pequena

percentagem da radiação total, excepto para locais rodeados por superfícies altamente reflectoras, tais como coberturas de neve. A ferramenta de cálculo da radiação incluída no Sistema de Informação Geográfica não considera a componente reflectida da radiação solar, sendo a radiação total calculada à custa da soma das componentes directa e difusa.

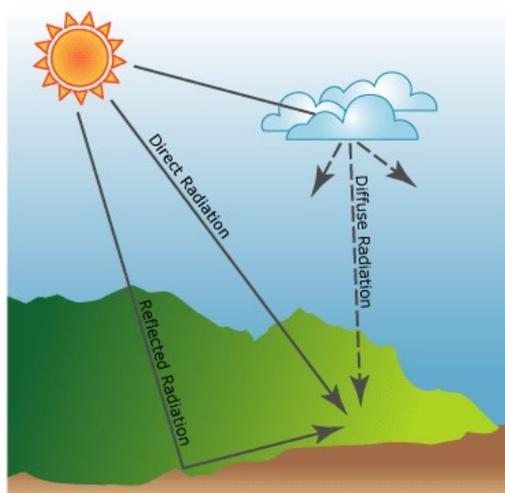


Figura 3.4 – Componentes da radiação solar.

As ferramentas disponíveis actuam para pontos específicos ou para áreas geográficas e envolvem os seguintes passos:

1. Cálculo de uma calota de vista hemisférica, baseada na topografia local (*viewshed*).
2. Sobreposição da calota de vista num “mapa de sol” (*direct sunmap*) para estimar a radiação solar directa.
3. Sobreposição da calota de vista num mapa de céu difuso (*skymap*) para estimar a radiação difusa.
4. Repetição do processo para todas as localizações de interesse para produzir um mapa de irradiação.

A radiação pode ser muito afectada pela topografia e pelas características da superfície, pelo que uma componente chave do algoritmo de cálculo exige a geração de uma linha de vista hemisférica ascendente para todas as localizações de um mapa digital de terreno. As linhas de vista hemisféricas são semelhantes a fotografias tiradas de baixo para cima e vêem todo o céu tal como se se estivesse num planetário. A quantidade de céu visível tem um papel importante na irradiação de um dado local. No anexo III é descrito com maior detalhe o método de cálculo dos parâmetros enumerados nos passos 1 a 4, sendo igualmente apresentada uma descrição das equações de análise da radiação solar adoptadas por este modelo.

Cálculo da energia produzida por um sistema solar fotovoltaico

Um dos métodos mais utilizados para o cálculo da energia produzida por um sistema fotovoltaico refere-se mais uma vez ao modelo *r.sun* utilizado na base de dados PVGIS – *Photovoltaic Geographical Information System*. A avaliação do potencial solar nesta plataforma é baseada no pressuposto de que se tem um sistema com 1kWp ligado à rede eléctrica instalado num edifício.

Neste contexto a energia anual produzida por um sistema fotovoltaico, E_{out} (kWh) é dada pela equação 3.10.

$$E_{out} = A_c \eta(t) \int_1^{365} G(t) dt ; \quad (3.10)$$

onde $\eta(t)$ é o coeficiente de eficiência da conversão de energia (ou rendimento do painel fotovoltaico), que depende de diversos factores variáveis no tempo, A_c é a área da superfície ocupada pelas células fotovoltaicas (m^2), $G(t)$ é a irradiância solar (W/m^2) e t é o tempo. A irradiância solar integrada ao longo de um ano permite obter a irradiação solar anual H_{pv} em (Wh/m^2) e o rendimento $\eta(t)$ pode ser substituído pelo rendimento anual η_e [Hofierka e Kanuk, 2009].

$$E_{out} = A_c \eta_e H_{pv} . \quad (3.11)$$

No caso presente a irradiação anual é calculada com recurso a uma ferramenta incluída no sistema de informação geográfica utilizado para mapear a radiação solar na área em análise.

O mapeamento da irradiação foi obtido com recurso ao MDT-U (modelo digital de terreno “urbano” gerado com recurso ao MDT e à malha urbana disponível para a zona a estudar) mencionado anteriormente neste documento. Por forma a complementar e tornar mais preciso o mapeamento da radiação solar na área em análise, consultou-se a base de dados *online* PVGIS para obtenção do valor percentual da radiação difusa para a região em estudo.

4. PLANEAMENTO DO APROVEITAMENTO DE RECURSOS RENOVÁVEIS EM AMBIENTE URBANO: APLICAÇÃO A CASOS DE ESTUDO

Em vários dos estudos encontrados para a avaliação do potencial eólico urbano, é comum o recurso a metodologias baseadas na utilização de modelos CFD tendo como dado de entrada a geometria original dos edifícios. Este processo limita, na maioria dos casos a extensão da zona em análise a áreas reduzidas como referido no capítulo 2 deste documento. Neste caso optou-se por definir outra metodologia de avaliação do recurso eólico urbano tendo como base a geração de um modelo digital de terreno “urbano” que envolvesse a malha urbana de forma a poder modelar uma área mais extensa como se de um terreno complexo se tratasse. Não obstante a utilização de modelos CFD, quer aplicados à geometria natural dos edifícios, quer ao MDT-U, a simplicidade da metodologia desenvolvida pode constituir, por si só, uma mais-valia no domínio da caracterização do recurso eólico em ambiente urbano

Para testar a metodologia desenvolvida, efectuaram-se dois casos de estudo. Para tal recorreu-se à informação de duas áreas urbanas reais, cujas câmaras municipais disponibilizaram informação cartográfica – incluindo geometria dos edifícios com maior ou menor detalhe no que respeita à existência de cotas dos mesmos. Da mesma forma, foi ainda possível instalar sistemas de medida dos parâmetros do vento e da radiação solar global em três zonas urbanas.

O primeiro caso de estudo situa-se no concelho de Cascais, em particular na zona da Ponta do Sal – freguesia de Estoril e na zona do aeródromo de Tires – freguesia de São Domingos de Rana. Neste caso, a Câmara Municipal de Cascais disponibilizou a cartografia urbana e os dados de vento de um anemómetro de copos instalado no aeródromo de Tires com informação de longo termo. Houve ainda a possibilidade de instalar um sensor LIDAR no topo do “Edifício de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal” na Ponta do Sal. A utilização deste sistema reveste-se do maior interesse por permitir a validação dos resultados devido à sua capacidade de medição a várias alturas e também pelo facto de não exigir trabalhos de construção civil para a sua instalação. Não sendo comum a utilização deste tipo de sensores em estudos de avaliação do potencial eólico em zonas urbanas, a sua informação reveste-se de grande valor para a caracterização do potencial em zonas urbanas ao permitir uma correcta representação do perfil de zonas mais baixas da camada limite atmosférica.

O segundo caso de estudo refere-se à cidade de Torres Vedras. Esta cidade encontra-se localizada na denominada zona Oeste de Portugal, a cerca de 15km da costa. A cidade encontra-se rodeada por parques eólicos e, tendo em conta a sua envolvente geográfica, aparenta ter boas condições para o aproveitamento eólico urbano. No que respeita à componente solar, é uma zona relativamente exposta, muito embora se encontre, tal como a maioria das zonas habitadas, nesta região, localizada entre pequenas montanhas (Serra de S. Julião, Serra do Socorro, e zona elevada na direção do mar). Outro motivo que levou à opção por esta cidade, foi o facto de a câmara municipal ter mostrado grande receptividade relativamente a este trabalho e ter, a priori, disponibilizado informação cartográfica da cidade. Foi ainda obtida autorização para a instalação de uma torre anemométrica num edifício camarário que se encontra em funcionamento desde Novembro de 2009.

No que respeita à componente solar, recorreu-se ao modelo digital de terreno urbano gerado para as zonas urbanas em análise e utilizou-se uma ferramenta de radiação Solar do Sistema de Informação Geográfica ArcGIS para obter os mapeamentos da radiação solar global e do número de horas anuais de sol.

Nos capítulos que se seguem apresentam-se os resultados da aplicação da metodologia desenvolvida.

4.1 Resultados da aplicação dos modelos de avaliação do potencial

4.1.1 Eólico

Para a aplicação da metodologia recorreu-se, em ambos os casos, à informação cartográfica digital disponibilizada pelos municípios envolvidos, bem como aos dados do atlas do potencial eólico de Portugal continental, na sua versão original e na sua versão para aplicações de microgeração eólica. Os modelos utilizados referem-se aos CFD-TC e CFD-U descritos no capítulo 2 deste trabalho.

Nos parágrafos que se seguem apresenta-se a aplicação da metodologia desenvolvida para a caracterização do potencial eólico urbano às duas zonas urbanas seleccionadas para este trabalho.

Caso de Estudo A – Concelho de Cascais

No concelho de Cascais, devido à sua dimensão foram geradas nove séries sintéticas de dados de velocidade e direcção do vento em zonas distintas do concelho por forma a obter uma distribuição espacial detalhada do potencial eólico da região.

A tabela 4.1 apresenta a localização das séries sintéticas utilizadas nesta região ilustradas na figura 4.1.

Tabela 4.1 – Pontos utilizados no estudo e respectivas coordenadas.

ID	Longitude (m) D73	Latitude (m) D73
P1-CPS	-107800.8	-107478.2
P2	-107721.9	-102185.2
P3	-113303.4	-101763.7
P4	-116613.8	-193351.2
P5	- 107739.6	- 106207.5
P6	-110237.5	-104835.4
P7	-109029.5	-105187.3
P8	-104814.7	-103747.9
P9-TIR	-106011.7	-103737.3

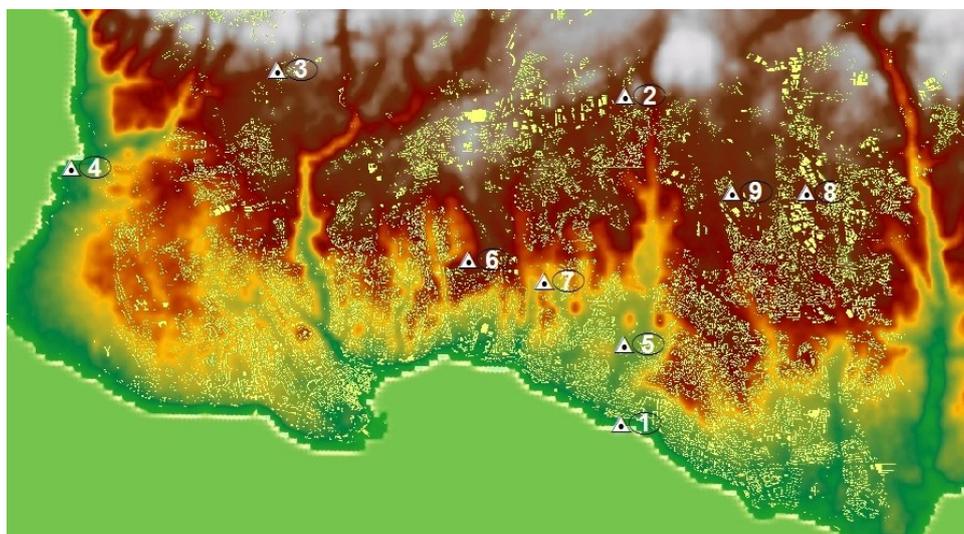


Figura 4.1 - Localização dos pontos obtidos no atlas do potencial eólico de Portugal continental.

A tabela 4.2 apresenta as estatísticas do vento com base nas séries sintéticas geradas para os locais do concelho de Cascais representadas na tabela 4.1 e as tabelas 4.3 as respectivas rosas de ventos e parâmetros da distribuição de Weibull.

Tabela 4.2 – Parâmetros estatísticos do vento das séries sintéticas obtidas no Atlas.

ID	H (m)	M (UTM D73; m)	P (UTM D73; m)	Velocidade média (m/s)	A (m/s)	K (-)	FPI (W/m ²)
P1-CPS	20	-107800.8	-107478.2	5.16	5.80	2.46	132
P2	20	-107721.9	-102185.2	4.95	5.57	2.60	113
P3	20	-113303.4	-101763.7	4.74	5.33	2.62	99
P4	20	-116613.8	-193351.2	5.39	6.06	2.54	148
P5	20	- 107739.6	- 106207.5	5.18	5.83	2.48	134
P6	20	-110237.5	-104835.4	5.47	6.17	2.45	159
P7	20	-109029.5	-105187.3	5.26	5.93	2.46	141
P8	20	-104814.7	-103748.0	5.08	5.72	2.61	123
P9-TIR	20	-106011.7	-103737.3	5.11	5.76	2.48	129

Tabela 4.3a - Rosa de ventos e distribuição de Weibull.

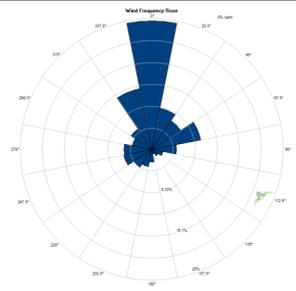
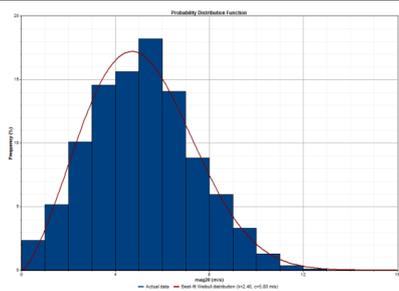
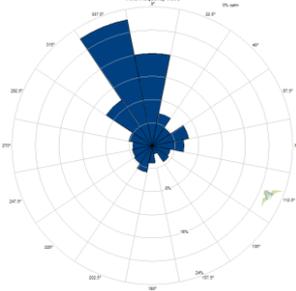
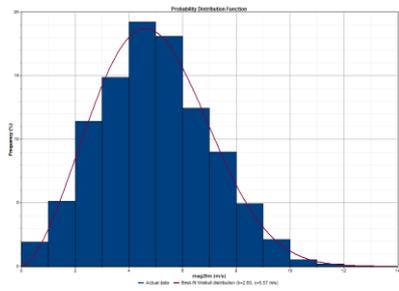
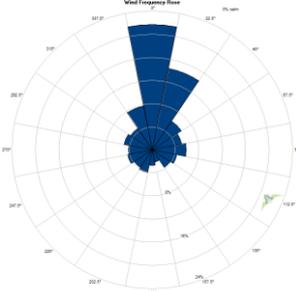
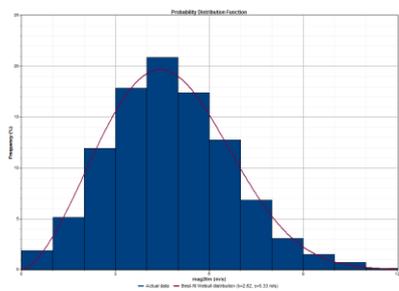
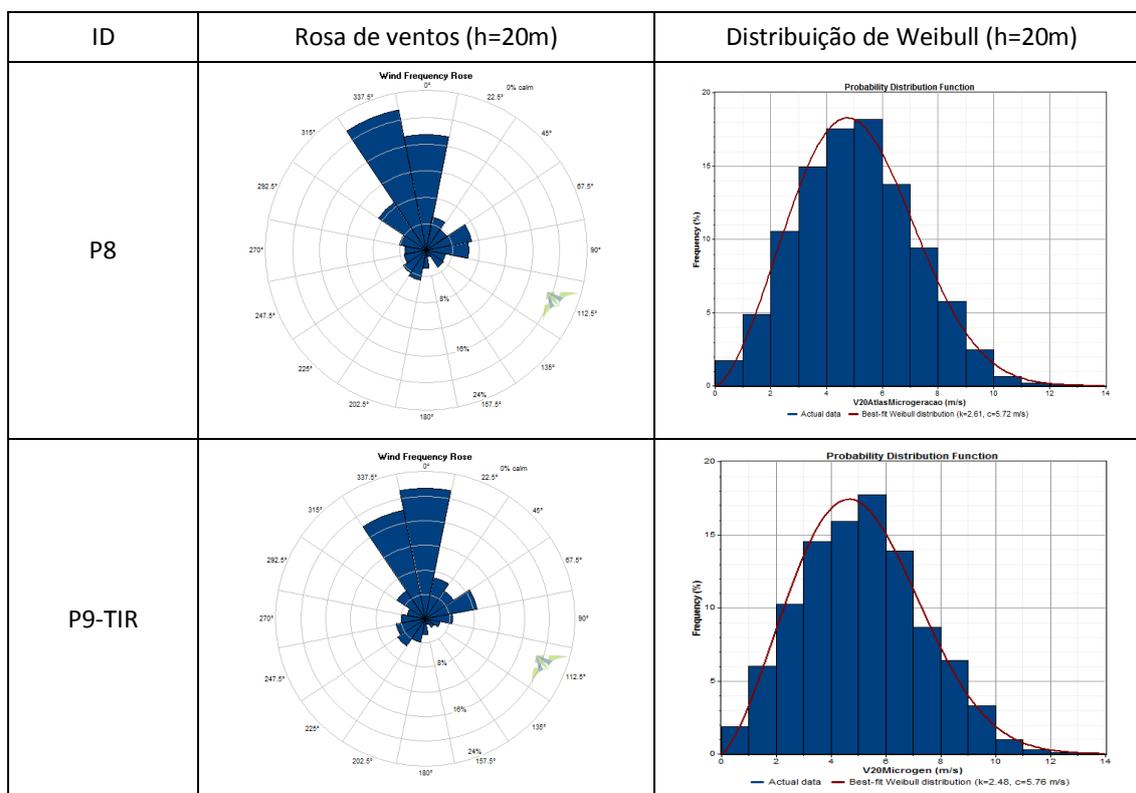
ID	Rosa de ventos (h=20m)	Distribuição de Weibull (h=20m)
P1-CPS		
P2		
P3		

Tabela 4.3b - Rosa de ventos e distribuição de Weibull (cont.).

ID	Rosa de ventos (h=20m)	Distribuição de Weibull (h=20m)
P4		
P5		
P6		
P7		

Tabela 4.3c - Rosa de ventos e distribuição de Weibull (cont.).



No presente caso de estudo foram simuladas duas freguesias do concelho de Cascais – Estoril e São Domingos de Rana – uma vez que foram as zonas urbanas onde se realizaram campanhas experimentais de medição do vento para efeito de validação dos resultados.

Integração da malha urbana

A construção do MDT-U para o concelho de Cascais foi efectuada com a ajuda do sistema de informação geográfica seleccionado para este trabalho. Numa primeira fase obteve-se a cartografia de satélite para a região em análise, tendo esta sido processada e transformada em matriz *raster* (modelo digital de terreno). A informação disponibilizada pelo município de Cascais é constituída por polígonos com informação de altitude do terreno e altura da cobertura dos edifícios. Assim, esta informação foi igualmente “rasterizada” e adicionada ao modelo digital de terreno circundante.

O mapa de satélite foi ajustado à dimensão da matriz da malha urbana disponível e interpolado para um espaçamento entre pontos de grelha igual a 4 x 4 m. Muito embora fosse desejável uma discretização mais elevada (1 x 1 m) para uma melhor descrição da geometria dos edifícios, constatou-se que a área da região é demasiado elevada para poder manusear a representação dessa informação. Ainda assim, os resultados obtidos são aceitáveis para uma avaliação do recurso para efeitos de planeamento que constitui o objectivo deste trabalho. Na figura 4.2 apresenta-se um excerto do modelo digital de terreno obtido para representação da malha urbana.

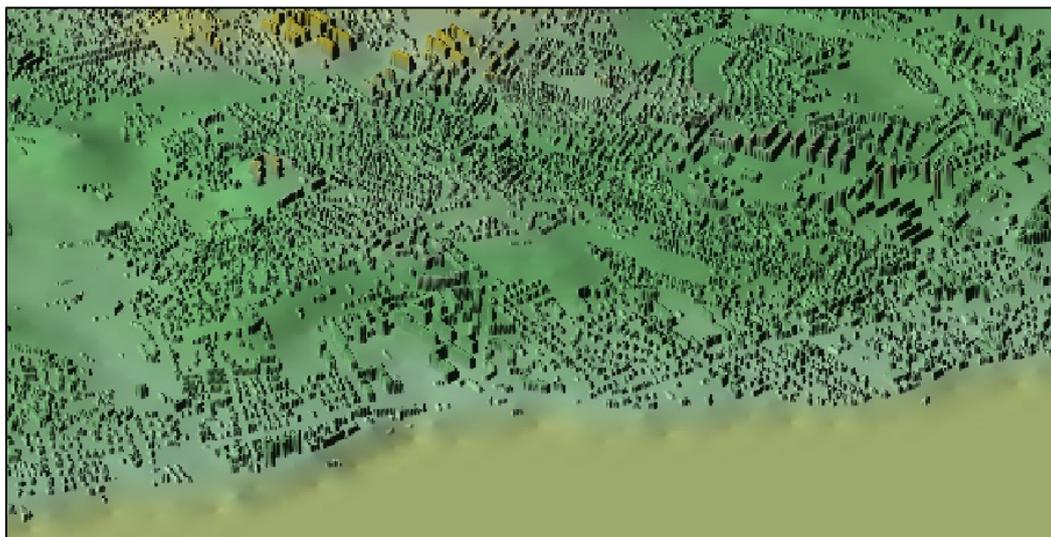


Figura 4.2 - Excerto da malha urbana sobreposta ao terreno (MDT-U) obtida com o SIG para o concelho de Cascais.

Aplicação do modelo CFD – TC à malha urbana no Concelho de Cascais

Para ilustrar a metodologia desenvolvida, estimou-se o potencial eólico nas duas freguesias mencionadas, com uma malha de cálculo com discretização igual a 5x5 m (máxima discretização aceite pelo modelo de simulação para a dimensão da área em análise). Como dados de entrada para construção destes atlas de recurso eólico usaram-se as séries de vento correspondentes aos pontos representados na Tabela 4.2, e ao MDT-U representado na figura 4.2, completado com a rugosidade representativa da área envolvente à malha urbana. No final, obteve-se um mapa compósito da velocidade do vento para diversas alturas acima do nível do solo. As figuras 4.3 e 4.4 representam, a título exemplificativo, o MDT-U dentro dos limites das freguesias estudadas.

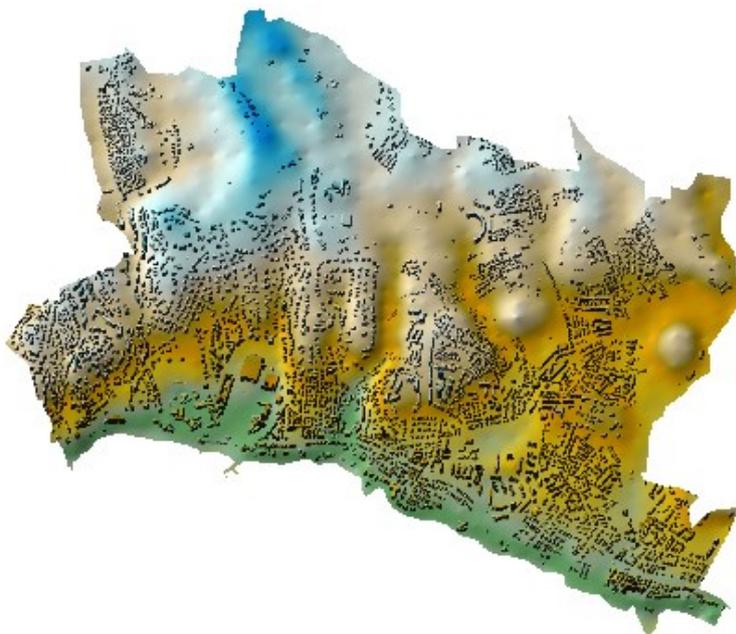


Figura 4.3 – MDT-U dentro da freguesia de Estoril

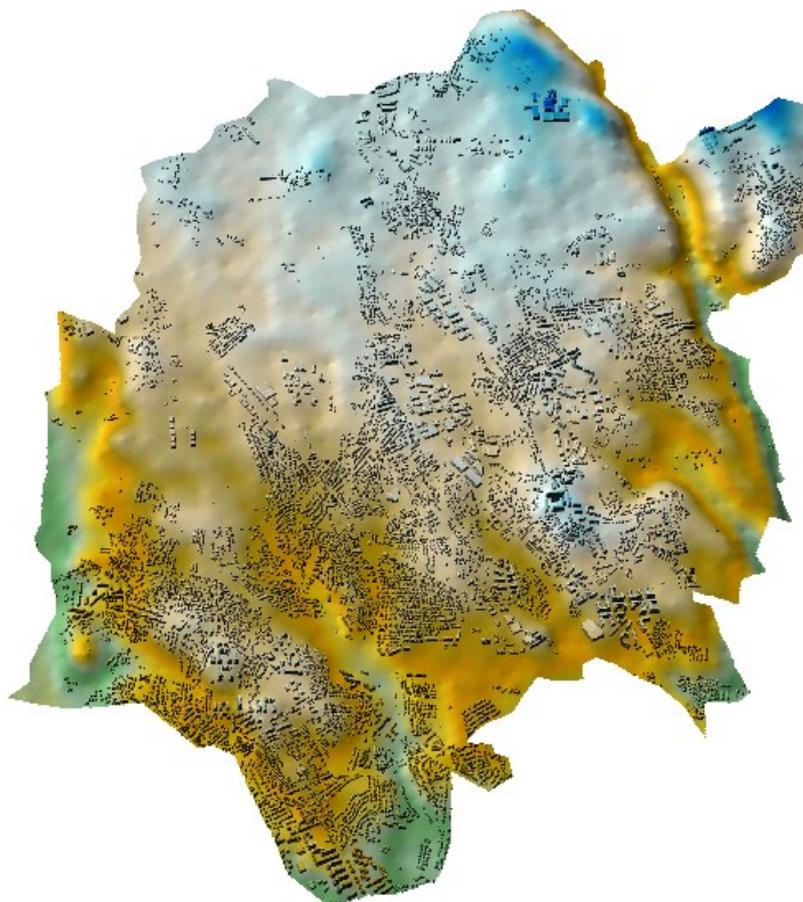


Figura 4.4 – MDT-U dentro da freguesia de São Domingos de Rana

A Figura 4.5 apresenta a distribuição dos pontos contidos nas áreas de cada freguesia. Na Figura 4.5a o ponto P1-CPS, representa a localização aproximada do sistema LIDAR. Na Figura 4.5b, o ponto A1 representa um anemómetro em operação nesta zona (daqui em diante referido como TIRES), e cujos dados são utilizados, neste trabalho, para validação dos resultados obtidos com o método desenvolvido para avaliação do recurso eólico urbano.

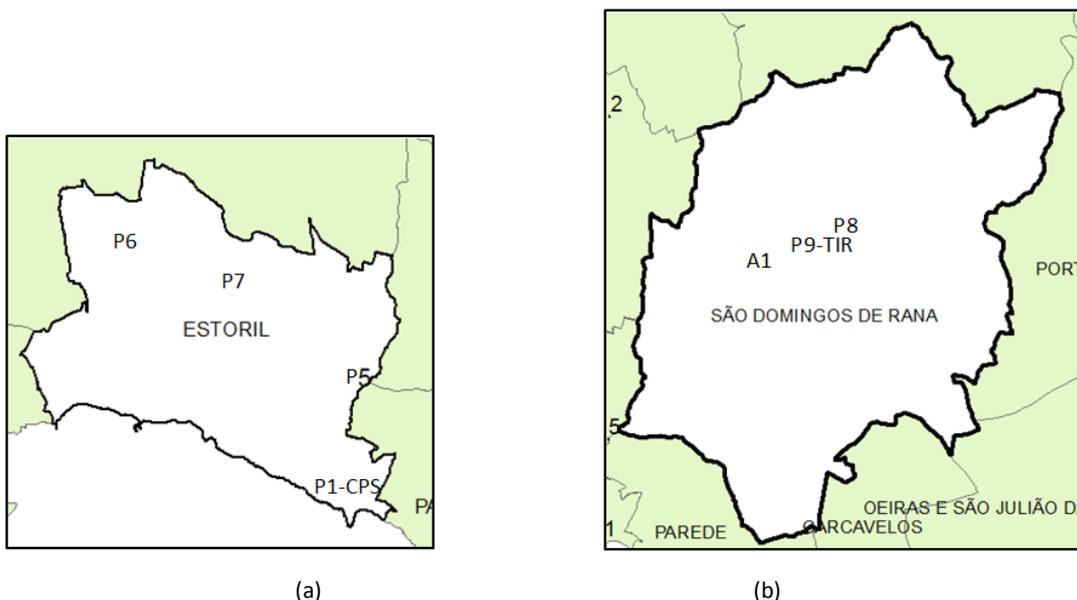


Figura 4.5 - Limites das freguesias de (a) Estoril e (b) São Domingos de Rana e, pontos Atlas e experimentais inseridos nas áreas correspondentes.

Freguesia de Estoril

As figuras 4.6 apresentam a distribuição espacial da velocidade média do vento obtida pelo “método do MDT-U” na freguesia de Estoril para 10 m de altura acima do solo. Refira-se que, de acordo com a metodologia proposta, nos pontos onde se encontram edifícios, “h” representa a cota acima do topo do edifício.

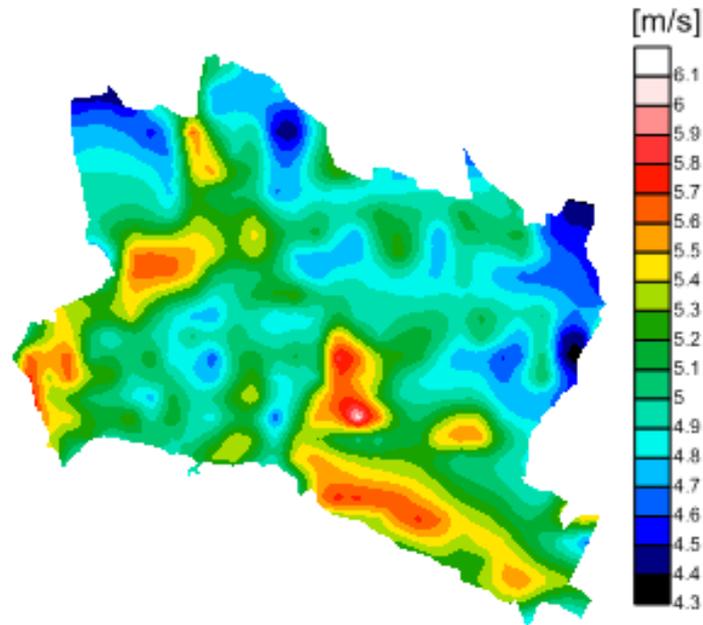


Figura 4.6a - distribuição espacial da velocidade do vento na freguesia de Estoril para h=10m

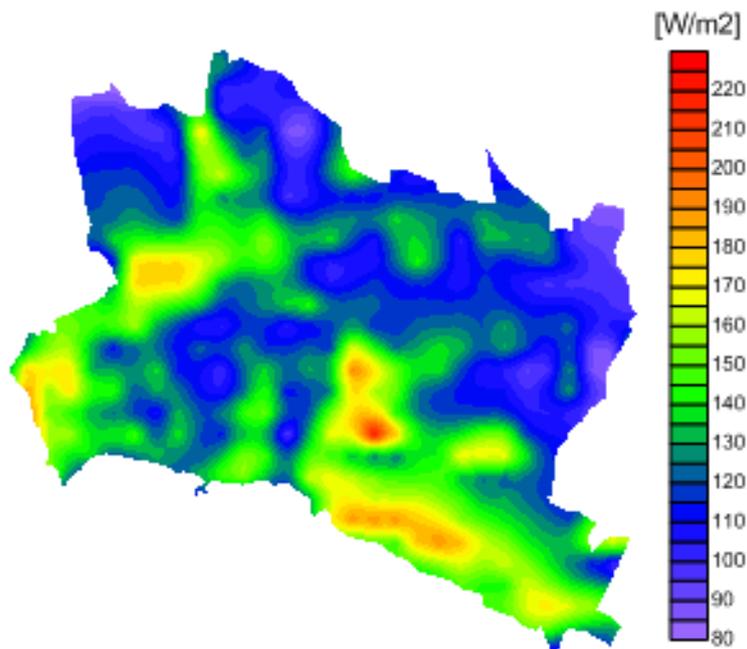


Figura 4.6b - distribuição espacial do fluxo de potência incidente na freguesia de Estoril para h=10m

Freguesia de São Domingos de Rana

Nas figuras 4.7 apresentam-se as distribuições espaciais da velocidade média do vento e do fluxo de potência incidente, (obtidas pelo método do MDT-U), na freguesia de São Domingos de Rana para $h=10$ m de altura acima do nível do solo.

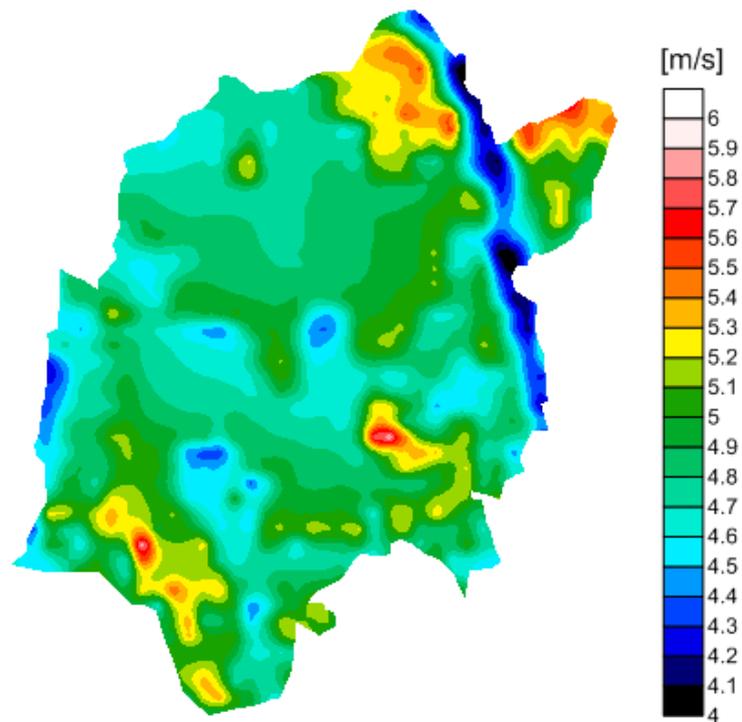


Figura 4.7a - Distribuição espacial da velocidade do vento na freguesia de São Domingos de Rana para $h=10$ m

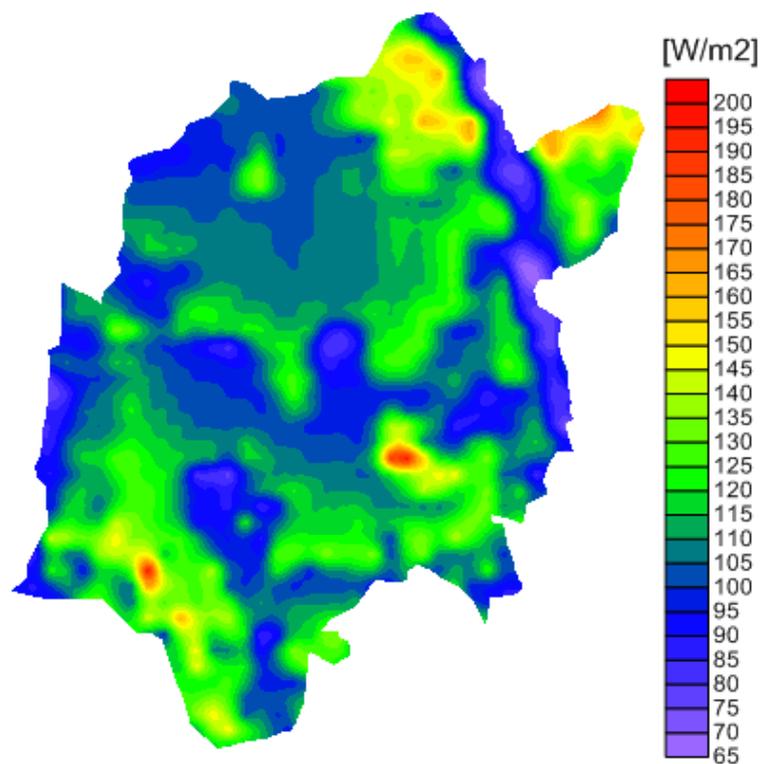


Figura 4.7b - Distribuição espacial do fluxo de potência incidente na freguesia de São Domingos de Rana para $h=10$ m

Em termos globais a freguesia de Estoril apresenta valores de velocidade do vento e fluxo de potência incidente, ligeiramente superiores aos verificados na freguesia de São Domingos de Rana. Para ambas as freguesias estudadas, procedeu-se à simulação de pequenas zonas edificadas localizadas nas zonas onde foram geradas séries de vento sintéticas a partir dos resultados que permitiram desenvolver o Atlas do Potencial Eólico Português. Neste caso, simularam-se três zonas na freguesia de Estoril (P1, P6 e P7) e duas na freguesia de São Domingos de Rana (P9-TIR e P8). Os resultados apresentam-se nos próximos parágrafos.

Aplicação do modelo CFDU a zonas urbanas no Concelho de Cascais

Neste caso recorreu-se ao modelo padrão CFD [Metodyn, 2010] considerando a geometria natural dos edifícios. Os polígonos foram transformados em sólidos tendo como base a volumetria de cada edifício não considerando a inclinação do telhado, para presumir a simplicidade do método. A construção dos sólidos foi efectuada com recurso a um programa de CAD [AutoDesk, 2009]. Como dados de entrada no modelo considerou-se o grupo de edifícios (sólidos) a modelar e um ficheiro de dados com a distribuição de frequências da velocidade do vento por sector de direcção de acordo com os normalmente utilizados em programas de avaliação do potencial eólico. A malha de cálculo utilizada teve para todos os casos de simulação CFD-U, 4 m de espaçamento entre pontos consecutivos da malha de cálculo.

Freguesia de Estoril

Para cada uma das três áreas seleccionadas na freguesia de Estoril (figura 4.8) modelou-se o vento para a altura de 10 m acima do topo dos edifícios considerando a altura média dos edifícios aí presentes. Na área E1 encontra-se representado (com um círculo azul) o edifício onde se instalou um sistema LIDAR. Os edifícios desta área têm uma cota entre 6 e 10m. No caso da área E2, os edifícios têm alturas entre 7 e 10m com excepção de um pequeno grupo de edifícios com alturas na ordem dos 15m. Finalmente, na área E3, as alturas oscilam entre 4 e 8m.

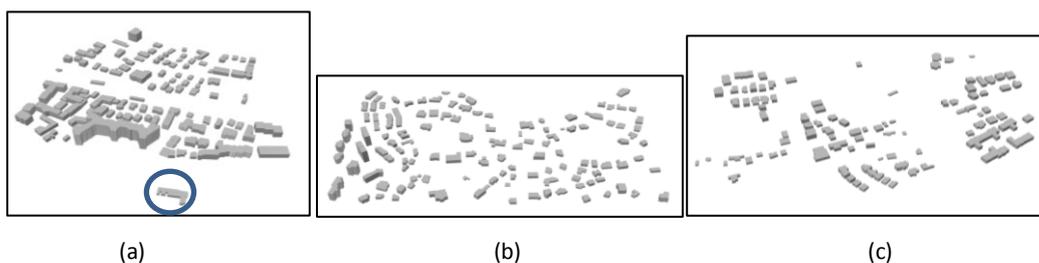


Figura 4.8 Áreas de edifícios modeladas na freguesia de Estoril (a) área E1 (b) área E2 e (c) área E3.

Nas figuras 4.9 a 4.11 apresentam-se as distribuições da velocidade média do vento e do fluxo de potência incidente para $h=10m$ acima da altura média dos edifícios, obtidos com base nas séries sintéticas de velocidade e direcção do vento geradas para P1-CPS, P6 e P7 (áreas E1, E2 e E3, respectivamente).

Área E1

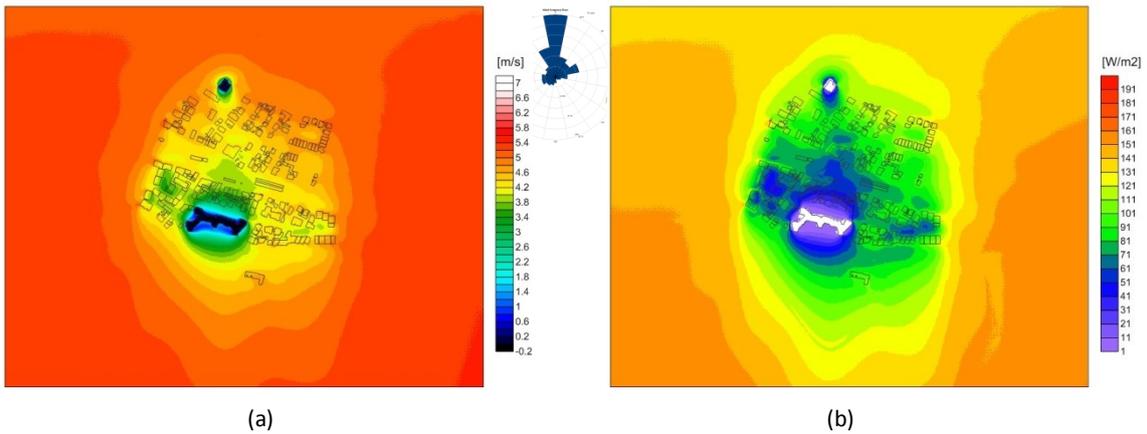


Figura 4.9 Distribuição espacial da (a) velocidade do vento e (b) fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ acima da altura média dos edifícios da área E1.

Área E2

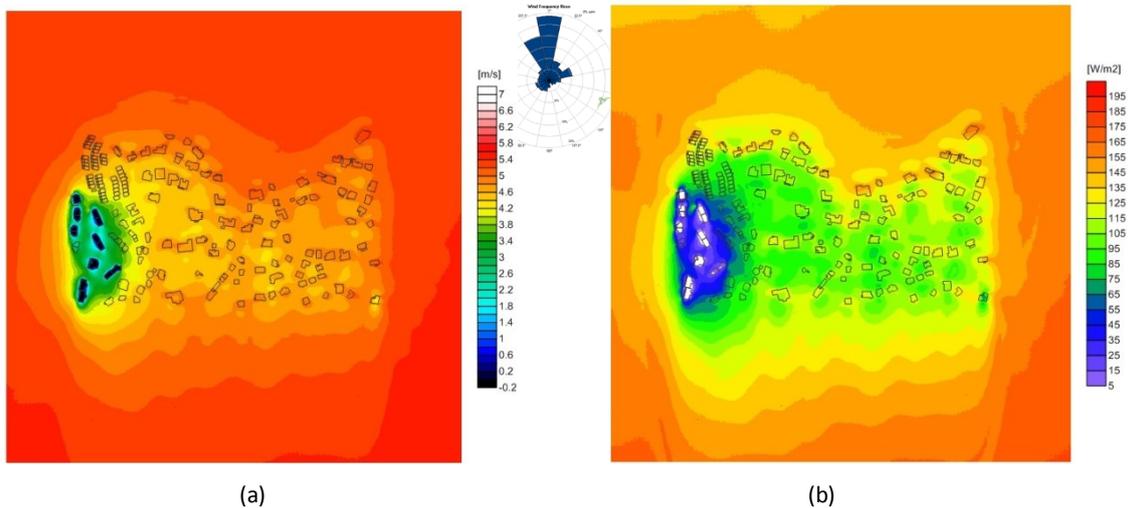


Figura 4.10 Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ acima da altura média dos edifícios da área E2.

Área E3

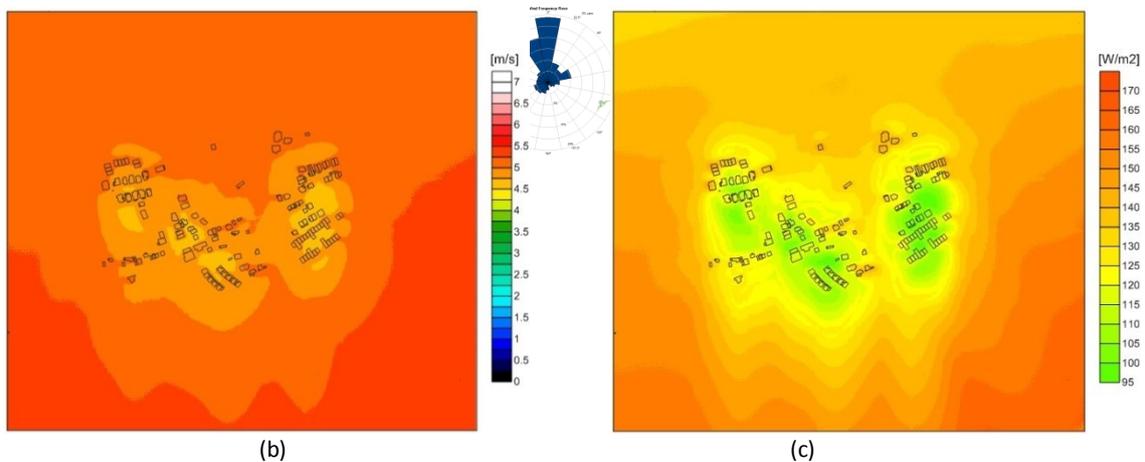


Figura 4.11 – distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para $h=10\text{ m}$ acima da altura média dos edifícios na área E3.

Freguesia de São Domingos de Rana

Nesta freguesia foram simuladas duas áreas tendo como base os pontos P9-TIR e P8, respectivamente para as áreas SD1 e SD2 (figuras 4.12)

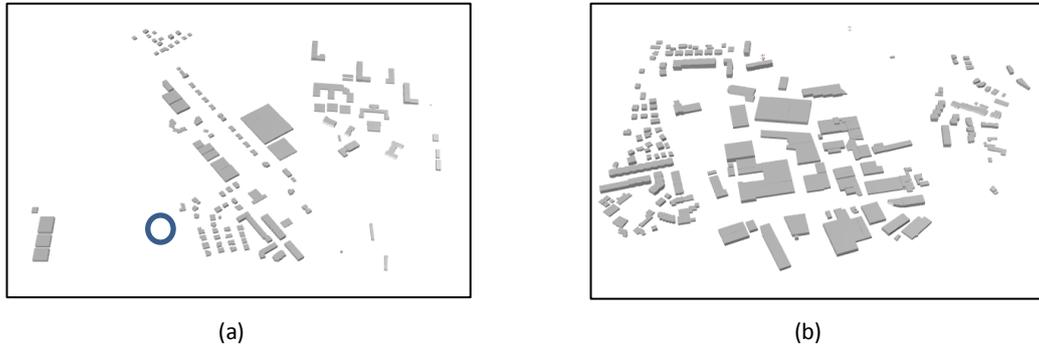


Figura 4.12 Áreas de edifícios modeladas na freguesia de São Domingos de Rana (a) área SD1 e (b) área SD2.

À semelhança do caso da freguesia de Estoril, para cada uma das áreas seleccionou-se um edifício teste e modelou-se o vento para a altura de 10m acima do topo do edifício. No caso da área SD1, a maioria dos edifícios desta área têm entre 3 e 10m, sendo que a altura do edifício seleccionado tem cerca de 6m de altura. No caso da área SD2, a maioria dos edifícios tem alturas entre 6 e 10 m.

Na área SD2 encontra-se instalada uma estação anemométrica com 10m de altura nos terrenos pertencentes ao aeródromo de Tires (A1). Esta estação encontra-se situada num terreno descampado, afastado das pistas de aviação, e com poucos obstáculos em seu redor encontrando-se assinalada com um círculo azul na figura 4.15a.

Nas figuras 4.13 e 4.14, apresentam-se as distribuições espaciais da velocidade média do vento e do fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ acima da altura média dos edifícios.

Área SD1

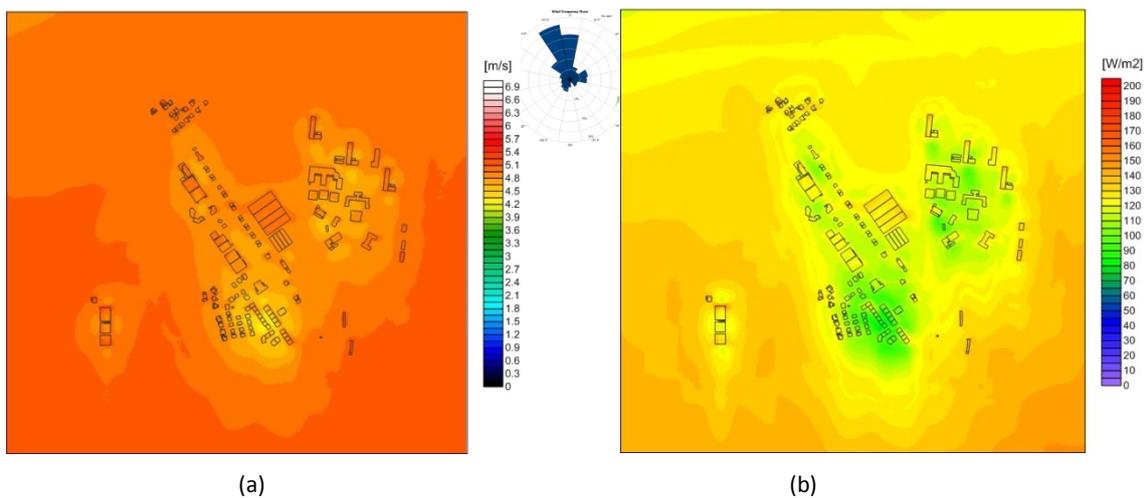


Figura 4.13 – Distribuição da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ acima da altura média dos edifícios na área SD1.

Área SD2

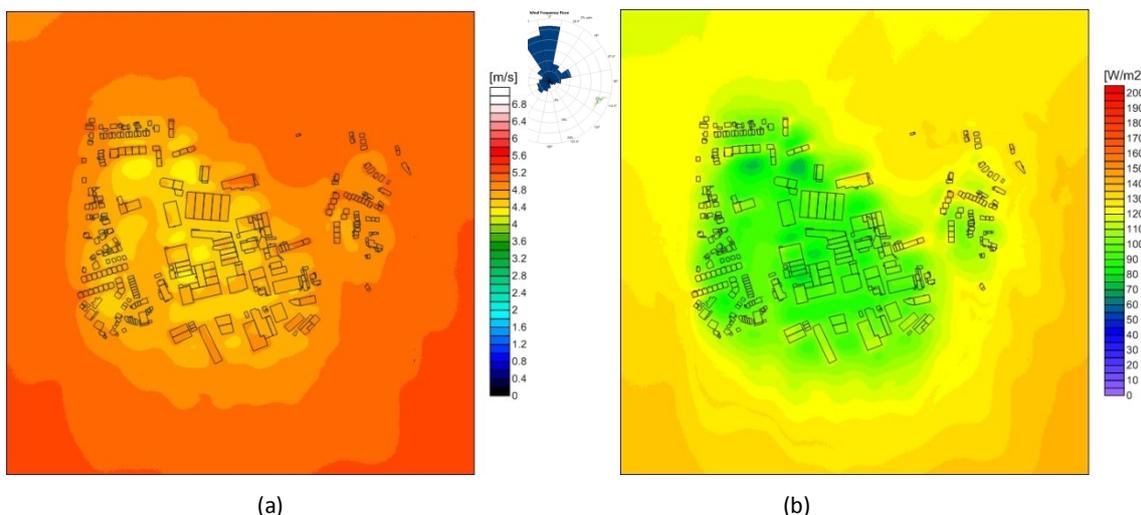


Figura 4.14 – Distribuição da (a) velocidade média do vento para e (b) fluxo de potência incidente para h=10 m acima da altura média dos edifícios na área SD2.

Correcção dos mapeamentos obtidos pelo método do MDT-U

Para corrigir o mapeamento obtido por aplicação do método do MDT-U (aplicação CFD-TC), avaliaram-se os desvios dos valores de velocidade e fluxo de potência incidente, verificados em pontos de teste entre os resultados obtidos com cada modelo (CFD-TC e CFD-U). Seleccionaram-se pontos situados em topos de edifícios e em zonas expostas para identificar factores de correcção a aplicar ao mapeamento global obtido com o MDT-U (modelo digital de terreno “urbano”).

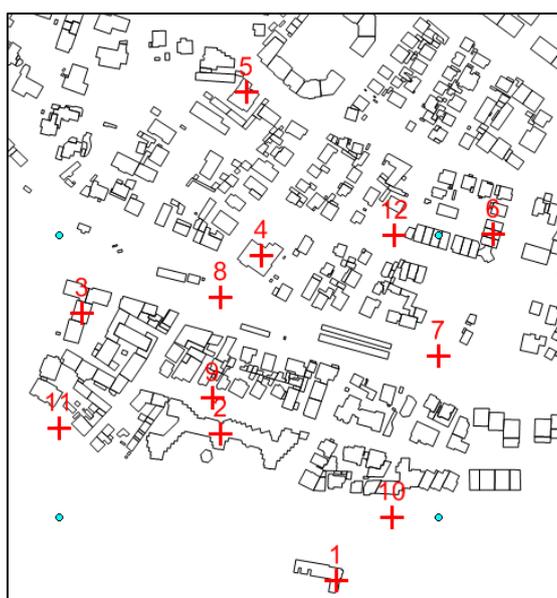


Figura 4.15a – Pontos de correcção do método na área E1 da freguesia de Estoril

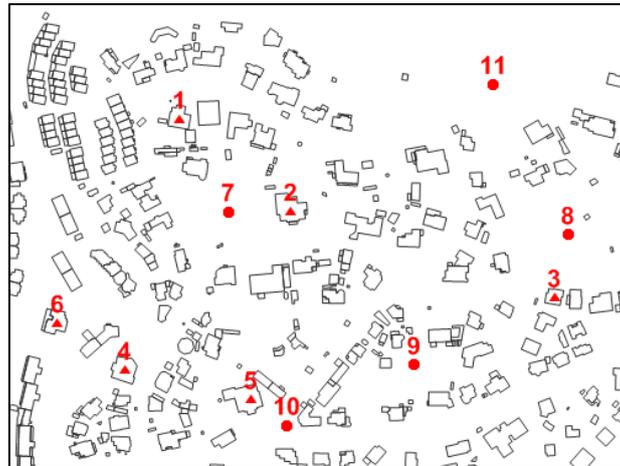


Figura 4.15b – Pontos de correção do método na área E2 da freguesia de Estoril

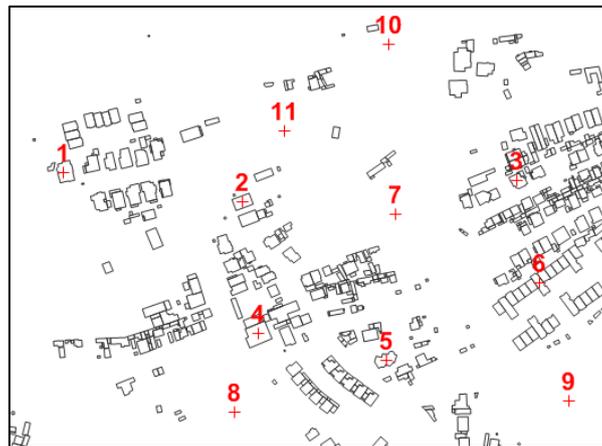
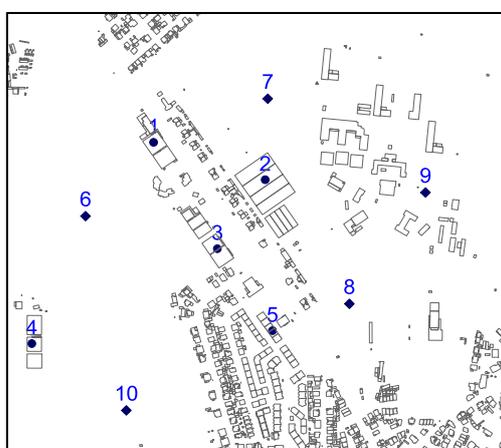
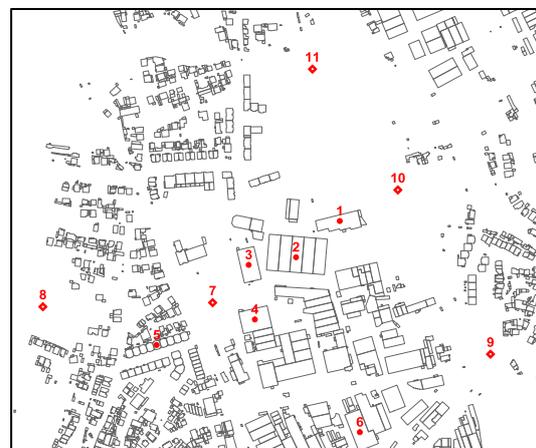


Figura 4.15c – Pontos de correção do método na área E3 da freguesia de Estoril



Área SD1



Área SD2

Figura 4.16 – Pontos de correção do método nas duas áreas da freguesia de São Domingos de Rana.

Na tabela 4.4 ,apresentam-se os desvios verificados nos resultados obtidos por aplicação de ambos os modelos.

Tabela 4.4 – Velocidade do vento nos pontos seleccionados em cada zona em análise (h=10m).

ID	Estoril						S.Dom. Rana			
	Área E1		Área E2		Área E3		Área SD1		Área SD2	
	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC
1	4.7	5.18	5.03	5.53	5.33	4.95	5.16	4.66	5.06	4.45
2	5.11	5.53	5.11	5.64	5.03	4.97	4.14	4.53	4.61	4.52
3	5.29	5.48	5.24	5.36	5.14	4.89	4.66	4.67	4.23	4.75
4	4.65	5.09	4.6	5.52	4.86	4.96	5.1	4.8	4.51	4.72
5	5.69	5.26	5.23	5.44	5.05	4.95	5.06	4.69	4.67	5.02
6	4.9	5.09	5.71	5.4	5.04	4.93	4.72	4.73	4.81	4.6
7	3.79	5.4	4.13	5.65	4.59	4.93	4.63	4.81	4.04	4.87
8	3.37	5.5	4.35	5.42	4.49	5.08	4.52	4.66	4.64	4.86
9	3.38	5.2	4.1	5.4	4.52	5.01	4.85	4.59	4.45	4.72
10	3.46	5.4	4.51	5.35	4.8	4.84	4.73	4.76	4.59	4.47
11	3.77	5.2	4.88	5.47	4.68	4.91	-	-	4.58	4.82

No total analisaram-se 54 pontos de teste, encontrando-se representados no gráfico da Figura 4.17 os valores de velocidade obtidos por cada modelo separadamente. A média dos desvios verificados nas zonas ocupadas por edifícios é da ordem de 2% e em zonas sem edifícios é de cerca de 13%, sendo a média dos desvios obtidos, igual a 6.65%. É de notar que, algumas das áreas estudadas apresentam desvios expressivos, em especial quando se analisam pontos em áreas sem edifícios. Dado que estas são zonas com alguma densidade urbana, é natural que as zonas sem edifícios (intervalos entre edifícios ou ruas) quando modeladas com o método do MDT-U apresentem valores mais elevados de velocidade que os reais, consequentemente com maiores desvios entre os resultados dos dois modelos, um resultado inerente à metodologia definida.

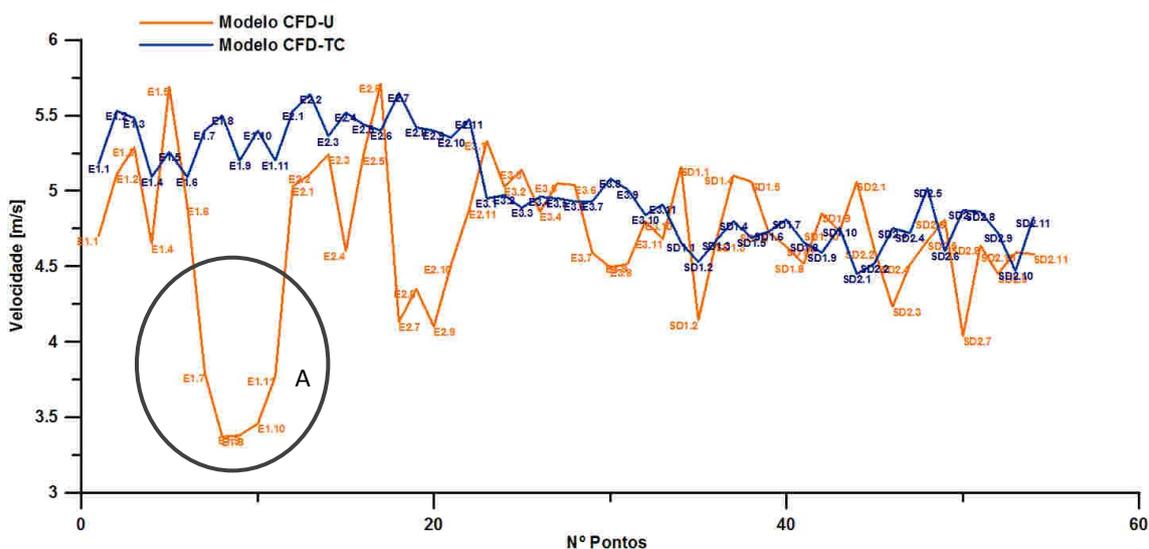


Figura 4.17 – Velocidade média nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos.

A análise do gráfico apresentado mostra que os valores de velocidade obtidos pelo método do MDT-U (CFD-TC aplicado ao MDT “urbano”) se encontram frequentemente acima dos obtidos

quando se modela os edifícios na sua geometria natural. Para além disso, os resultados obtidos com o MDT-U apresentam valores menos variáveis. No gráfico da figura 4.17 podem ainda ver-se valores que se afastam da média dos restantes, como é o caso dos valores representados no círculo A. Esta zona é correspondente à Área E1 da freguesia de Estoril e, entre as simuladas, é a que apresenta maior densidade de edifícios, pelo que, os efeitos provocados pela sua presença não são tão bem representados pela modelação do CFD-TC com o MDT-U. No caso particular dos pontos assinalados como E8 a E9, estes sofrem da influência dos edifícios vizinhos, em especial dos que se encontram nos sectores dominantes. É ainda de notar que esta análise foi efectuada em duas situações distintas, no que respeita ao tipo de terreno. No caso do CFD-TC, é tida em conta a orografia do terreno circundante ao edificado, enquanto que no caso do CFD-U, se considera que o terreno é plano. Apesar de a área simulada pelo CFD-U ser bastante mais reduzida do que no caso da simulação CFD_TC, esta diferença influencia os desvios verificados entre os resultados dos dois modelos.

A mesma análise foi posteriormente efectuada para os mapeamentos de fluxo de potência incidente. Neste caso são esperados desvios significativos entre ambos os modelos, uma vez que este parâmetro depende do cubo da velocidade do vento. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Desvios verificados em pontos de teste nas duas freguesias para o fluxo de potência incidente (h=10m).

ID	Estoril						S.Dom. Rana			
	Área E1		Área E2		Área E3		Área SD1		Área SD2	
	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC
1	102	141	131	167	158	119	133	100	127	84
2	115	169	136	178	129	123	71	91	92	88
3	149	163	149	151	137	115	103	99	74	101
4	98	159	100	165	118	118	131	109	120	99
5	184	145	149	158	132	117	134	102	97	121
6	123	139	190	156	126	118	143	104	106	93
7	53	161	73	178	101	116	133	109	65	109
8	39	165	84	157	91	128	129	99	96	111
9	43	150	73	157	90	124	124	94	85	101
10	44	156	95	150	115	113	148	107	92	87
11	55	145	120	159	106	118	-	-	93	110

Tal como para o caso da velocidade média do vento, o gráfico da figura 4.18 mostra os valores de fluxo de potência incidente obtidos por cada modelo em pontos com edifícios e em zonas abertas, separadamente. A percentagem de desvio médio nos pontos acima dos edifícios é da ordem de -1% e em zonas abertas é de cerca de 23%. O desvio médio verificado é de aproximadamente 10%.

Neste caso, verifica-se uma vez mais que os maiores desvios entre os dois métodos ocorrem nas zonas sem edifícios. Em relação aos valores de velocidade do vento, a tendência apresentada nos valores de fluxo de potência incidente é semelhante, sendo que são amplificados os desvios devido à dependência do cubo da velocidade.

Por forma a aplicar uma metodologia generalizada às zonas urbanas, optou-se por aplicar os desvios médios à totalidade das áreas em análise. Desse modo, foi aplicado ao mapeamento da velocidade do vento em ambas as freguesias o factor de correcção igual a 0.934, e ao mapeamento do fluxo de potência incidente o factor de correcção igual a 0.90, representado nas figuras 4.19 e 4.20, os mapeamentos finais para as áreas estudadas.

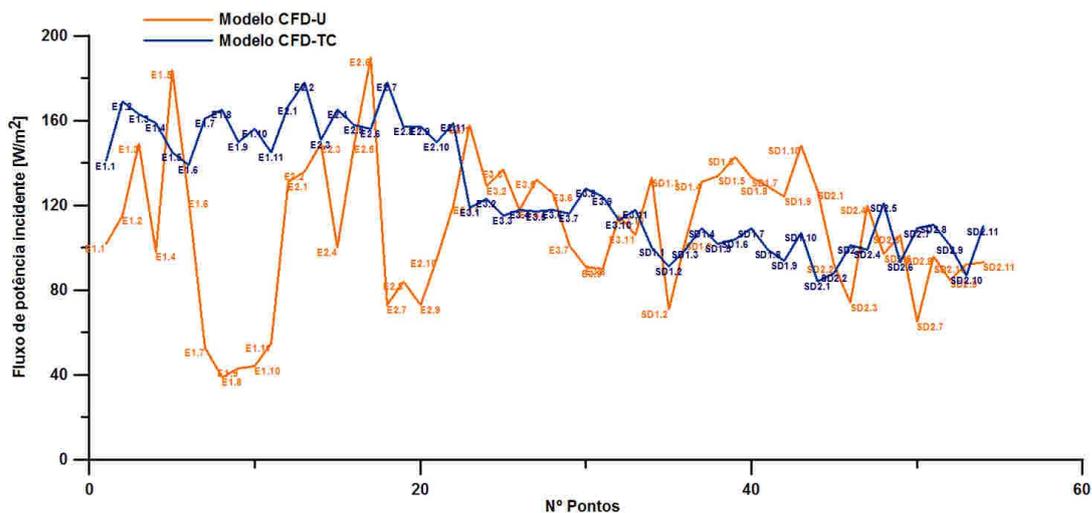


Figura 4.18 – Fluxo de potência incidente nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos.

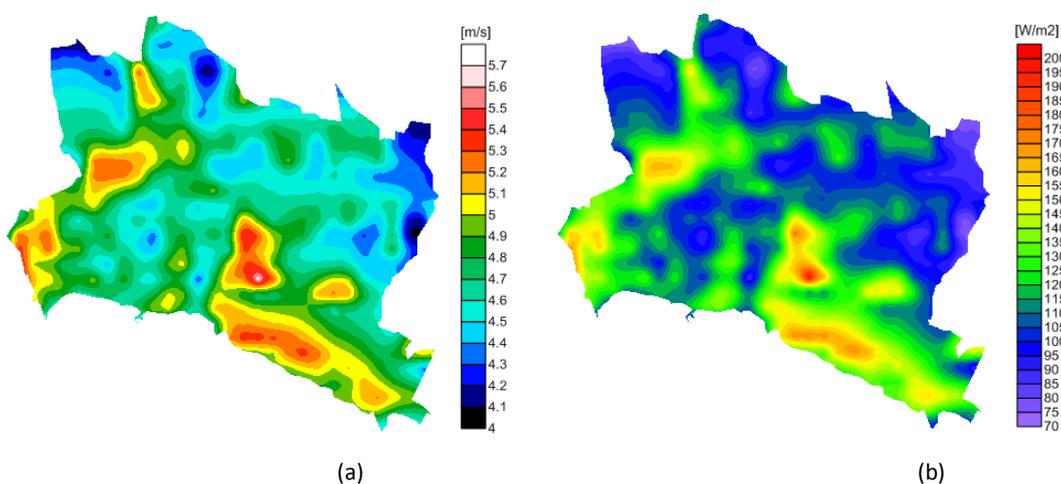


Figura 4.19 – Distribuição espacial da (a) velocidade média e do (b) fluxo de potência incidente para h=10m na freguesia de Estoril, após aplicação dos factores de calibração.

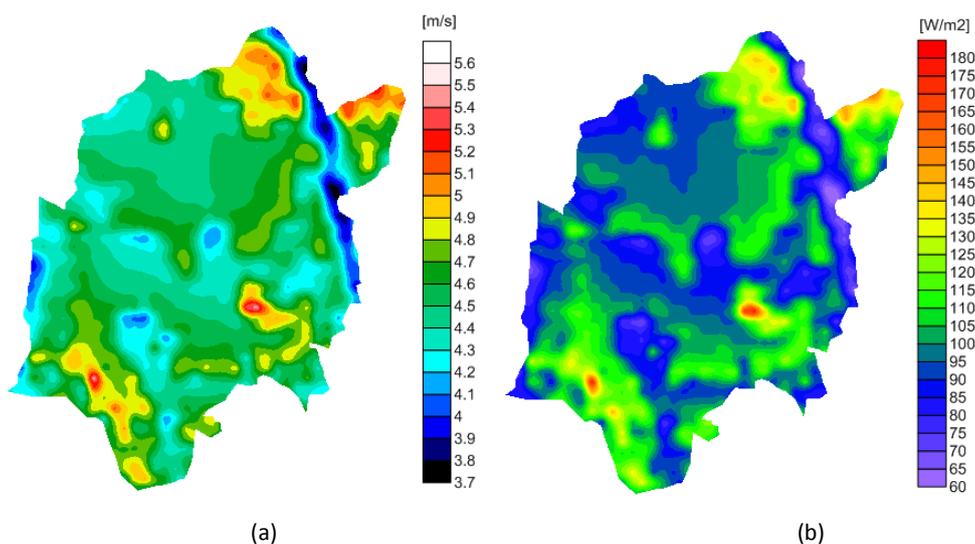


Figura 4.20 – Distribuição espacial da (a) velocidade média e do (b) fluxo de potência incidente para h=10m na freguesia de São Domingos de Rana, após aplicação dos factores de calibração.

Caso de estudo B – Cidade de Torres Vedras

No caso da cidade de Torres Vedras, os polígonos dos edifícios disponibilizados pelas autoridades municipais não possuíam informação sobre a cota das coberturas dos edifícios para a totalidade da área. Assim, com excepção da zona correspondente ao centro histórico, não foi possível efectuar com o detalhe desejado a construção do MDT-U de toda a cidade (modelo digital de terreno “urbano”).

No que diz respeito aos dados de vento foram utilizadas séries sintéticas do atlas do potencial eólico referentes a duas zonas distintas da cidade de Torres Vedras. A primeira situada no centro histórico da cidade, P1-TVDCH, e a segunda numa zona mais a Sul, P2-TVDS.

A figura 4.21 apresenta a localização geográfica dos pontos seleccionados do Atlas do potencial eólico de Portugal.

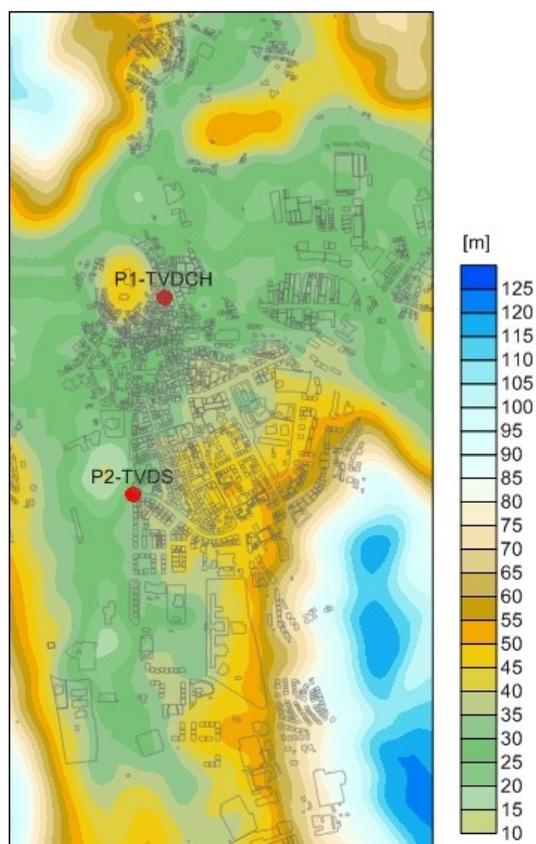
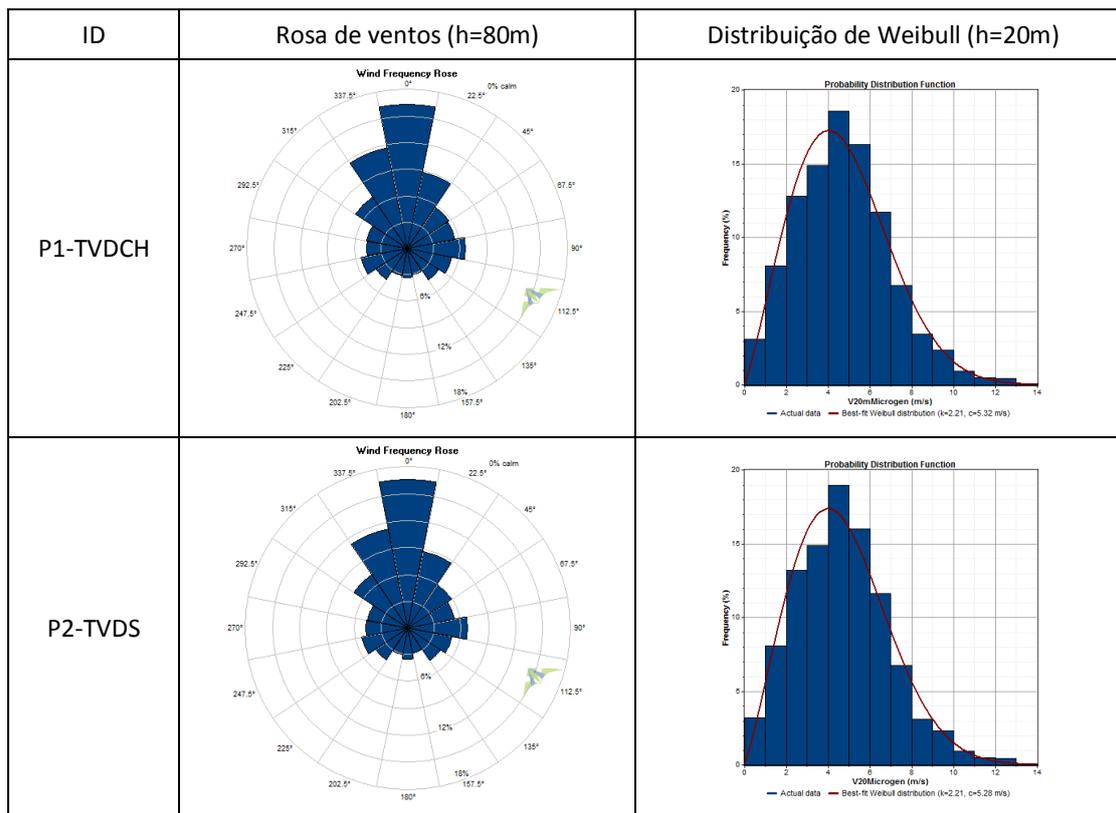


Figura 4.21 – representação do terreno numa parte da cidade de Torres Vedras e localização dos pontos obtidos no atlas de potencial eólico para Portugal continental.

Tabela 4.6 – parâmetros estatísticos do vento nos pontos obtidos no Atlas.

ID	H (m)	M (UTM D73; m)	P (UTM D73; m)	Velocidade média (m/s)	A (m/s)	K (-)	FPI (W/m ²)
P1-TVDCH	20	-97473.8	-63132.5	4.71	5.32	2.21	111
P2-TVDS	20	-97579.1	-63802.1	4.68	5.57	2.60	109

Tabela 4.7 – rosas de ventos e distribuições de Weibull



Os valores de direcção das séries utilizadas neste trabalho referem-se à altura de simulação do Atlas do Potencial Eólico de Portugal continental, i.e. h=80m, não tendo sido efectuadas correcções para h=20m. Na figura 4.2 pode ver-se a representação tri-dimensional da zona do centro histórico da cidade de Torres Vedras.

Integração da malha urbana

A construção do MDT-U para a cidade de Torres Vedras foi efectuada, tal como no caso de Cascais, com base num SIG. Numa primeira fase recorreu-se à cartografia de escala 1:1000 disponibilizada pela câmara municipal de Torres Vedras (curvas de nível e pontos cotados de terreno e telhados dos edifícios). A esta informação juntou-se a cartografia de escala 1:200 (curvas de nível e pontos cotados de terreno, soleira e de algumas coberturas dos edifícios) disponível para o centro histórico da cidade. Toda a informação foi então sujeita a um processo de interpolação pelo método de *kriging* [Cressie, 1990], tendo-se obtido uma grelha de pontos (x,y,z) que serviu para gerar a superfície de cotas envolvendo os edifícios e o terreno circundante. A figura 4.22 apresenta a zona do centro histórico da cidade onde foi possível obter um modelo digital de terreno mais detalhado, o qual foi utilizado na avaliação do potencial solar.

No que respeita ao potencial eólico, e com o objectivo de se representar uma área mais extensa da cidade, esta superfície foi integrada na restante informação cartográfica da cidade que originou o modelo digital de terreno urbano, MDT-U, utilizado no estudo do vento. A figura 4.23 apresenta o MDT-U utilizado no estudo do vento.

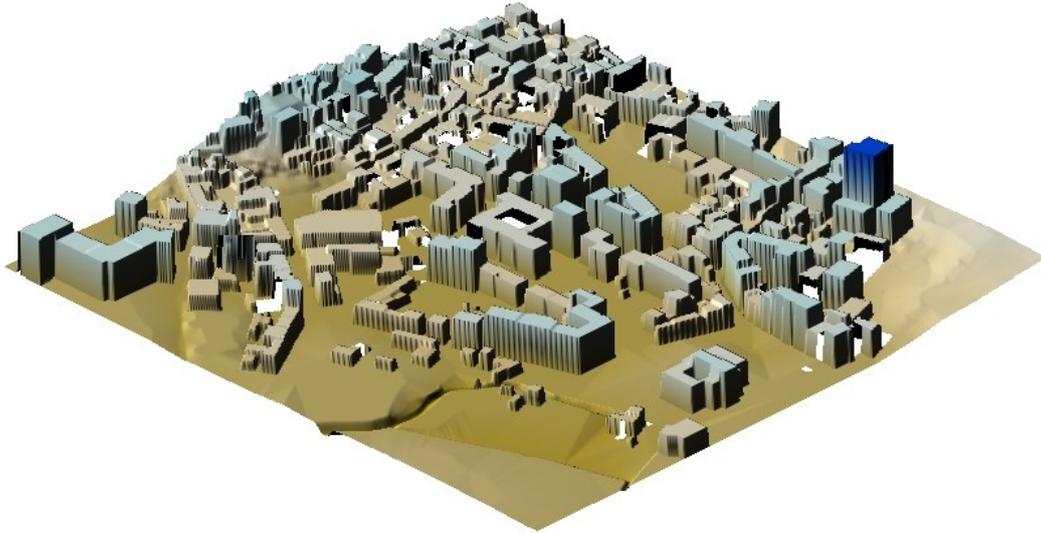


Figura 4.22 – Representação 3D do centro histórico da cidade de Torres Vedras.

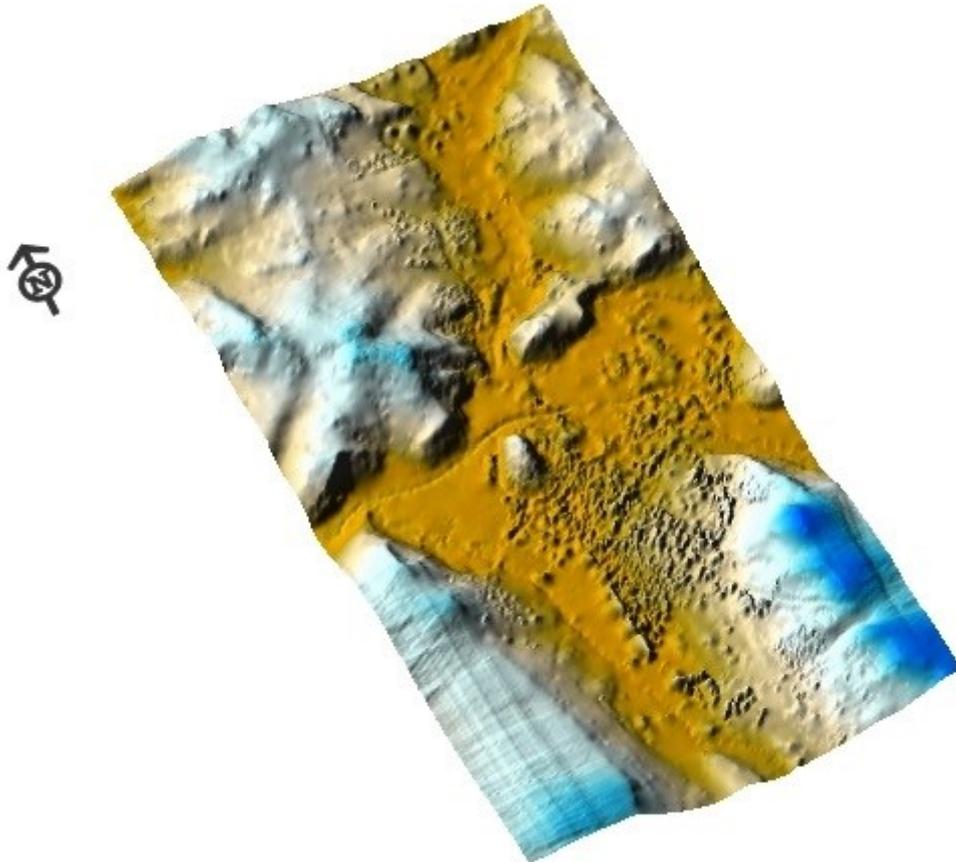


Figura 4.23 – Representação 3D da cidade de Torres Vedras obtida com base no método de interpolação “kriging”.

Para cada modelo utilizado neste trabalho efectuou-se o mapeamento da velocidade do vento e do fluxo de potência incidente. Os parágrafos que se seguem apresentam os mapeamentos obtidos para cada área em análise.

Aplicação do modelo CFD-TC à malha urbana na cidade de Torres Vedras

Os resultados que se seguem foram obtidos por aplicação do modelo CFD-TC. Como dado de entrada utilizaram-se, para além da descrição da orografia e rugosidade da área em análise e sua envolvente, duas séries sintéticas de vento obtidas através do Atlas do Potencial Eólico de Portugal continental, situadas em zonas distintas da cidade de Torres Vedras. Os mapas que se apresentam nas figuras 4.24 referem-se à distribuição da velocidade do vento e fluxo de potência incidente na cidade de Torres Vedras, para $h=10\text{m}$ a.g.l..

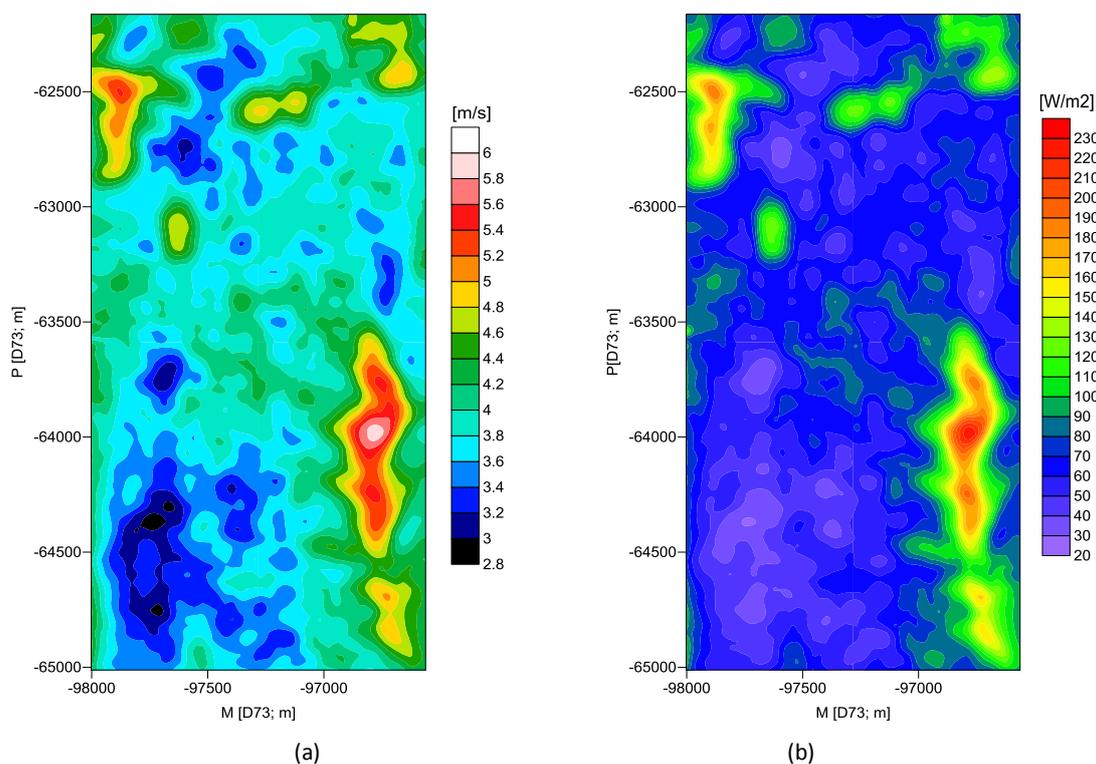


Figura 4.24 - distribuição espacial (a) da velocidade do vento e (b) do fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ na cidade de Torres Vedras.

Aplicação do modelo CFD-U a zonas urbanas na cidade de Torres Vedras

O modelo CFD-U foi aplicado a duas áreas, a área TVD1 referente à zona do centro histórico da cidade de Torres Vedras e a área TVD2 referente a uma zona situada na área Sul da cidade.

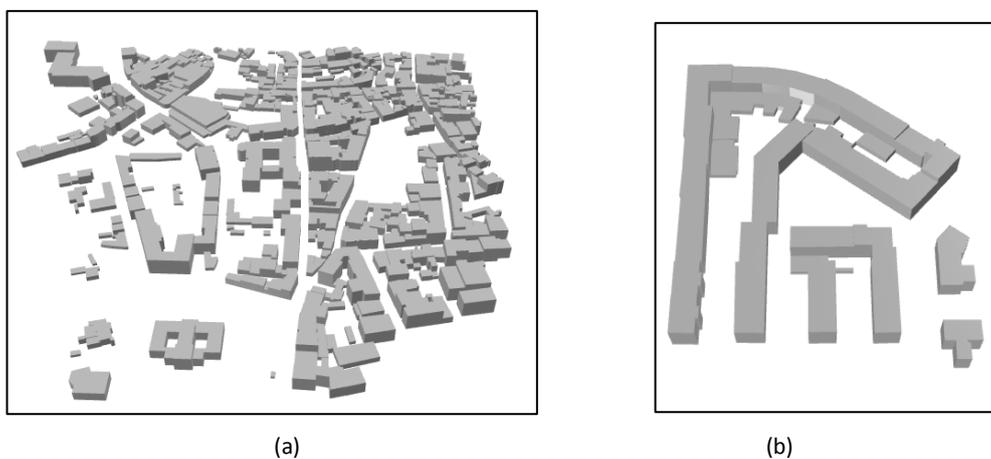


Figura 4.25 – (a) Zona 1 – Centro histórico da cidade de Torres Vedras e (b) Zona 2 – Área Sul da cidade de Torres Vedras

Nas figuras 4.26 e 4.27 apresentam-se os mapeamentos referentes à velocidade média do vento e fluxo de potência incidente para 10m acima da altura média dos edifícios. A variabilidade de alturas dos edifícios na área TVD1 é elevada, sendo que a maioria varia entre 5 e 10m, existindo alguns edifícios com alturas da ordem dos 12m. No caso da área TVD2, a quase totalidade dos edifícios tem alturas na ordem de 15 m.

Área TVD1 – Centro histórico da cidade de Torres Vedras

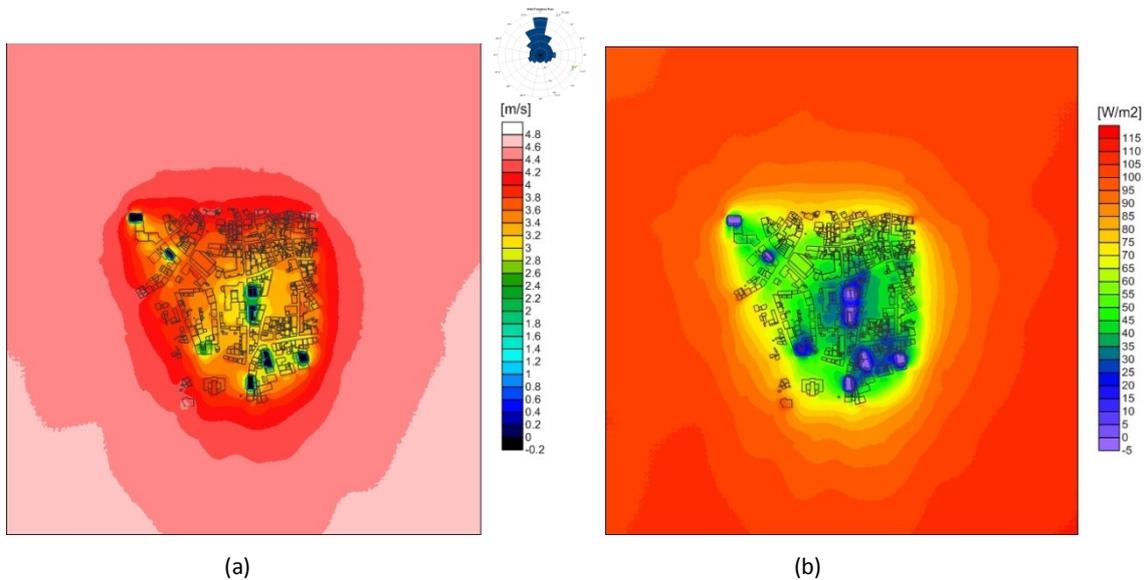


Figura 4.26 Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ acima da altura média dos edifícios da área 1.

Área TVD2 – Zona sul da cidade de Torres Vedras

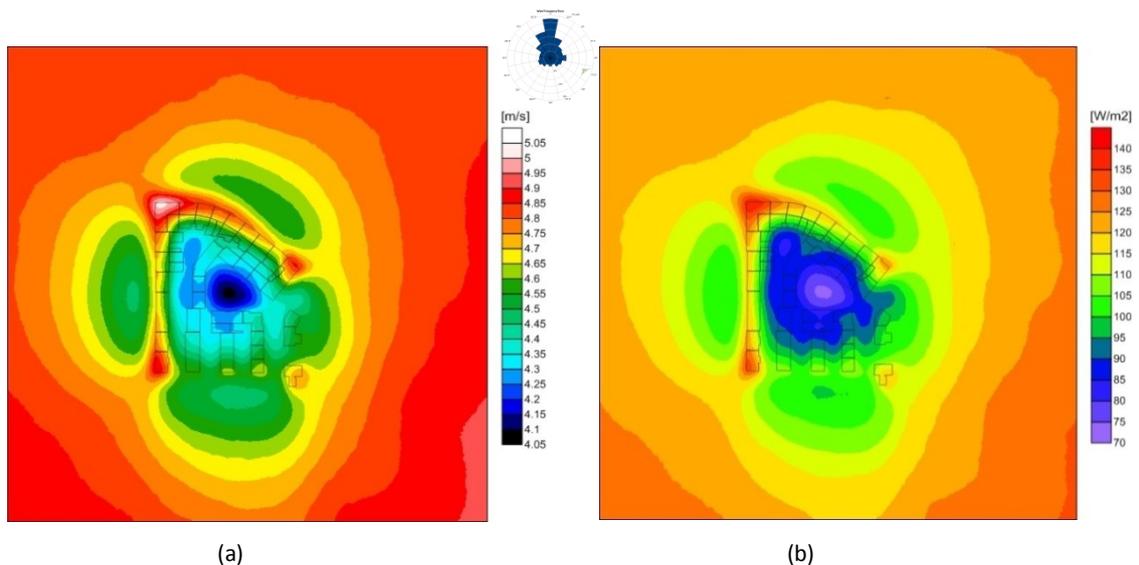


Figura 4.27 – Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) fluxo de potência incidente para $h=10\text{m}$ acima da altura média dos edifícios da área 2.

Correcção dos mapeamentos obtidos pelo método do MDT-U

Para calibrar o mapeamento obtido por aplicação do método desenvolvido com o MDT-U (CFD-TC aplicado ao MDT-U), avaliaram-se os desvios verificados em pontos de teste em cada modelo. Seleccionaram-se pontos situados em topos de edifícios e em zonas sem edifícios para perceber quais as diferenças entre a aplicação de cada modelo em ambas as tipologias. Desta forma é possível estabelecer um intervalo de desvios para definição dos factores de calibração a aplicar ao mapeamento global obtido com o MDT-U.

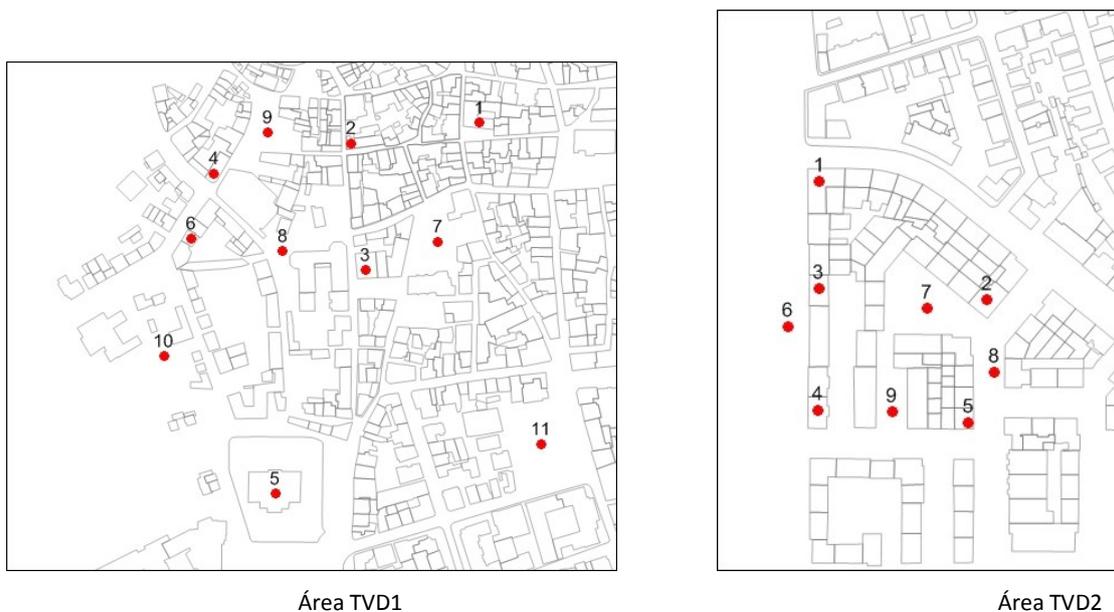


Figura 4.28 – Pontos de comparação nas áreas TVD1 e TVD2 da cidade de Torres Vedras.

Na Tabela 4.8 apresentam-se os desvios verificados nos resultados obtidos para ambos os modelos.

Tabela 4.8 – valores de velocidade média obtidos por aplicação dos dois modelos em pontos de teste das áreas estudadas.

ID	Torres Vedras			
	Área TVD1		Área TVD2	
	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC
1	2.81	3.81	4.95	3.99
2	2.71	3.89	4.41	3.91
3	2.84	3.83	4.62	4.01
4	2.65	3.72	4.82	3.69
5	3	3.71	4.62	3.97
6	2.37	3.84	2.98	3.96
7	1.68	3.78	1.72	3.91
8	1.61	3.79	1.91	3.96
9	1.92	3.98	2.1	3.8
10	2.24	3.78	-	-
11	2.45	4	-	-

No caso presente os desvios verificados entre os resultados do modelo CFD-U e do método MDT-U (CFD-TC) para a zona de edifícios na ordem de 6% e, para as zonas livres de edifícios cerca de 47%. O desvio médio global é da ordem de 25%. A zona que apresenta valores mais

acentuados de desvio é a área TVD1. Esta é uma zona antiga da cidade de Torres Vedras, com ruas muito estreitas e elevada densidade urbanística. Da mesma forma, e como se pode verificar no mapeamento apresentado na figura 4.25a, as velocidades médias da maior parte da zona urbana são extremamente reduzidas, pelo que os desvios obtidos entre os resultados dos dois modelos são significativos (figura 4.29). Por outro lado, o facto de existir uma grande densidade do edificado nesta zona da cidade, sugere a existência de escoamento rasante (*skimming flow*), o que justifica a diferença de valores da velocidade média do vento obtida entre os resultados dos dois modelos.

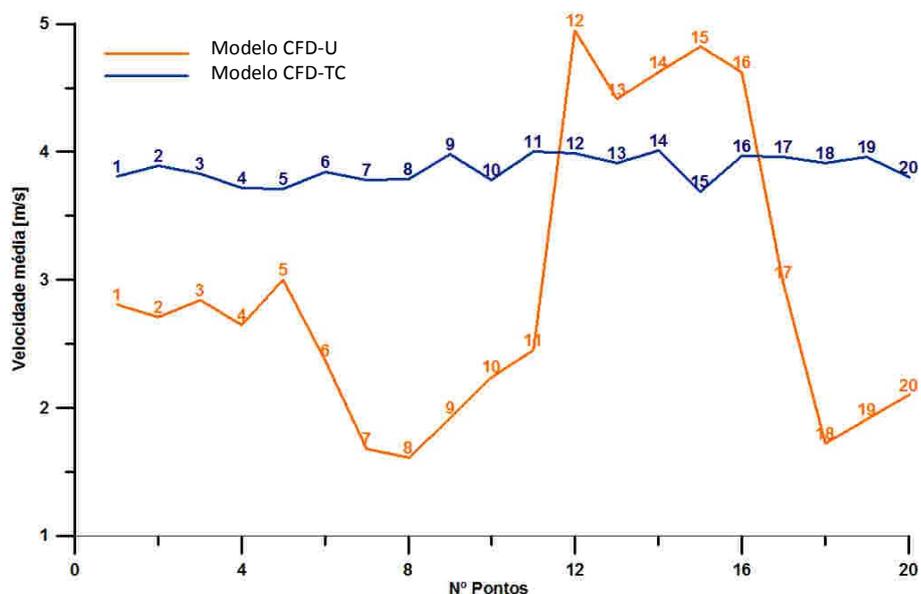


Figura 4.29 - Velocidade média nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos

O mesmo procedimento foi aplicado ao parâmetro fluxo de potência incidente. Os resultados obtidos nos mesmos pontos de teste podem consultar-se na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – valores de fluxo de potência incidente obtidos por aplicação dos dois modelos em pontos de teste das áreas estudadas.

ID	Torres Vedras			
	Área TVD1		Área TVD2	
	CFD-U	CFD-TC	CFD-U	CFD-TC
1	90	62	131	70
2	80	69	91	66
3	94	65	111	71
4	76	59	125	56
5	113	58	109	70
6	56	66	36	68
7	21	62	5	66
8	18	62	10	69
9	30	75	16	61
10	49	61	-	-
11	66	74	-	-

Pela análise dos valores obtidos nos pontos de teste, a média dos desvios verificados entre os resultados obtidos pelos dois modelos nas zonas com edifícios é de -52%, sendo que o método do MDT-U apresenta os valores de fluxo de potência incidente mais reduzidos. No caso das zonas livres, acontece o oposto, ou seja os valores obtidos pelo método do MDT-U, são mais elevados, sendo o desvio obtido igual a 58%. Neste caso, dado que os valores de velocidade média do vento oscilam de forma significativa devido aos valores reduzidos da velocidade do vento, é de esperar que as estimativas para o fluxo de potência incidente amplifiquem estas diferenças. No global, o factor de correcção médio a tomar para toda a área será igual a -2.5%. A Figura 4.30 apresenta os valores obtidos nos pontos de teste para o fluxo de potência incidente.

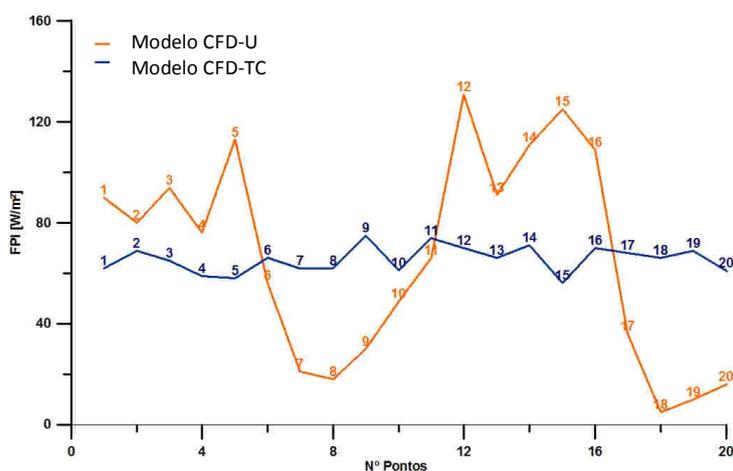


Figura 4.30 – Fluxo de potência incidente nos pontos de teste obtida por aplicação dos dois modelos.

4.1.2 Solar fotovoltaico

Caso de Estudo A – Concelho de Cascais

Para a obtenção dos mapeamentos do potencial solar recorreu-se ao modelo de radiação solar do sistema de informação geográfica e utilizado para a avaliação do potencial solar o MDT-U gerado para a componente eólica. Como dado de entrada foi ainda considerada a latitude do local e a percentagem de radiação difusa média para a região em análise. Este último parâmetro foi obtido com recurso à base de dados PVGIS. As figuras 4.31 a 4.34 apresentam os mapeamentos de radiação solar global e nº de horas de sol anuais obtidos para as freguesias de Estoril e São Domingos da Rana.

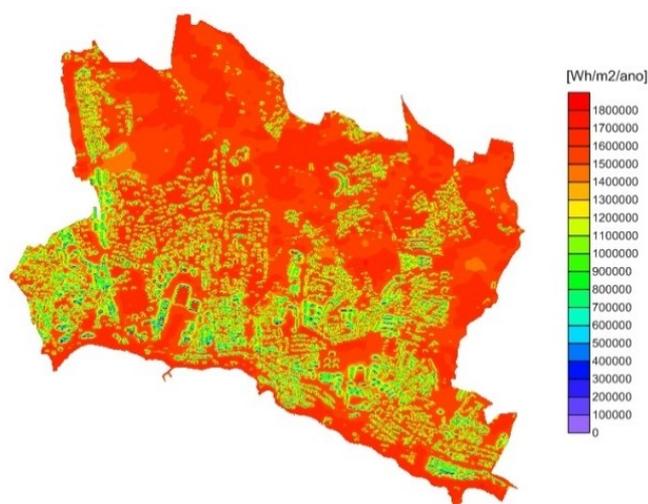


Figura 4.31 - Mapeamento da radiação solar global na freguesia de Estoril.

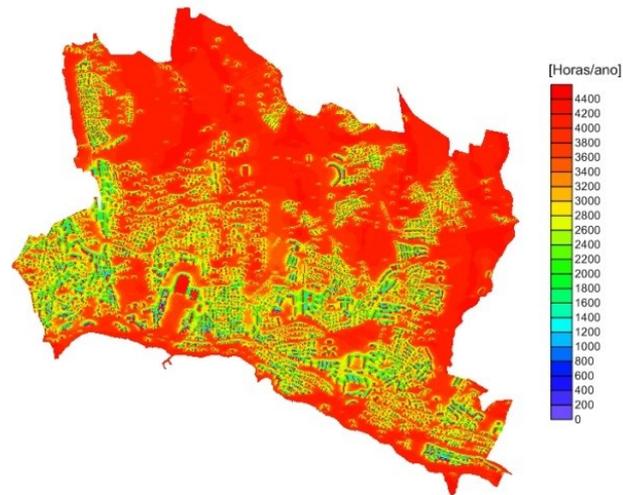


Figura 4.32 - Mapeamento do número de horas de sol na freguesia de Estoril.

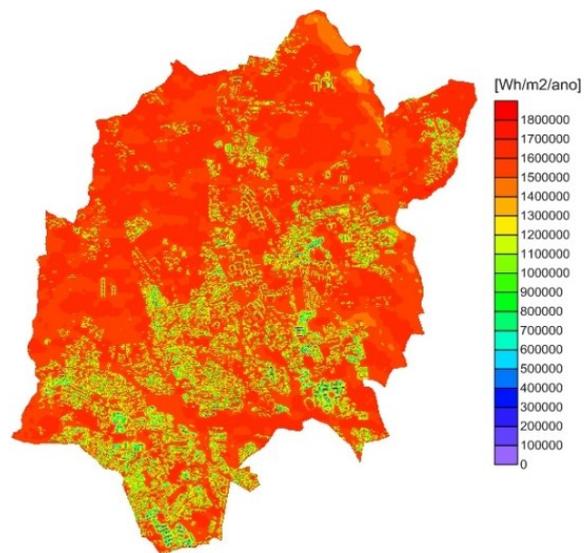


Figura 4.33 - Mapeamento da radiação solar global anual na freguesia de São Domingos de Rana.

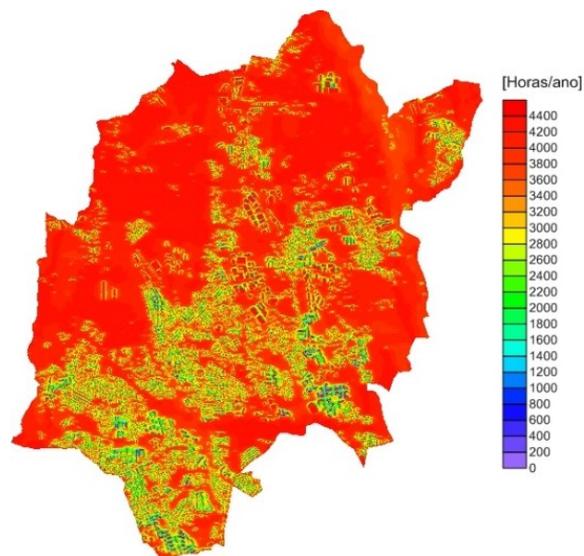


Figura 4.34 - Mapeamento do número de horas de sol na freguesia de São Domingos de Rana.

Caso de estudo B – Cidade de Torres Vedras

O potencial solar na cidade de Torres Vedras foi calculado através da ferramenta de cálculo da radiação solar incluída no sistema de informação geográfica utilizado neste trabalho. Como dado de entrada é introduzida a descrição do terreno com introdução da geometria dos edifícios, tendo-se obtido um mapeamento com edifícios e terreno. Neste caso optou-se por ilustrar a metodologia para a zona do centro histórico da cidade, uma vez que tal como foi mencionado anteriormente, esta apresenta uma melhor descrição das geometrias dos edifícios apresentando melhores condições para gerar um MDT-U mais preciso.

Os resultados obtidos na ferramenta de radiação solar da plataforma SIG utilizada foram a radiação global anual e o nº de horas de sol anuais conforme se pode ver nas figuras 4.35 e 4.36. Neste caso optou-se por representar o ano de 2010 de forma a permitir comparar as estimativas obtidas com esta aplicação e os dados medidos na cidade.

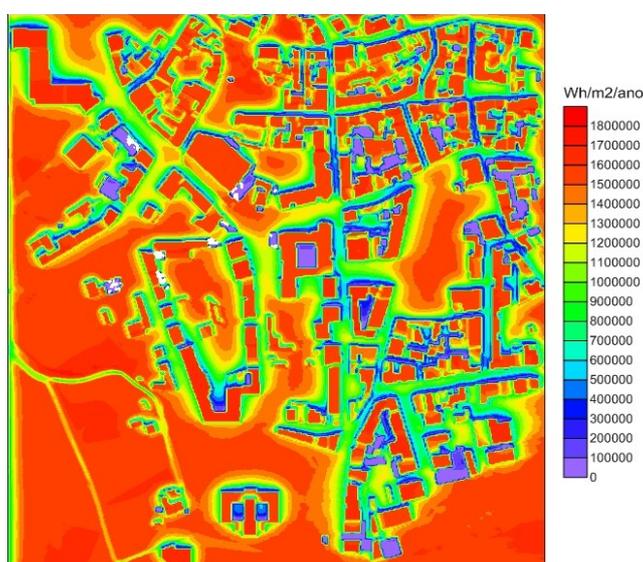


Figura 4.35 - Mapeamento da radiação solar global anual no centro histórico da cidade de Torres Vedras.

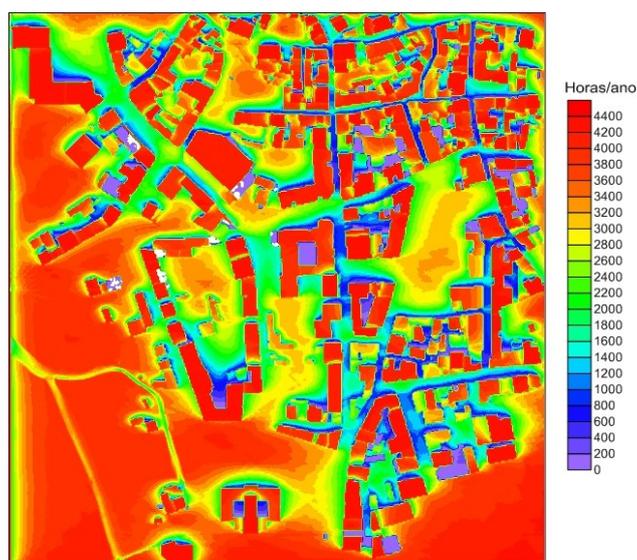


Figura 4.36 – Mapeamento do número de horas de sol anuais no centro histórico da cidade de Torres Vedras.

4.2 Validação e discussão de resultados

Nos subcapítulos anteriores foram apresentados dois casos de estudo que consistem em duas freguesias do Concelho de Cascais, contemplando as duas fontes renováveis estudadas neste trabalho. Neste subcapítulo apresenta-se a validação dos resultados obtidos, recorrendo aos conjuntos de dados disponíveis. No caso da componente eólica, a validação é efectuada para o caso de estudo realizado para as freguesias estudadas no concelho de Cascais. Para tal foi colocado um sistema LIDAR no topo do “Edifício de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal” em Junho de 2012, tendo o período de dados utilizado neste trabalho sido de 9 meses (até ao final de Fevereiro de 2013). No caso da componente solar no concelho de Cascais, não tendo sido possível obter medidas de radiação solar, efectuou-se somente uma comparação dos resultados do método utilizado com os dados da base de dados PVGIS.

Para o caso de estudo de Torres Vedras, foi instalada uma estação meteorológica no topo de um edifício camarário com medição da velocidade e direcção do vento, e radiação solar global. No entanto, os dados de vento, após processamento e controlo de qualidade apresentaram valores anómalos de velocidade e desvio padrão – variações elevadas nos registos da velocidade do vento, e desvios padrão elevados.

Assim, considerou-se estar a torre anemométrica numa zona de elevada turbulência, não tendo os dados sido utilizados no processo de validação. Por outro lado, foram utilizados os dados de radiação solar global obtidos na mesma estação de medida, correspondentes ao ano de 2012.

4.2.1 Recurso eólico

Tal como mencionado anteriormente, a validação do método de caracterização do recurso eólico, é efectuada para os locais estudados no concelho de Cascais. Nos parágrafos que se seguem comparam-se os resultados obtidos por aplicação da metodologia baseada na geração do modelo digital de terreno “urbano”, apresentada nos capítulos anteriores e os pontos de medida existentes em ambas as freguesias estudadas – Estoril P1-CPS e P9-TIR.

Concelho de Cascais

Na freguesia de Estoril, foi instalado em Junho de 2012 um sistema LIDAR no topo do edifício de Interpretação Ambiental da Pedra do Sal, o qual é gerido pela Câmara Municipal de Cascais. Este sistema tem cerca de 2m de altura tendo-se efectuado medidas em 6 alturas distintas; 18, 23, 28, 33, 38 e 58 m. Para além destas alturas consideraram-se ainda os dados medidos no topo do sistema através de uma estação de medida incorporada no LIDAR. Para a caracterização do vento em zonas urbanas seria desejável obter medidas a cotas mais baixas acima do topo do edifício, tipicamente, 6 -10m, no entanto, dadas as características e limitações deste tipo de sensores, os dados obtidos para estas alturas não apresentam valores fidedignos.

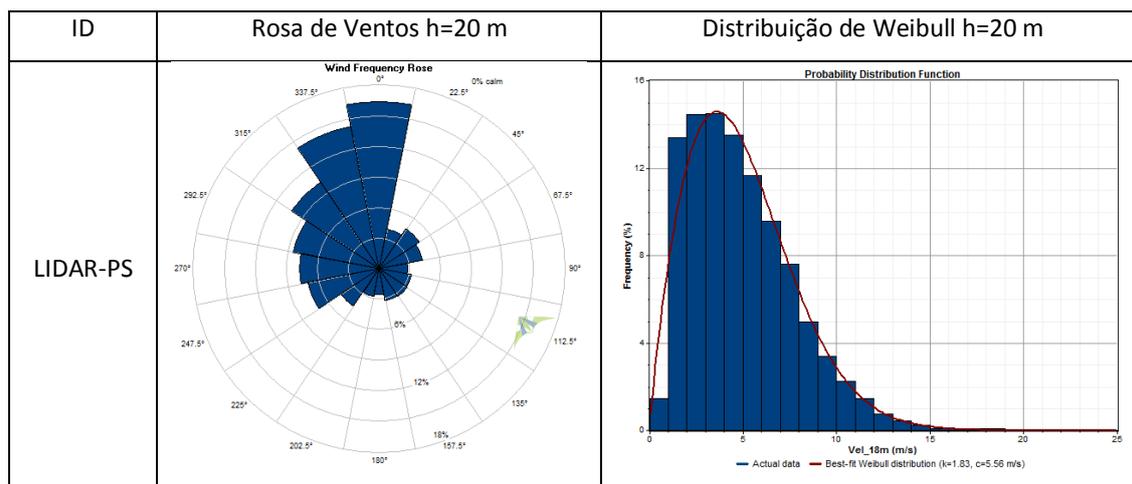
Dado que o período de monitorização disponível para este estudo é inferior a 12 meses, efectuou-se um estudo de variabilidade intra/inter-anual aos dados da velocidade do vento no local. Para tal recorreu-se aos dados de uma estação de referência do LNEG em monitorização desde 1993, instalada na região de S. João das Lampas, para determinar o factor de correcção de variabilidade intra/inter-anual do escoamento atmosférico para o período de monitorização e assim aproximar os valores de velocidade medidos da velocidade do escoamento de longo termo. Neste estudo concluiu-se que a velocidade média no período monitorizado se encontra cerca de 10% abaixo da média de longo termo tendo sido aplicado aos dados de velocidade do vento obtidos pelo LIDAR um factor de correcção igual a 1.10.

As tabelas 4.10 e 4.11 apresentam as estatísticas do vento referente aos dados medidos pelo LIDAR.

Tabela 4.10 – Parâmetros estatísticos do vento obtidos para h=20m pelo LIDAR (Junho 2012 a Fevereiro 2013 com variabilidade inter-intra anual da velocidade do vento).

ID	H (m)	M (UTM D73; m)	P (UTM D73; m)	Velocidade média (m/s)	A (m/s)	K (-)	FPI (W/m ²)
LIDAR-PS	20	-107793.60	-107478.01	4.92	5.56	1.83	161

Tabela 4.11 - Rosa de ventos e distribuição de Weibull para h=20m obtidos pelo LIDAR.



Tendo como base os registos da estação meteorológica do LIDAR (h=2m acima da cobertura do edifício) e os medidos nas cotas superiores foi determinado o perfil vertical da velocidade média no local (figura 4.37), o qual foi utilizado para efectuar a estimativa da velocidade média do vento para H=10m, e posteriormente, compará-los com os resultados do modelo CFD-TC para esta altura acima dos edifícios. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.14.

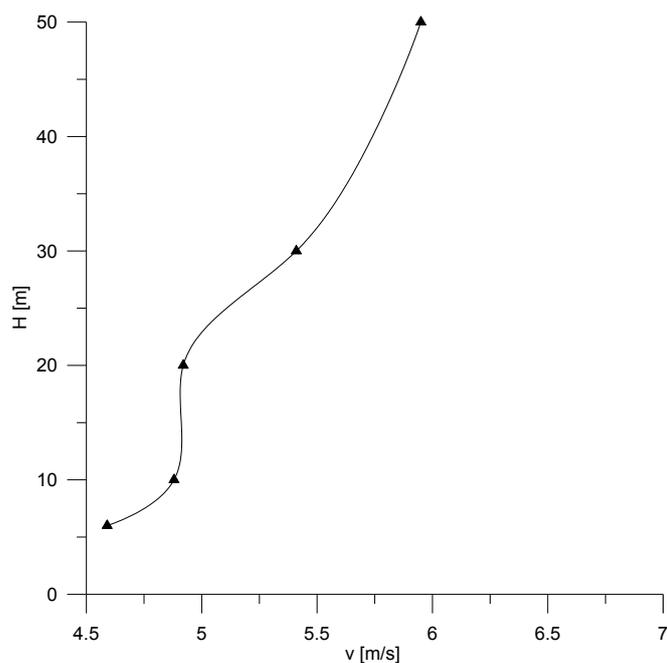


Figura 4.37 – Perfil vertical da velocidade do vento observado pelo LIDAR onde H se refere à altura acima do solo.

No que respeita ao ponto situado em Tires, foram utilizados os dados medidos numa estação anemométrica instalada no aeródromo de Tires. As tabelas 4.12 e 4.13 apresentam os parâmetros estatísticos do vento correspondentes aos dados medidos nesta estação anemométrica.

Tabela 4.12 - Rosa de ventos e distribuição de Weibull para h=10m obtidos pela estação anemométrica de Tires.

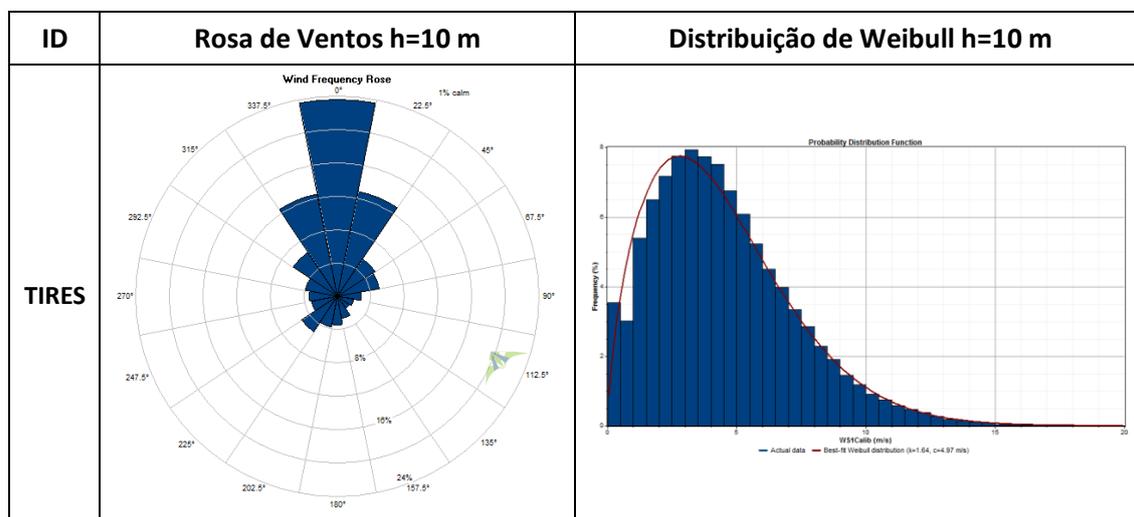


Tabela 4.13 – Parâmetros estatísticos do vento obtidos para h=10m obtidos pela estação anemométrica de Tires.

ID	H (m)	M (UTM D73; m)	P (UTM D73; m)	Velocidade média (m/s)	A (m/s)	K (-)	FPI (W/m^2)
TIRES	10	-106313.93	-104376.55	4.47	4.97	1.64	123

Os dados medidos nos dois pontos de validação foram então comparados com os resultados do modelo CFD-TC antes e depois da aplicação da correcção obtida pela metodologia descrita (geração do modelo digital de terreno urbano). Foram aplicadas três correcções, em primeiro lugar a correcção correspondente à tipologia da medição no que respeita à sua localização, i.e., no caso do LIDAR por este se encontrar instalado no topo de um edifício, foi aplicada a correcção de -2% (ou 98%) e no caso de Tires foi aplicada a correcção de -13% (ou 87%), uma vez que a torre anemométrica se encontra instalada no solo num local relativamente livre de obstáculos. Foi ainda aplicada a correcção média de -6.6% (ou 93.4%) e finalmente, foi efectuada uma comparação sem qualquer correcção aos mapeamentos. A tabela 4.14 apresenta os desvios encontrados para a velocidade média do vento.

Por análise da tabela pode concluir-se em ambos os casos, a aplicação do factor de correcção aproxima os valores que resultaram da simulação pelo método do MDT-U, aos valores experimentalmente medidos nos pontos de teste. Muito embora os impactos associados a desvios na estimativa da velocidade média do vento tenham uma expressão significativa nas estimativas de produção energética – pois estas variam com o cubo da velocidade – considerou-se neste trabalho que, na perspectiva da prospecção de áreas para o aproveitamento eólico em ambiente urbano, uma abordagem conservativa seria a mais adequada ao desenvolvimento de projectos futuros.

Tabela 4.14 – Comparação entre os valores estimados de velocidade média do vento nos pontos de medida (P1-CPS e P9-TIR) e os modelos utilizados no estudo antes e depois da correcção dos mapas finais.

	ID Pontos de Medida	V (m/s) CFD-TC H=10m	V (m/s) LIDAR/anem. H=10m	Desvio (%)
Estoril (98%)	P1-CPS	5.07	4.88	+3.89
S. Domingos Rana (87%)	P9-TIR	4.65	4.47	+4.08
Estoril (93.4%)	P1-CPS	4.83	4.88	- 1.02
S. Domingos Rana (93.4%)	P9-TIR	4.99	4.47	+10.6
Estoril (100%)	P1-CPS	5.17	4.88	+5.94
S. Domingos Rana (100%)	P9-TIR	5.34	4.47	+19.7

No que respeita às estimativas do fluxo de potência incidente, os desvios obtidos são apresentados na tabela 4.15.

No caso do ponto correspondente à localização do LIDAR, o desvio obtido após aplicação do factor de correcção médio é superior. Nas outras situações reportadas, é também notória esta situação, apesar de no caso de Tires, o valor obtido antes da correcção apresentar um desvio por excesso, o que corresponde a uma sobrestimativa do fluxo de potência incidente. Este facto deve-se essencialmente à estimativa efectuada pelo modelo CFD-TC dos parâmetros da distribuição de Weibull, bem como às fontes de dados provenientes do Atlas aqui utilizadas (esta situação será analisada adiante neste trabalho).

Calcularam-se ainda alguns dos parâmetros estatísticos habituais neste tipo de estudos e adequados a ilustrar o grau de erro das estimativas obtidas.

Tabela 4.15 – Comparação entre os valores estimados de fluxo de potência incidente nos pontos de medida e os modelos utilizados no estudo antes e depois da correcção dos mapas finais.

	ID Pontos de Medida	FPI (W/m ²) CFD-TC H=10m	FPI (W/m ²) LIDAR/anem. H=10m	Desvio (%)
Estoril (101%)	P1-CPS	142	161	-11.8
S. Domingos Rana (77%)	P9-TIR	102	123	-17.07
Estoril (90.0%)	P1-CPS	127	161	-21.1
S. Domingos Rana (90.0%)	P9-TIR	120	123	-2.43
Estoril (100%)	P1-CPS	141	161	-12.4
S. Domingos Rana (100%)	P9-TIR	133	123	+8.13

Os parâmetros calculados foram o erro médio absoluto *MAE*, o erro médio quadrático *RMSE* e a percentagem média de erro, % *erro*. As equações 4.1 a 4.3 permitem calcular os parâmetros mencionados, sendo exemplificado o caso da velocidade média do vento.

$$MAE = \sum_i |\bar{u}_{obs,i} - \bar{u}_{pred,i}| / n ; \quad (4.1)$$

onde u_{pred} é a estimativa da velocidade média pelo modelo CFD-TC, i é o ponto de medida para o qual as estimativas foram efectuadas e n é o nº total de pontos de previsão.

$$RMSE = \sqrt{\sum_i (\bar{u}_{obs,i} - \bar{u}_{pred,i})^2 / n} ; \quad (4.2)$$

$$\% \text{ erro} = 100 \sum_i \frac{|\bar{u}_{obs,i} - \bar{u}_{pred,i}|}{\bar{u}_{obs,i}} / n . \quad (4.3)$$

Dado que o perfil vertical do vento constitui um parâmetro muito importante para a determinação do potencial eólico, foram comparados os valores estimados para as diferentes alturas de medição do ponto P1-CPS, onde se encontra instalado o sistema LIDAR e posteriormente calcularam-se os erros com base nas estimativas e medidas nos pontos P1-CPS e P9-TIR. A tabela que se segue apresenta os valores obtidos para MAE, RMSE e % erro em cada um dos casos. Os valores de velocidade média estimada para o caso da aplicação do modelo foram afectados do factor de correcção médio estimado para cada tipo de zona urbana – livre de edifícios e topos dos edifícios.

No caso do fluxo de potência incidente são apresentados na tabela 4.17 os resultados obtidos por aplicação das equações 4.1 a 4.3. Neste caso apresentam-se apenas os parâmetros estatísticos para os dois locais de medição.

Tabela 4.16 – Análise de erros obtidos entre o método do MDT-U e as observações nos pontos de medida para a velocidade média do vento.

	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	% erro
Análise do perfil vertical referente às alturas de medição do sistema LIDAR.	0.305503	0.19	5.70
Análise espacial: LIDAR + TIRES (h=10m)	0.075292	0.074	1.87

Tabela 4.17 – Análise de erros obtidos entre o método do MDT-U e as observações nos pontos de medida para o fluxo de potência incidente.

Local	MAE (m/s)	RMSE (m/s)	% erro
LIDAR + TIRES (h=10m)	19.59	384.77	14.14

A figura 4.38 mostra os perfis verticais obtidos com os dados medidos no LIDAR e os obtidos por simulação com o método de geração do modelo digital de terreno envolvendo os edifícios (aplicação do modelo CFD-TC). Ambos os perfis, embora com valores de velocidade distinta, apresentam um enchimento mais acentuado a partir dos 20 m acima do topo dos edifícios e uma zona de esvaziamento entre os 10 m e os 20 m, o que deverá estar associado ao efeito da

turbulência na zona mais próxima do edifício. Da mesma forma, o perfil vertical obtido com o modelo CFD-TC, entre as cotas de 6 m e 10 m apresenta uma ligeira inversão. Esta ocorrência facto pode igualmente ser explicada pelo facto de o sistema de medida se situar próximo do centro do edifício. A esta cota verifica-se efeito de separação do escoamento associado à ocorrência de turbulência forte.

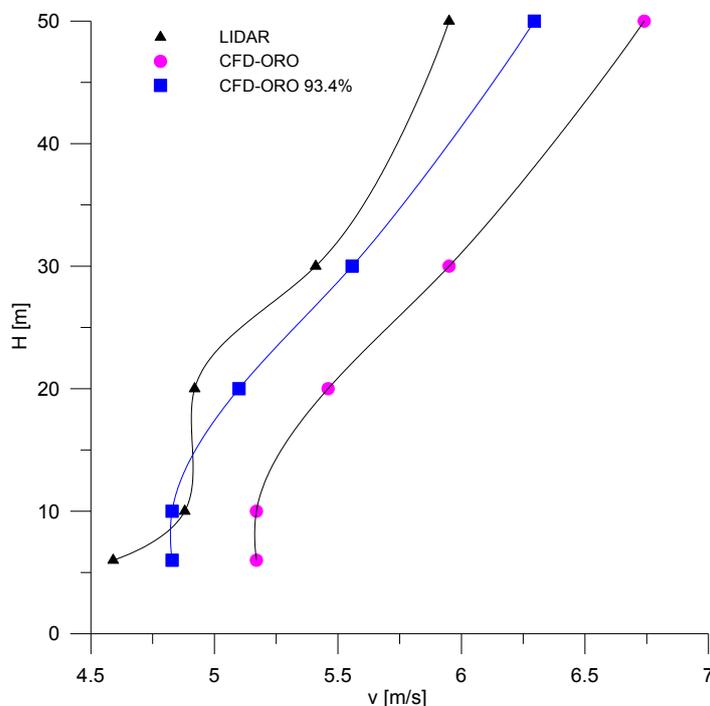


Figura 4.38 - Perfis verticais do vento observados no LIDAR e obtidos pelo modelo CFD-TC onde H representa a altura acima do solo.

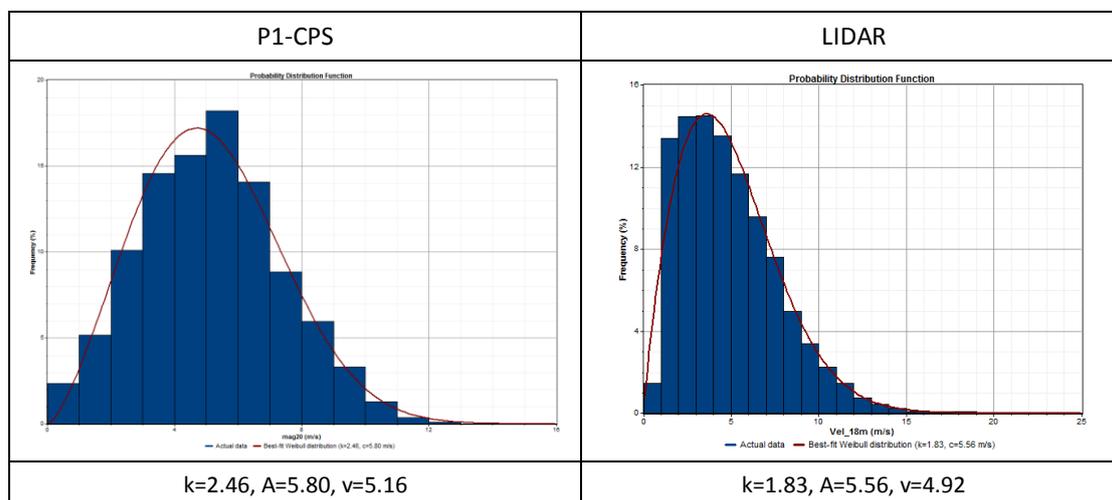
Discussão de resultados

A existência de dados de vento medidos em zonas urbanas é muito reduzida na maioria dos casos, e este trabalho contou igualmente com esta limitação. Ainda assim, os mapeamentos do recurso eólico obtidos nas regiões estudadas foram sujeitos a validação, ainda que de forma mais aproximada do que seria desejável, devido à reduzida amostra de locais de medição do vento. É de mencionar que o reduzido número de locais de medida do vento se refere a estações anemométricas/meteorológicas adequadas à caracterização do potencial eólico em ambiente urbano. Outras existem, e.g. para a avaliação da qualidade do ar, mas encontram-se em locais e/ou cotas que tornam inviável a sua utilização neste trabalho. Em vários dos trabalhos consultados, foi notória a quantidade de pontos de validação utilizada permitindo uma avaliação dos erros de estimativa bastante completa [Weekes e Tomlin, 2013]. No entanto, é de salientar que, neste trabalho, e apesar desta limitação os desvios apresentados nos pontos de medida entre os dados obtidos com a metodologia apresentada e os dados observados apresentam uma concordância que se considera aceitável e adequada aos objectivos em vista.

Os dados obtidos no atlas do potencial eólico correspondem a uma série de dados anuais de velocidade e direcção. No caso da freguesia do Estoril, e observando-se os valores da tabela 4.2 referentes às séries sintéticas obtidas no atlas do potencial eólico para o concelho de Cascais e olhando em especial para a localização P1-CPS (ponto mais próximo do local de instalação do LIDAR), pode verificar-se que a forma da distribuição de Weibull é consideravelmente distinta nos dois locais. A distribuição de Weibull correspondente à série sintética de dados P1-CPS, esta apresenta uma forma bem distribuída nas suas frequências de

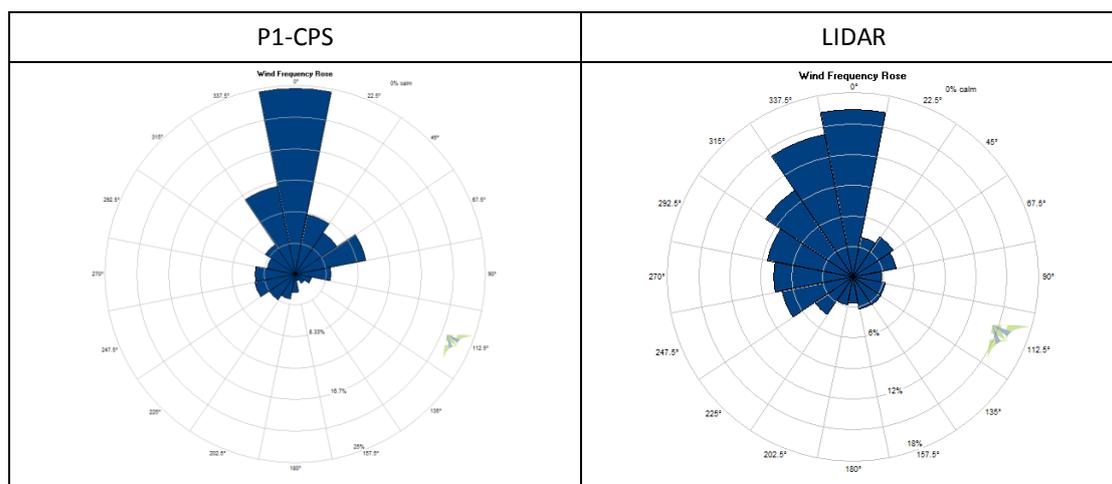
ocorrência em torno do valor médio da velocidade, enquanto no caso do LIDAR, esta distribuição encontra-se concentrada nas primeiras classes de velocidade. Já no que respeita aos valores dos parâmetros de escala A e da velocidade média, esta diferença é menos acentuada (tabela 4.18).

Tabela 4.18 – Distribuição de Weibull correspondente aos dados obtidos no Atlas (P1-CPS) e observados pelo LIDAR.



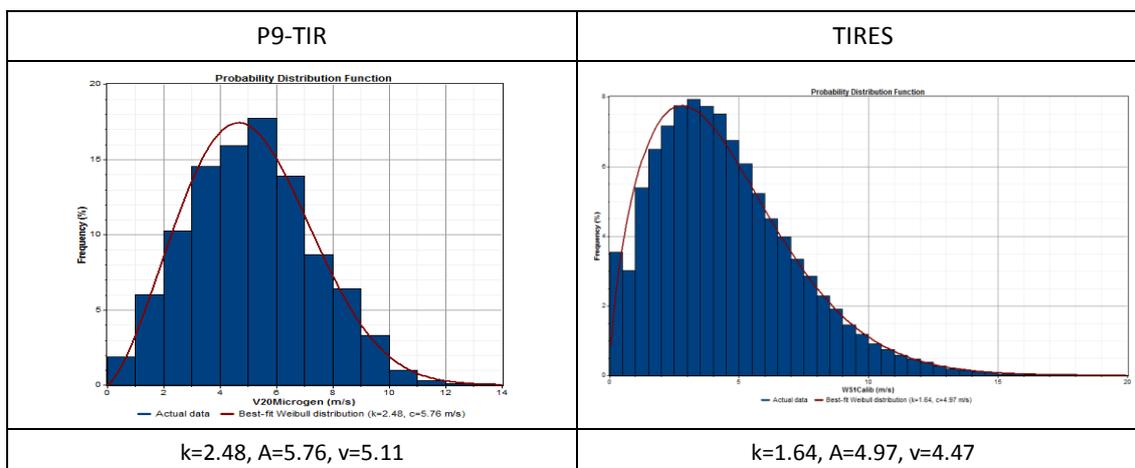
Por outro lado, os valores de direcção obtidos para ambos os pontos são semelhantes no que respeita à direcção dominantes, muito embora, no caso do LIDAR os efeitos direccionais introduzidos no escoamento pela presença dos edifícios seja notória na rosa de ventos observada pelo LIDAR. Este encontra-se numa zona com densidade urbanística relativamente homogénea, mas apresenta edifícios mais elevados do que a localização do LIDAR na direcção NNE-NE cuja presença se pode inferir na rosa de ventos observada (tabela 4.19).

Tabela 4.19 – Rosas de ventos correspondentes aos dados obtidos no Atlas (P1-CPS) e observados pelo LIDAR.



No caso de Tires (P9-TIR), as diferenças são igualmente visíveis quando se analisam os dados do Atlas e os dados da estação anemométrica (tabelas 4.20 e 4.21):

Tabela 4.20 – Distribuição de Weibull correspondente aos dados obtidos no Atlas (P9-TIR) e observados na estação anemométrica TIRES.



No caso de Tires as diferenças observadas entre os parâmetros da distribuição de Weibull e os valores da velocidade média do vento apresentam diferenças significativas.

Os desvios verificados entre os parâmetros estatísticos apresentados no caso de estudo A e apresentados nas tabelas 4.18 e 4.20 sintetizam-se na tabela 4.22.

Tabela 4.21 – Rosas de ventos correspondentes aos dados obtidos no Atlas (P9-TIR) e observados na estação anemométrica TIRES.

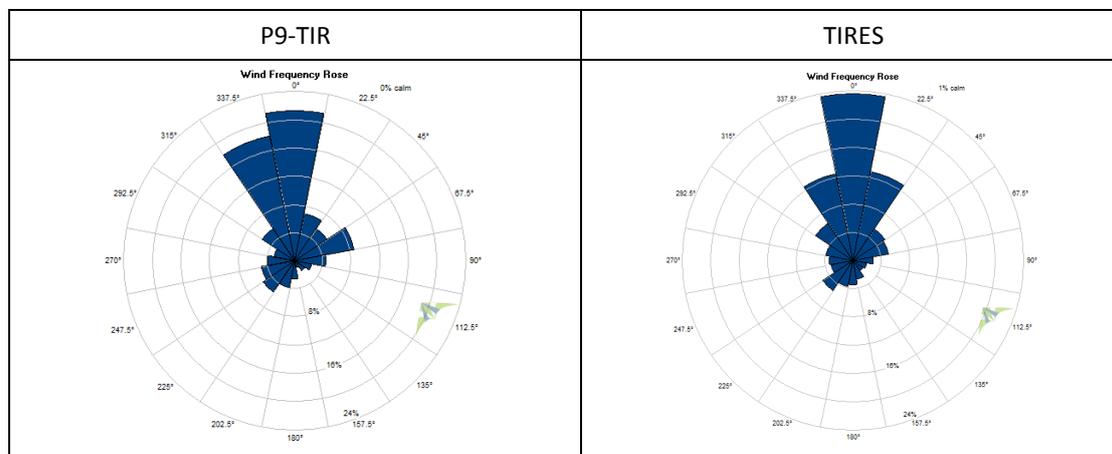


Tabela 4.22 – Desvios verificados entre as séries sintéticas (P1-CPS e P9-TIR) e os observados nos pontos de medida (LIDAR e TIRES).

	P1-CPS	LIDAR	Desvio (%)	P9-TIR	TIRES	Desvio (%)
v (m/s)	5.16	4.92	+4.6	5.11	4.47	+12.5
A (m/s)	5.80	5.56	+4.1	5.76	4.97	+13.7
k (-)	2.46	1.83	+25.6	2.48	1.64	+33.9

Note-se, no entanto, que as diferenças observadas entre os dados obtidos por simulação numérica (P1-CPS e P9-TIR) e os dados medidos (LIDAR e TIRES), se devem essencialmente à

sua origem. Os dados obtidos por simulação numérica de mesoscala não são, pela própria natureza do tipo de modelo utilizado, capazes de descrever os efeitos introduzidos pelos obstáculos da superfície, enquanto os dados medidos têm naturalmente presentes estes efeitos.

No que respeita aos valores obtidos para o fluxo de potência incidente, os mesmos foram em qualquer dos casos, obtidos com base nos parâmetros da distribuição de Weibull. As diferenças ente os valores de entrada e os valores medidos nos pontos P1-CPS, LIDAR, P9-TIR e TIRES, encontram-se na tabela 4.23.

Tabela 4.23 – Distribuição de Weibull correspondente aos dados obtidos no Atlas (P9-TIR) e observados na estação anemométrica TIRES.

	FPI (W/m ²)	Desvio (%)
P1-CPS	132	-18
LIDAR	161	
P9-TIR	129	4.8
TIRES	123	

Analisando agora os desvios médios obtidos nos mapeamentos do potencial eólico (neste caso, velocidade média do vento e fluxo de potência incidente) no concelho de Cascais estes são inferiores em quase todas as situações, com excepção do caso do fluxo de potência obtido no ponto situado na freguesia do Estoril (P1-CPS), sendo que, neste caso, a diferença entre desvios é da ordem de 3% (-18% - (-21.1%)). Esta diferença pode atribuir-se a efeitos locais motivados pela presença dos edifícios que não são tão bem descritos na modelação do modelo digital de terreno “urbano”. Note-se a disparidade encontrada entre os parâmetros A e k calculados com as séries sintéticas e os dados medidos pelo LIDAR, com especial enfoque para o desvio encontrado nos valores do parâmetro k, o qual é determinante para o cálculo do fluxo de potência incidente.

Ainda assim, e analisando os erros da simulação com o MDT-U face aos locais com medidas experimentais, pode concluir-se que a introdução do MDT-U para o mapeamento do potencial eólico se revela como uma boa solução para o estudo do vento em ambiente urbano.

Milashuk e Crane [2011] avaliaram os erros de previsão de um modelo CFD aplicado a um terreno pouco complexo, tendo como base os dados medidos em quatro estações anemométricas. Neste caso o desvio obtido para o valor de velocidade média estimado pelo modelo foi de -3.3%, valor este semelhante em magnitude ao obtido neste trabalho para os dois pontos de medida (LIDAR e Tires no caso de estudo A).

Outros autores, Weekes e Tomlin [2013], desenvolveram um método semi-empírico para a avaliação do recurso eólico relevante para a instalação de pequenas turbinas eólicas. Neste método foram testados três modelos cuja validação foi baseada nos dados medidos em 38 estações anemométricas localizadas em diferentes tipos de terreno (urbano, rural,...). Foi efectuada uma avaliação de erros dos resultados obtidos tendo-se verificado um valor médio de erro de todos os modelos sobre todos os tipos de locais de 16% para a velocidade do vento e de 63% para o fluxo de potência incidente. No que respeita à análise de erros para terrenos urbanos, como é o presente caso, os erros são superiores sendo de 18% para a velocidade média do vento e de 89% para o fluxo de potência incidente [Weekes e Tomlin, 2013]. Muito embora a abordagem seguida tenha sido distinta da aqui utilizada, os desvios observados face às medidas são muito superiores aos reportados neste trabalho. Assim, os desvios globais para o concelho de Cascais obtidos na estimativa da velocidade do vento, são da ordem de 2% e na

estimativa do fluxo de potência incidente, da ordem de 15%. É, no entanto, de realçar uma vez mais, que a reduzida quantidade de pontos de medida aqui utilizada torna o processo de validação pouco robusto sendo desejável a sua complementação com pontos de medida adicionais. Um aspecto a salientar no trabalho desenvolvido por Weekes e Tomlin [2013], é de forma semelhante à utilizada neste trabalho, a utilização de séries sintéticas de velocidade do vento obtidas a partir de modelação de mesoscala, o que demonstra que esta abordagem pode ser uma mais-valia para o estudo do vento urbano, desde que os resultados possam ser devidamente validados e corrigidos através de procedimentos adequados.

No que respeita à estimativa do fluxo de potência incidente, o erro obtido é, como expectável, mais elevado do que da velocidade do vento. Muito embora se tenha entrado em linha de conta com a malha urbana ainda que “filtrada” pela superfície de cotas (MDT-U), esta, quando considerada na sua forma original influencia de forma marcante o escoamento atmosférico quer na sua distribuição espacial quer em altura. A metodologia proposta atenua estes efeitos pela introdução do modelo digital de terreno “urbano” permitindo, ainda assim, mapear o recurso eólico de uma área urbana com reduzido custo computacional e de forma relativamente expedita como se pretendia neste trabalho. Da mesma forma, os modelos utilizados não calculam o fluxo de potência incidente, pelo que este foi estimado com base nos parâmetros da distribuição de Weibull obtidos pelos modelos utilizados, o que justifica as diferenças entre os valores obtidos experimentalmente e os obtidos pelos modelos (tabela 4.23).

É importante referir que os dois casos de estudo abordados contêm tipologias urbanísticas distintas. No caso da cidade de Torres Vedras, na zona onde foi possível obter um maior detalhe na distribuição e geometria dos edifícios (centro histórico da cidade), estes apresentam uma densidade espacial extremamente elevada o que justifica os reduzidos valores de velocidade média anual obtidos por aplicação da metodologia aqui desenvolvida. No entanto, a metodologia desenvolvida com a superfície de cotas pode ser uma boa solução para este tipo de zonas urbanas, pois o escoamento em zonas de elevada densidade urbanística é maioritariamente rasante. Por outro lado, a sua localização numa zona rodeada de elevações faz com que o escoamento não tenha a capacidade de recuperar do efeito por estas produzido “passando por cima” da zona urbana e justificando assim os reduzidos valores aí obtidos. Neste tipo de zonas urbanas, o aproveitamento eólico para microgeração de electricidade será mais eficiente na periferia das mesmas, enquanto em zonas onde a distribuição do edificado é mais esparsa, torna-se mais fácil encontrar zonas dentro do perímetro urbano com potencial eólico adequado.

No caso do concelho de Cascais, é possível identificar várias zonas de interesse do ponto de vista do potencial eólico. Este facto deve-se essencialmente à proximidade do mar e à grande extensão de costa que abrange este concelho a Sul e a Oeste. É ainda possível identificar zonas dentro das freguesias analisadas que contêm uma fraca densidade urbanística. A metodologia apresentada sendo baseada nas habitualmente aplicadas a zonas de orografia complexa, funciona bem nestas zonas podendo facilmente apresentar resultados interessantes em zonas rurais e/ou construídas. O caso de estudo referente à freguesia de São Domingos de Rana e em especial a zona onde se encontra instalado o mastro anemométrico cujos dados foram utilizados na validação da metodologia exposta, é um exemplo típico de uma zona de urbana esparsa. Este facto pode justificar a obtenção de desvios reduzidos das estimativas obtidas face às medidas experimentais.

Durante a realização deste trabalho foram identificadas algumas dificuldades, em especial no que respeita à adaptação da cartografia existente para a geração do MDT-U e a não existência de dados para validação das metodologias. No caso do MDT-U, refere-se a dificuldade na adaptação da cartografia disponível ao formato necessário para a sua geração, e também, a dificuldade na atribuição de cotas às geometrias dos edifícios quando esta informação se

encontra desgregada – habitual nos mapas disponibilizados pelos gabinetes camarários. Foi no entanto possível, através de métodos de interpolação e álgebra de mapas ultrapassar essas dificuldades. No caso da não disponibilidade de dados experimentais para validação das metodologias, é importante referir que, a instalação de sistemas de medida é ainda vista como perturbadora do espaço urbano, em especial quando é necessária a sua instalação no topo de edifícios. Espera-se assim, que a introdução de um maior número de sistemas de avaliação experimental no processo de validação de resultados venha a apresentar outros desvios que não os apresentados aqui. De uma forma geral, a metodologia apresentada para a avaliação do potencial eólico em meio urbano com o objectivo de identificar áreas de interesse para o desenvolvimento de sistemas eólicos apresenta resultados aceitáveis face aos pontos de medida considerados. Não é no entanto demais reforçar que o facto de se terem utilizado apenas dois pontos de validação experimental é manifestamente reduzido para avaliar os desvios obtidos por aplicação desta metodologia numa área urbana, sendo desejável a utilização de um maior número de pontos de medida em especial localizados em zonas com maior densidade urbanística.

4.2.2 Recurso solar

Concelho de Cascais

Para o caso de estudo referente ao concelho de Cascais, não foi possível instalar um sistema de medida da radiação solar, pelo que só foi possível efectuar a validação do método utilizado através da comparação dos resultados obtidos com base na informação constante na base de dados PVGIS. Esta base de dados tem sido, tal como já referido neste trabalho, amplamente utilizada para a obtenção de estimativas de produção de sistemas fotovoltaicos bem como para a avaliação do potencial solar em pontos de interesse. No caso presente, e de forma a poder comparar os mapeamentos obtidos pela ferramenta contida no sistema de informação geográfica utilizado com uma referência, seleccionaram-se alguns pontos em cada área geográfica em análise (Figura 4.39).

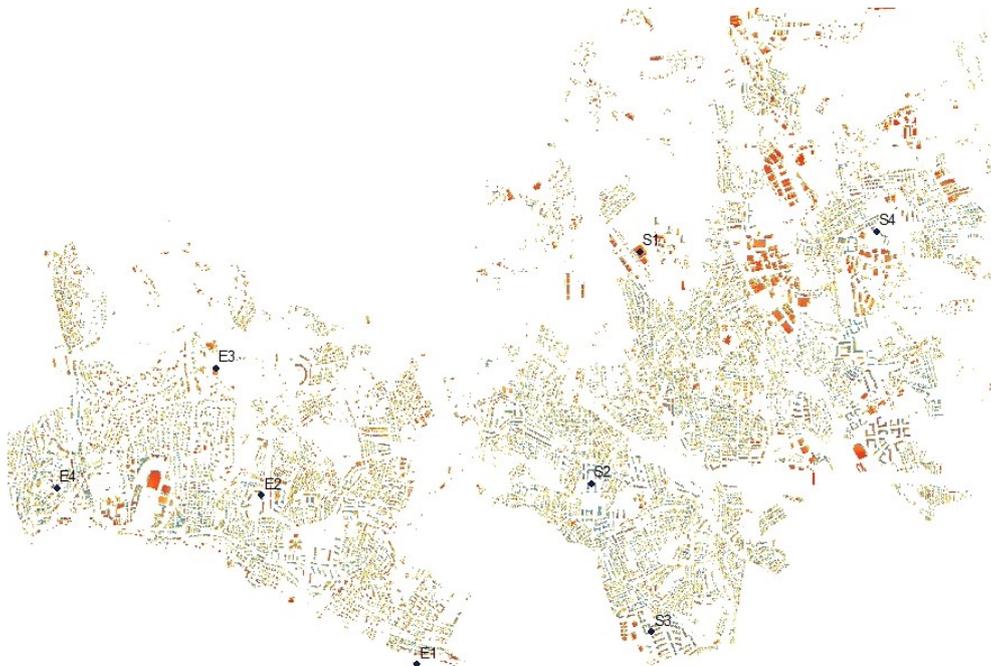


Figura 4.39 – Pontos seleccionados para validação dos mapeamentos obtidos para as freguesias de Estoril e são Domingos de Rana.

À semelhança do caso do potencial eólico, foi efectuada uma análise de erros tendo como base as equações apresentadas anteriormente neste capítulo (tabela 4.24). Neste caso foram utilizados como pontos de validação os apresentados na tabela 4.25 sendo os valores correspondentes no mapeamento da ferramenta seleccionada para este trabalho comparados com os obtidos na base de dados PVGIS.

Tabela 4.24 – Análise de erros entre os pontos de validação e os pontos correspondentes obtidos pela ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica.

Pontos de validação	MAE (Wh/m ²)	RMSE (Wh/m ²)	% erro
E1 a E4 e S1 a S4	69.13824	17120.91	1.64

Tabela 4.25 – Desvios verificados entre os pontos de validação e os pontos correspondentes obtidos pela ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica.

	G (Wh/m ²) PVGIS	G (Wh/m ²) SIG	Desvio (%)
E1	4711	4470	5.39
E2	4455	4500	-0.99
E3	4337	4500	-3.62
E4	4478	4490	-0.28
S1	4348	4500	-3.38
S2	4407	4510	-2.28
S3	4402	4500	-2.18
S4	4427	4510	-1.83
Valor médio	4445.6	4497.5	-1.26

Cidade de Torres Vedras

Foi instalado em Torres Vedras um piranómetro no topo de um edifício camarário, que esteve em operação desde Dezembro de 2009 até meados de 2012. A campanha experimental teve algumas ocorrências de funcionamento anómalo deste sensor, pelo que não foi possível obter um período de medição mais longo do que 12 meses.

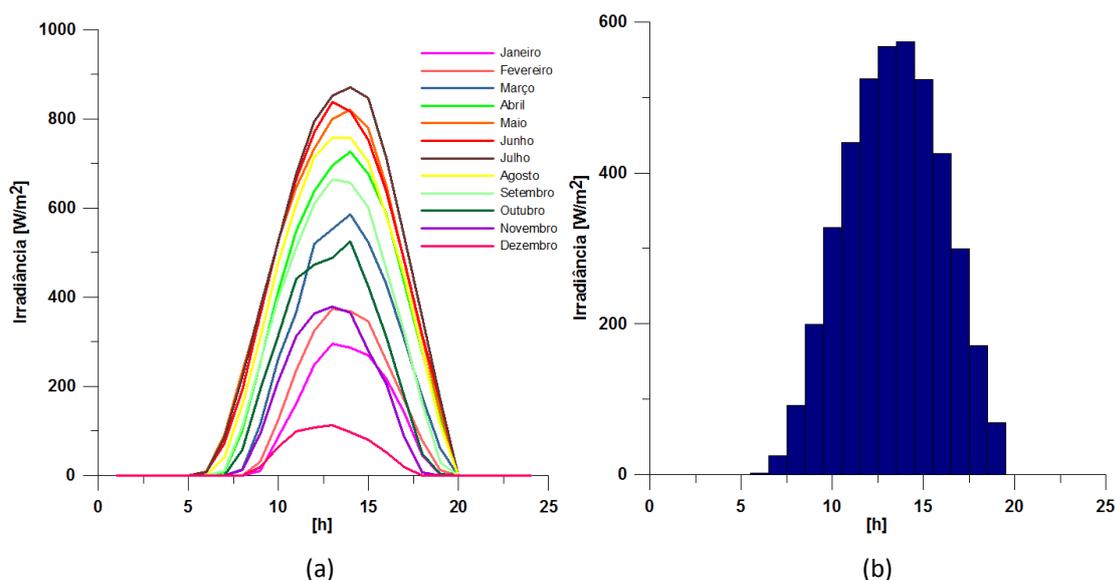


Figura 4.40 – (a) Radiação global medida mensal medida em Torres Vedras no ano de 2010, (b) Radiação global anual medida em Torres Vedras no ano de 2010.

Os dados obtidos na campanha experimental são posteriormente utilizados para validação dos resultados obtidos pela ferramenta de cálculo da radiação solar existente no sistema de informação geográfica utilizado neste trabalho.

Os mapeamentos obtidos com a ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica utilizado não têm como dado de entrada uma série de dados medidos, considerando apenas a altitude e a latitude do local como entrada. Assim, a validação dos mapeamentos apresentados é efectuada com base nos dados medidos na estação anemométrica instalada no centro urbano em estudo e o valor de radiação global assumido pelo GIS no mesmo local.

Tabela 4.26 – Desvio verificado entre o pontos de medida e o ponto correspondente obtido pela ferramenta de radiação solar do Sistema de Informação Geográfica.

	G (Wh/m ²) Ponto medida	G (Wh/m ²) SIG	Desvio (%)
TVD	4241	4307	3.39

É de notar que, apesar de se ter utilizado apenas um ponto de medida, o desvio encontrado face ao registado durante a campanha experimental é reduzido. Há a salientar que os dados de radiação foram obtidos durante no período de um ano (2012), não tendo sido efectuada qualquer correcção para geração de um ano típico por não disponibilidade de dados suficientes para o efeito.

Discussão de resultados

O método apresentado neste trabalho para a avaliação do recurso solar vai de encontro a vários estudos publicados nesta área. É comum o recurso a ferramentas de informação geográfica para o mapeamento solar, visto a maioria destas ferramentas apresentarem boa concordância com resultados experimentais.

No caso das zonas urbanas estudadas no concelho de Cascais, os resultados obtidos são concordantes com as estimativas apresentadas na base de dados PVGIS tal como se pode observar no estudo de validação efectuado neste documento. Ainda assim, e dado que foi possível efectuar uma campanha experimental de medição da radiação solar global numa zona da cidade de Torres Vedras, efectuou-se uma análise comparativa entre os dados medidos na estação experimental e os dados obtidos na base de dados PVGIS para o mesmo período temporal (tabela 4.27). O gráfico da figura 4.41 representa a média anual horária da radiação global considerando ambas as séries de dados – da estação anemométrica e da base de dados PVGIS.

A estação de medida foi instalada no topo de um edifício camarário e é constituída por um *datalogger* e um piranómetro (h=1.5m). Muito embora se tenha procurado colocar o piranómetro numa zona sem sombreamentos, o espaço disponível para a instalação do mesmo não cumpriu totalmente este requisito, pelo que o piranómetro ficou colocado numa zona onde existe algum sombreamento da parte da manhã. Este facto é notório na figura 4.40 onde se pode observar que os valores registados no *datalogger* até cerca das 11:00h são ligeiramente mais reduzidos do que os que se obtiveram na base de dados PVGIS. Ainda assim, a globalidade dos valores obtidos por ambas as vias são muito concordantes, sendo que a diferença nos valores totais de radiação global no período anual estudado é da ordem de 3%.

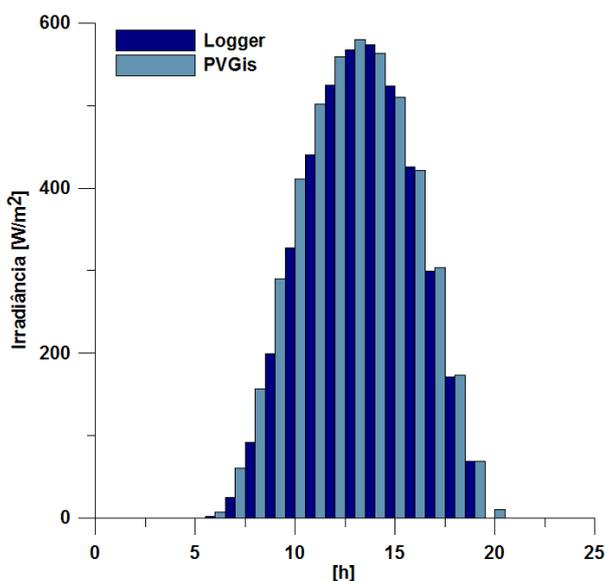


Figura 4.41 – Gráfico da irradiação média horária anual na cidade de Torres Vedras tendo como base os dados medidos e os dados obtidos na base de dados PVGIS.

Tabela 4.27 – Valores de Radiação global medidos em Torres Vedras e obtidos para o mesmo local na base de dados PVGIS.

Hora	Radiação Global <i>Logger</i> (Wh/m2)	Radiação Global PVGIS (Wh/m2)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	26	82
7	304	660
8	1098	1725
9	2389	3196
10	3934	4517
11	5278	5525
12	6299	6154
13	6811	6380
14	6881	6198
15	6283	5610
16	5111	4640
17	3598	3345
18	2049	1899
19	831	762
20	1	111
21	1	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0
Total	50895	50801

De acordo com o estudo efectuado, pode concluir-se que utilização de dados obtidos na base de dados PVGIS afigura-se eficaz, sendo de acrescentar ainda que a metodologia subjacente às estimativas efectuadas nesta plataforma foi já validada por diversos autores [Suri et al., 2007], [Hofierka e Suri, 2002].

No que respeita à ferramenta de mapeamento da radiação solar utilizada neste trabalho, esta encontra-se incluída na plataforma de informação geográfica disponibilizada pela empresa ESRI e tem sido utilizada com grande frequência para este fim. Brito et al. [2012] e Redweik et al. [2013], apresentaram um estudo sobre um bairro da cidade de Lisboa onde recorrem ao modelo de radiação solar para mapear o recurso solar na área em análise, complementando e validando os resultados com informação obtida na base de dados PVGIS. Importa no entanto salientar que esta ferramenta recorre a uma metodologia que não utiliza dados medidos mas sim apenas a localização geográfica e a altitude de cada ponto da grelha de simulação (no caso, o modelo digital de terreno da área em análise onde se incluem as cotas das coberturas e a geometria dos edifícios). No caso presente, foi aplicada uma metodologia semelhante à adoptada por Brito et al. [2012] e Redweik et al. [2013] sendo no entanto, de referir que as áreas ora analisadas são de dimensão superior e que no caso presente foram caracterizadas apenas as coberturas dos edifícios

Muito embora os resultados apresentados não incluam o estudo das fachadas dos edifícios, é considerado o sombreamento induzido pelos edifícios uns nos outros, o que permite a avaliação do potencial disponível em toda a área analisada descontando as zonas sombreadas.

Em termos gerais, os resultados obtidos nos dois casos de estudo apresentam valores muito próximos, sendo importante referir, que a área urbana de Torres Vedras estudada do ponto de vista do potencial solar é bastante mais reduzida do que a área do concelho de Cascais e apresenta uma densidade urbana bastante elevada. Nesta zona urbana os edifícios apresentam uma distribuição compacta sendo maioritariamente de alturas semelhantes o que minimiza o efeito de sombreamento uns nos outros. Dado que não foi avaliado o potencial solar nas ruas ou zonas abertas da zona urbana, esta questão não tem influência significativa nos resultados obtidos. Da mesma forma, e mais uma vez devido à semelhança existente nas cotas de cobertura dos edifícios desta zona urbana, o potencial solar existente é ligeiramente superior ao encontrado nas zonas urbanas dentro das duas freguesias do concelho de Cascais devido aos menores efeitos do sombreamento aí verificados.

No caso do concelho de Cascais e em especial as duas freguesias em análise, pela sua dimensão apresentam zonas com densidade urbana variada, podendo identificar-se várias zonas com densidade reduzida. Como é natural as zonas com maior densidade urbana e onde os edifícios possuem uma grande variedade de alturas, o efeito do sombreamento dos edifícios uns nos outros é mais notório.

À semelhança do caso do potencial eólico, seria desejável a existência de maior número de pontos de validação em especial na zona de Cascais onde não foi possível obter dados experimentais. Ainda assim, considera-se que os mapeamentos obtidos representam de forma aceitável a distribuição espacial do potencial solar da área geográfica em análise, permitindo replicar a metodologia desenvolvida a outras regiões.

Estudos integrando dados experimentais, mesmo aplicados a outras áreas distintas da aplicação energética, são menos frequentes do que os que se podem encontrar com recurso a bases de dados ou outras fontes, provavelmente devido aos custos associados às campanhas experimentais e respectivo equipamento de medida. Alguns exemplos são Spokas e Forcella [2006], Bullut [2003] ou Pons e Ninyerola [2008]. Neste último, os autores desenvolveram um método baseado na utilização de um modelo digital de terreno refinado com estações de medida no terreno. De acordo com os autores este método reveste-se do maior interesse devido à utilização de dados medidos como complemento aos mapeamentos obtidos num

sistema de informação geográfica. É no entanto de referir que apesar da sua importância este método obriga à utilização de dados de radiação experimentais o que nem sempre é possível obter pelas razões já expostas.

A metodologia desenvolvida neste trabalho permite efectuar uma avaliação do potencial solar de uma área urbana tendo em conta quer a orografia do terreno circundante à área urbana quer nas coberturas dos edifícios que a constituem. Esta metodologia, pela sua simplicidade, permite a sua aplicação a qualquer área urbana desde que exista informação sobre a geometria dos edifícios e respectivas cotas de cobertura e de terreno. É ainda de referir que a precisão dos resultados a obter com uma metodologia deste tipo dependem do detalhe da malha urbana existente para os estudos a efectuar. Uma malha urbana detalhada permite obter resultados mais precisos e fiáveis enquanto um menor detalhe torna os resultados mais grosseiros. Ainda assim, a introdução de uma malha urbana ainda que grosseira permite realizar uma avaliação do potencial solar para efeitos de planeamento no que respeita à identificação de locais de interesse para a instalação de sistemas de aproveitamento solar fotovoltaico como é objectivo deste trabalho.

5. IDENTIFICAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO URBANO DE ORIGEM RENOVÁVEL

Num contexto energético de *Cidades Inteligentes*, a determinação do potencial energético de origem renovável em zonas urbanas, constitui uma ferramenta poderosa de concepção e planeamento para a capacidade destas regiões, que potencia o aproveitamento destes recursos endógenos numa visão holística dos usos sustentáveis no futuro. Nesse enquadramento, e com vista a apoiar o planeamento do aproveitamento de recursos renováveis em ambiente urbano, desenvolveu-se e aplicou-se – a casos de estudo concretos – uma metodologia para a determinação desse potencial tendo por base ferramentas simples de informação geográfica e os modelos de avaliação dos potenciais eólico e solar descritos nos capítulos anteriores. Nos subcapítulos que se seguem, apresenta-se a metodologia desenvolvida para a identificação e quantificação do recurso das duas componentes renováveis aqui tratadas, bem como o potencial energético no caso do aproveitamento conjunto das duas fontes renováveis. Para ilustrar a metodologia desenvolvida, apresentam-se ainda dois casos de estudo em duas zonas urbanas.

5.1 Identificação do potencial urbano renovável

5.1.1 Quantificação do potencial eólico

A quantificação do potencial eólico é efectuada à custa da informação georeferenciada do potencial eólico estimado com base na metodologia descrita no capítulo 3. Como dados de entrada, para além do mapeamento do potencial eólico através das grandezas velocidade média e fluxo de potência incidente, é ainda necessário introduzir as variáveis geometria dos edifícios e descrição do terreno envolvente.

No que diz respeito aos parâmetros do vento, há que definir os limites mínimos para a viabilidade da instalação de turbinas eólicas de pequena capacidade. Neste caso, considerou-se importante seleccionar como parâmetros condicionantes da viabilidade de um projecto eólico em ambiente urbano, a velocidade média anual do vento e o fluxo de potência incidente. Para definir os limites mínimos optou-se por considerar a velocidade média do vento à qual corresponde um factor de capacidade, F_c , entre 10% e 20%, valores estes sugeridos por [WindPower, 2008].

$$F_c = \frac{NEPs}{8760}; \quad (5.1)$$

onde F_c é o factor de capacidade, $NEPs$ é o número de horas de produção energética anual equivalentes à potência nominal do modelo de turbina a testar e 8760 é o nº de horas do ano.

Considerando o valor médio do intervalo mencionado, em termos de horas anuais equivalentes da produção nominal, 15% corresponde a cerca de 1300h de produção anual à potência nominal. Muito embora este valor dependa fortemente do regime de vento existente na região em análise e do modelo de turbina a considerar, pode aceitar-se como valor mínimo de velocidade média anual do vento, 5 m/s, e para o fluxo de potência incidente, 130 W/m². É ainda de notar que Weis e Ilinca [2010] referem igualmente o valor de 5.0 m/s como limite mínimo da velocidade do vento num meio urbano, mas para h=30m. Muito embora estes autores refiram que este pode ser insuficiente do ponto de vista económico, no caso presente, os mapeamentos do potencial eólico são calculados para h=10m, o que constitui uma abordagem mais conservativa do que a daqueles autores. A tabela 5.1 resume os parâmetros a considerar na selecção de áreas de interesse.

Tabela 5.1 – Valores mínimos para o aproveitamento do potencial eólico disponível de uma área urbana considerando o rendimento médio de um sistema eólico de conversão de energia.

Velocidade média anual do vento (m/s)	Fluxo de potência incidente (W/m ²)
5.0	130

Os sistemas de informação geográfica constituem, actualmente, ferramentas poderosas de planeamento e manuseamento de informação georreferenciada, permitindo ainda a programação de modelos simples que optimizam os resultados e que conduzem aos objectivos propostos através de um menor número de operações.

A metodologia para identificação do potencial eólico disponível numa zona urbana passa pela introdução dos mapeamentos de velocidade média do vento, fluxo de potência incidente e informação da malha urbana da área em análise (polígonos, cotas etc) num sistema de informação geográfica.

Os mapeamentos obtidos pela metodologia anterior são sujeitos a um conjunto de procedimentos que passam pela sua reclassificação de acordo com as condições impostas (equações 5.2 e 5.3).

$$\begin{cases} \text{Se } v_i \geq 5.0 \text{ms}^{-1}; v_{i,rec} = 1 \\ \text{Se } v_i < 5.0 \text{ms}^{-1}; v_{i,rec} = 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\begin{cases} \text{Se } FPI_i \geq 130 \text{Wm}^{-2}; FPI_{i,rec} = 1 \\ \text{Se } FPI_i < 130 \text{Wm}^{-2}; FPI_{i,rec} = 0 \end{cases} \quad (5.3)$$

Os resultados das grelhas reclassificadas para os novos valores de cada variável são posteriormente multiplicados obtendo-se um mapa intermédio (com 0 e 1) (equação 5.4). A área ocupada pelos pontos que obedecem às condições impostas vai permitir quantificar o potencial eólico disponível da região em análise.

$$Pot_{0,1} = v_{i,rec(0,1)} \times FPI_{i,rec(0,1)}; \quad (5.4)$$

onde $Pot_{0,1}$ corresponde à grelha resultante do produto das grelhas de velocidade do vento e fluxo de potência incidente escrita em 0 e 1.

A grelha resultante pode ainda ser multiplicada pela inicialmente existente de cada variável para apresentação dos resultados (equações 5.5 e 5.6).

$$Pot_{FPI} = Pot_{0,1} \times FPI_i; \quad (5.5)$$

$$Pot_v = Pot_{0,1} \times v_i. \quad (5.6)$$

É entretanto definida uma área mínima de referência que depende da tecnologia a instalar, em particular do diâmetro do rotor da turbina, e do espaçamento (em número de diâmetros)

entre as turbinas a instalar. Esta área mínima corresponde à área de um quadrado cujos lados têm o comprimento igual ao nº de diâmetros de espaçamento entre cada turbina na direcção normal e paralela ao escoamento dominante (equação 5.7).

$$A_{minWT} = (N_1 \times D) \times (N_2 \times D); \quad (5.7)$$

onde A_{minWT} é a área mínima a considerar, D é o diâmetro da turbina seleccionada e N_1 e N_2 são o número de diâmetros mínimo considerado para espaçamento inter-turbina nas direcções normal e paralela ao escoamento dominante, respectivamente. Neste caso considerou-se um espaçamento mínimo entre turbinas da ordem de grandeza do normalmente utilizado para o espaçamento de turbinas eólicas em terrenos complexos (normalmente 3D na direcção perpendicular à direcção do vento e 8D na direcção alinhada com o vento dominante, i.e. $24 D^2$, ou para simplificar, $25 D^2$ ¹⁶. O potencial eólico disponível pode ser calculado com a equação 5.8.

$$Pot_{Eol} = \frac{A_{tot} \times Pot_{WT}}{A_{minWT}}; \quad (5.8)$$

onde Pot_{Eol} é o potencial eólico disponível da área estudada (em kW), A_{tot} é a área total ocupada pelas células da grelha que obedecem a todas as condições impostas e Pot_{WT} é a potência nominal do modelo de turbina que serviu de referência ao estudo. A figura 5.1 apresenta o esquema ilustrativo da metodologia proposta para a quantificação do potencial eólico em áreas urbanas.

5.1.2 Quantificação do potencial solar

O procedimento para a componente solar é semelhante ao da componente eólica. A quantificação do potencial solar fotovoltaico pode ser efectuada de várias formas, sendo factor comum a área disponível para instalação de sistemas de aproveitamento solar para produção de electricidade.

Tendo como base o mapeamento do potencial solar numa dada área urbana, é possível estabelecer condições para a determinação de pontos adequados ao aproveitamento fotovoltaico. Ao contrário do caso da tecnologia eólica, a área disponível para dispor os painéis fotovoltaicos configura-se da maior importância para a determinação do potencial solar fotovoltaico utilizável uma vez que a área ocupada por um painel é superior, à ocupada por uma turbina eólica. Por outro lado, a distribuição espacial dos painéis fotovoltaicos será afectada pelo sombreamento induzido pelo edificado, que é naturalmente contabilizado pelo modelo de radiação do SIG, e ainda pela inclinação dos telhados onde serão instalados.

¹⁶ Ao contrário da abordagem comum para os parques eólicos, assumiu-se que a distância entre turbinas nas direcções paralela e normal eram iguais.

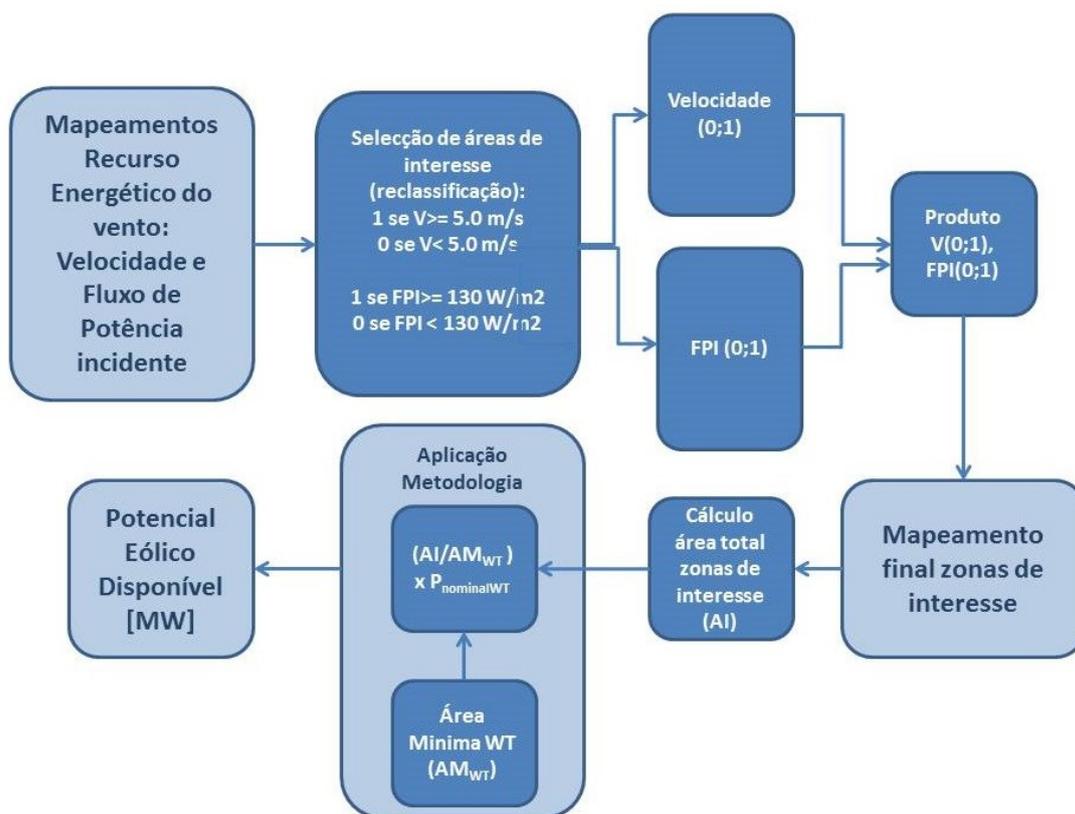


Figura 5.1 – Metodologia de cálculo do potencial eólico disponível de uma área urbana.

Num trabalho recentemente publicado por Brito et al. [2012] os autores avaliaram o impacto global dos sombreamentos e do efeito das orientações dos diferentes telhados em ambiente urbano no potencial solar da área disponível, tendo obtido as seguintes conclusões (Figura 3.5):

- no limite das baixas penetrações (<10% da área disponível), a contabilização do potencial pode ser feita admitindo que todos os painéis se encontram orientados segundo a direcção óptima;
- no limite das altas penetrações (> 90% da área disponível), a contabilização do potencial solar pode ser feita admitindo que todos os painéis se encontram na horizontal e ocupam a totalidade da área disponível.

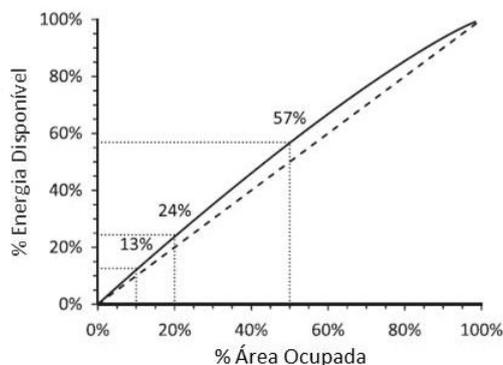


Figura 5.2 – Fração da irradiação disponível em função da fracção do espaço disponível ocupada, tendo em atenção os sombreamentos e a orientação dos painéis (linha a cheio) e admitindo que os painéis são dispostos na horizontal na área disponível (linha a tracejado) [Brito et al., 2012].

Neste contexto, e uma vez que estamos interessados numa avaliação do potencial global, ou seja, do que poderemos obter num limite, ainda que irrealista do ponto de vista económico, de máxima ocupação do espaço disponível, optou-se por utilizar a simplificação de admitir que a irradiação relevante é a irradiação em superfícies horizontais.

Desta forma há ainda que definir um valor de irradiação mínima para limitar e seleccionar as áreas de interesse. Para tal recorreu-se à base de dados PVGIS tendo-se obtido como valor mínimo para Portugal, 1.64 MWh/m²/ano (superfície plana sem sombreamento). É de notar que a este valor foi ainda aplicada a redução referente ao desvio relativo aos anos com menos sol estimados para Portugal. Assim, o valor de irradiação global final é igual a 1.54 MWh/m²/ano [Suri et al., 2007a]. Da mesma forma, a área ocupada pelos painéis na cobertura dos edifícios, é outro dos parâmetros de interesse. Considerando que o conjunto de painéis solares de um sistema fotovoltaico típico, ou seja, que utiliza a tecnologia de silício dominante no mercado, com 3.64kW (o limite para a instalação destes sistemas no regime de tarifa bonificada) pode ocupar cerca de 26m², considerou-se como limite mínimo este valor acrescido de 10% para outros usos, o que corresponde a sensivelmente 29m² de área mínima.

Assim, as condições mínimas para a quantificação do potencial solar fotovoltaico de uma área urbana são:

- Irradiação mínima >1.54 MWh/m²/ano
- Área de cobertura mínima > 29 m²

Estas condições são aplicadas ao mapeamento da irradiação na área em análise sendo o procedimento semelhante ao apresentado para o caso da tecnologia eólica. Neste caso só é contabilizada a área ocupada pelos edifícios uma vez que não se considera exequível a instalação de painéis fotovoltaicos fora desta área.

Após aplicadas todas as condições e seleccionados os pontos de interesse, é determinada a área ocupada pelos mesmos (expressões 5.9 e 5.10), e de acordo com o mencionado acima, reduzida em 10%.

$$Pto_{disp} \equiv Irr > 1.54 \text{ (MWh/m}^2\text{/ano)} \text{ e } A_{min-roof} > 29 \text{ (m}^2\text{)} ; \quad (5.9)$$

onde Pto_{disp} é o ponto que obedece às condições impostas (ponto “disponível”), Irr é a Irradiação no ponto i e $A_{min-roof}$ é a área mínima da cobertura de um edifício considerada para a instalação dos painéis fotovoltaicos. A área total (A_{tot}) corresponde à área ocupada por todos os pontos que obedecem às condições impostas.

$$A_{tot} = \sum_{i=1}^N A_{pol_i} ; \quad (5.10)$$

onde A_{pol_i} é a área de cada polígono formado pelos pontos seleccionados. A esta área é ainda necessário aplicar um factor de redução relacionado com o preenchimento de cada cobertura de edifício com painéis fotovoltaicos.

De acordo com o exposto, a área de cobertura é aproveitada em cerca de 90% para a instalação de sistemas PV, pelo que a área final (A_{fin}) é dada pela expressão 5.11.

$$A_{fin} = A_{tot} \times 0.90 . \quad (5.11)$$

A potência fotovoltaica que tipicamente se poderá obter a partir desta área utilizando a tecnologia dominante, correspondente a mais de 85% do mercado, ou seja, a tecnologia de silício cristalino, será dada por:

$$P_{dispS} = 1000 \times A_{fin} \times \eta_{painel} \times \eta_{sistema} ; \quad (5.12)$$

onde P_{disp} é a potência disponível (em W), η_{painel} representa a eficiência do painel fotovoltaico, e $\eta_{sistema}$ representa a eficiência do resto do sistema fotovoltaico (cablagem, inversor, etc.). Para a tecnologia de silício cristalino as eficiências em questão são tipicamente da ordem de 15% para os painéis, e de 75% para o restante sistema.

O potencial solar disponível é dado pela equação 5.13.

$$Pot_{SolPV} = \frac{A_{fin} \times Pot_{PV}}{A_{minPV}} ; \quad (5.13)$$

onde Pot_{SolPV} é o potencial disponível da área estudada (em kW), A_{tot} é a área total ocupada pelos pontos que obedecem a todas as condições impostas e Pot_{PV} é a potência nominal do modelo de painel fotovoltaico que serviu de referência ao estudo e A_{minPV} é a área ocupada pelo painel.

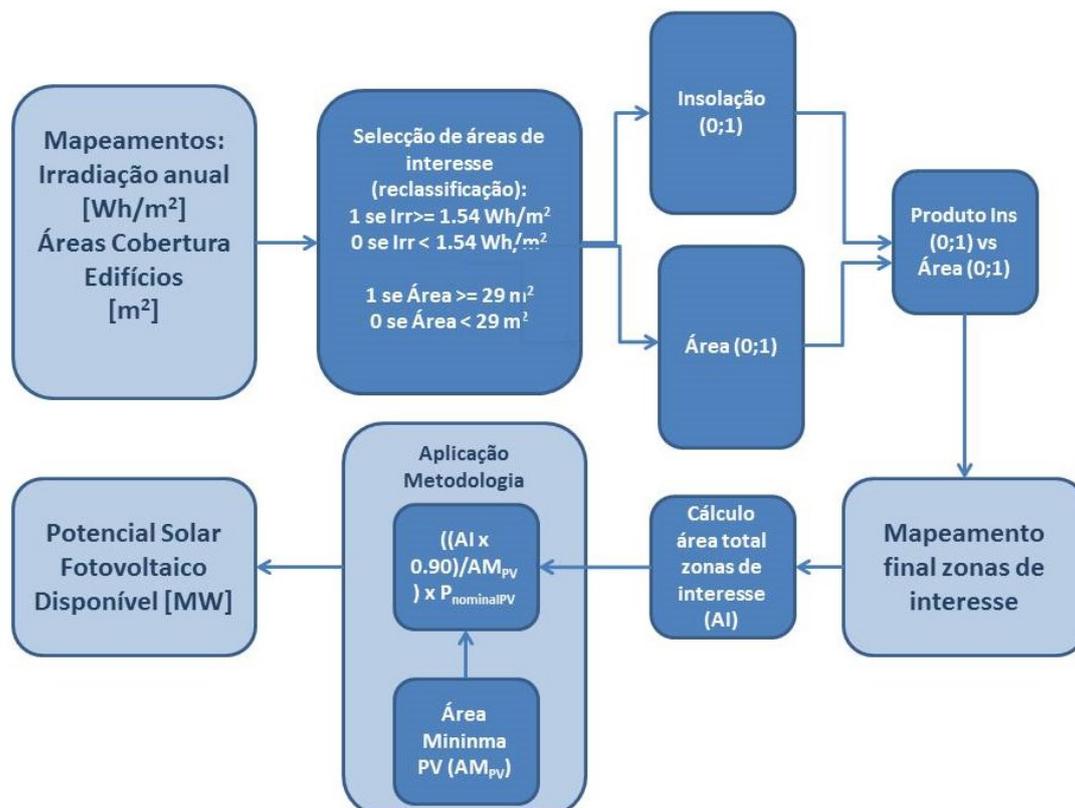


Figura 5.3 – Metodologia de cálculo do potencial solar fotovoltaico disponível de uma área urbana.

5.1.3 Método de determinação do potencial renovável integrado

A determinação do potencial renovável integrado (eólico + solar fotovoltaico) é efectuada assumindo que a utilização de espaços pode ser partilhada com poucas interferências. Assim, e dado que as áreas de interesse foram já determinadas com a aplicação dos métodos anteriormente descritos, há que definir a percentagem de ocupação interferente de ambas as tecnologias. Tendo como base a distância mínima necessária à instalação de pequenas turbinas, é pouco provável que se instalem mais do que uma, ou no limite, duas turbinas no topo de um edifício, pelo que se torna difícil definir um valor percentual adequado para a ocupação das áreas comuns. No entanto, e para representar um cenário conservativo, optou-se por descontar 10% [Wiginton et al., 2010] também às áreas obtidas no procedimento anterior e a capacidade renovável é então quantificada para cada tecnologia. O potencial conjunto é posteriormente calculado com base na soma dos resultados obtidos para cada tecnologia. A ocupação total das duas tecnologias passa pela aplicação das seguintes equações a cada ponto das grelhas de recurso energético, $p_{i,eólica}$ no caso dos mapeamentos dos parâmetros eólicos e $p_{i,solar}$ no caso dos mapeamentos dos parâmetros solares:

$$p_{i,eólica} = \begin{cases} 1, & \text{Se } p_{i,eólica} \in \{E\} \\ 0, & \text{Se } p_{i,eólica} \notin \{E\} \end{cases}; \quad (5.14)$$

$$p_{i,solar} = \begin{cases} 2, & \text{Se } p_{i,solar} \in \{S\} \\ 0, & \text{Se } p_{i,solar} \notin \{S\} \end{cases}; \quad (5.15)$$

$$p_{i,S+E} = p_{i,eólica} + p_{i,solar}; \quad (5.16)$$

onde $\{E\}$ e $\{S\}$ representam os conjuntos que incluem os parâmetros definidos como limites mínimos adequados aos aproveitamentos eólicos e solares, respectivamente e $p_{i,S+E}$ representa a grelha final de áreas de interesse (para cada tecnologia e comuns).

Neste caso, as duas grelhas de pontos seleccionados para ambas as tecnologias, são posteriormente somadas, obtendo-se valores entre 0 e 3, onde “0 – ponto sem potencial energético adequado”, “1 – ponto com potencial eólico adequado”, “2 – ponto com potencial solar adequado” e “3 – ponto com potencial eólico e solar adequado”.

Posteriormente, são determinadas as áreas correspondentes à ocupação de cada conjunto. Nos pontos comuns considera-se que a utilização de cada tecnologia pode co-existir, tendo-se assumido, numa perspectiva conservativa e de planeamento da utilização dos espaços, que é possível a sobreposição de tecnologias. É, no entanto, de referir que, num cenário de sobreposição das duas tecnologias, existe interferência relacionada com o sombreamento das turbinas eólicas nos painéis fotovoltaicos (sendo que os painéis fotovoltaicos não causam interferência no funcionamento das turbinas eólicas). Desta forma, estimou-se a área de sombreamento provocada pelas turbinas eólicas nos painéis fotovoltaicos, considerando o pior cenário, i.e., o sombreamento produzido no dia 21 de Dezembro (solstício de Inverno). Para tal recorreu-se às equações 5.17 a 5.19 considerando que a torre de suporte da turbina eólica de teste tem altura igual a 10m [Shen e Tzempelikos, 2013].

$$H_{Obst} = L_{Sh} \times \tan \alpha; \quad (5.17)$$

onde H_{Obst} é a altura do obstáculo, L_{Sh} é o comprimento da sombra e α é o ângulo de altitude solar, dado por [Nguyen et al., 2007]:

$$\sin \alpha = \sin L \times \sin \delta_S + \cos L \times \cos \delta_S \times \cos h_S ; \quad (5.18)$$

onde δ_S é a declinação solar dada pela equação 5.21, L a latitude e h_S o ângulo horário solar que toma o valor 0° ao meio dia solar.

$$\sin \delta_S \cong \sin 23.45^\circ \times \sin \left[\frac{360 \times (284 + n_G)}{365} \right]^\circ ; \quad (5.19)$$

onde n_G é o dia do mês no calendário Gregoriano.

No caso presente, o comprimento máximo da sombra obtido para a região centro oeste do país foi de 22.4 m. A área da sombra depende do diâmetro da turbina a considerar, pelo que a sombra por ela produzida será, no limite máximo, igual à área de um rectângulo com comprimento igual à sombra máxima e largura igual à da torre de suporte acrescida da área do rotor da turbina.

Para tal determinou-se a potência por unidade de área referente a “n” modelos de turbina disponíveis no mercado, tendo-se calculado o valor médio da potência por unidade de área em sombra através da equação 5.20.

$$\frac{P}{A_{Sh}} = a \times P_n + b ; \quad (5.20)$$

onde $\frac{P}{A_{Sh}}$ representa a potência por unidade de área em sombra, P_n é a potência nominal eólica de referência, A_{Sh} é a área de sombra provocada por uma turbina, e a e b são os coeficientes de regressão que assumem os valores de 0.0089 e 0.1302, respectivamente.

A área em sombra provocada pelas turbinas a ser instaladas na área comum, A_{ShWT} , é calculada através da equação 5.21.

$$A_{ShWT} = A_{Sh} \times N_{WT} ; \quad (5.21)$$

N_{WT} é o número de turbinas a instalar na área comum a ambas as tecnologias.

Desse modo, o potencial renovável integrado disponível é obtido de acordo com a seguinte equação:

$$P_{dispE+S} = \left[\left(\frac{(A_{SE} \times 0.90) + A_E}{A_{minWT}} \times P_{nom_E} \right) + \left(\frac{(A_{SE} + A_S) \times 0.90}{A_{minPV}} \times P_{nom_PV} \right) - (P_{PVsh}) \right]; \quad (5.22)$$

onde $P_{dispE+S}$ é o potencial disponível eólico e solar fotovoltaico; A_{SE} é a área ocupada pelos pontos onde ambas as tecnologias apresentam potencial adequado; A_S é a área ocupada pelos pontos com potencial solar adequado; A_E é a área ocupada pelos pontos com potencial eólico adequado; P_{nom_E} é a potência nominal de uma turbina eólica de referência e P_{PVsh} é o potencial solar PV em área de sombra que pode ser calculado através da equação 5.23.

$$P_{PVsh} = \frac{P_{dispE}}{A_{SE}} \times A_{ShWT} ; \quad (5.23)$$

A figura 5.4 ilustra a sequência de acções no processo de identificação do potencial renovável integrado.

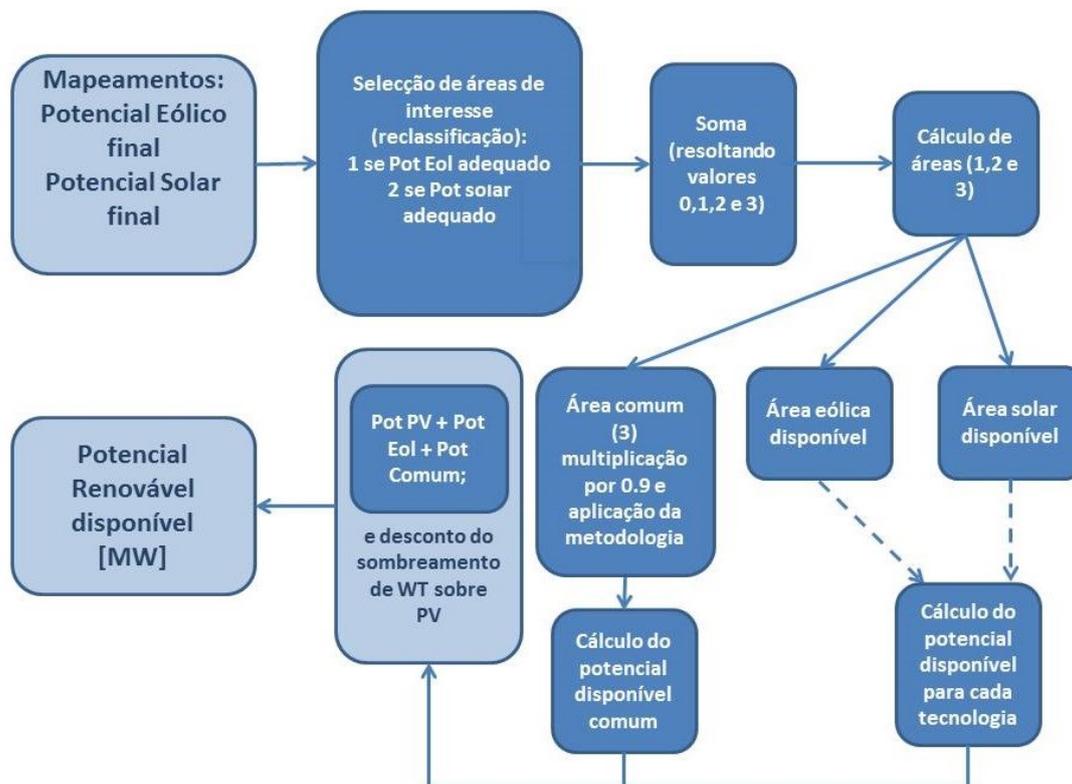


Figura 5.4 – Metodologia de identificação do potencial renovável integrado de uma área urbana.

5.2 Aplicação da metodologia de planeamento a áreas urbanas

Para ilustrar a metodologia desenvolvida, os procedimentos descritos em 5.1 foram aplicados às duas áreas urbanas abordadas nos casos de estudo. O cálculo do potencial eólico disponível foi determinado para a totalidade da área urbana tendo em conta zonas de edificado e zonas livres segundo a metodologia descrita no capítulo 3 e os factores de correcção médios determinados no capítulo 4. Para este cálculo, foram usadas as condições mínimas de velocidade média anual do vento e de fluxo de potência incidente descritas nas equações 5.2 a 5.8 em ambas as áreas estudadas neste trabalho. Esse objectivo foi concretizado através do desenvolvimento de ferramentas simples obtidas com recurso a uma ferramenta de programação incluída no sistema de informação geográfica utilizado que permite a construção de *scripts* – Model Builder [ESRI, 2010]. Os resultados obtidos com a aplicação deste modelo são posteriormente sujeitos a um pós-processamento, o qual tem como objectivo o cálculo da capacidade passível de ser instalada nas áreas disponíveis identificadas.

No que respeita à identificação do potencial solar disponível, foi igualmente desenvolvido um modelo para o cálculo das áreas disponíveis para a instalação de painéis solares fotovoltaicos sendo os resultados obtidos igualmente sujeitos a pós-processamento. Para além destas ferramentas, foi ainda desenvolvida uma terceira que permite a identificação de zonas potencialmente interessantes para a instalação de ambos os tipos de sistemas. Neste caso são

utilizados os ficheiros de saída de cada tecnologia e aplicadas as formulações apresentadas no capítulo 5.1 deste documento.

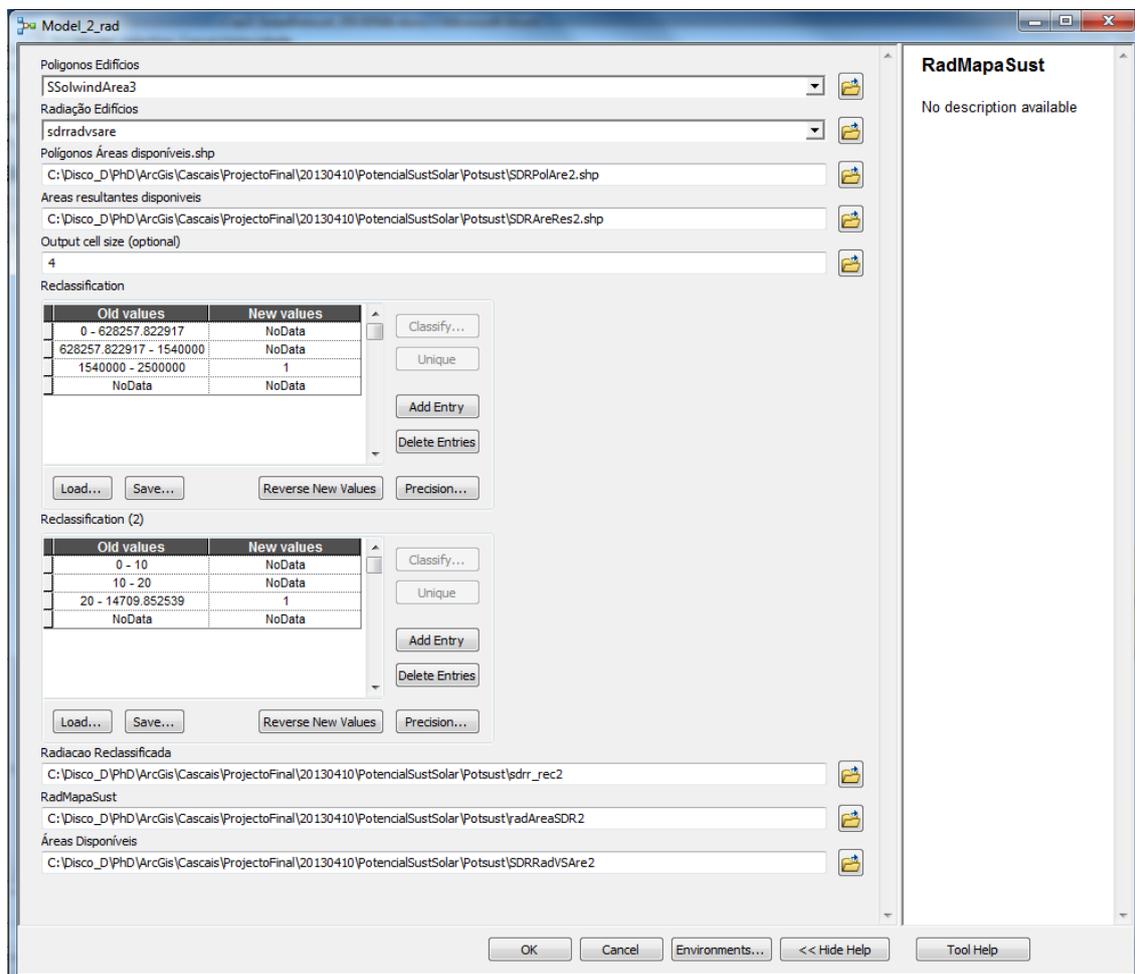


Figura 5.5 – Quadro inicial do modelo desenvolvido para a identificação do potencial solar disponível.

A metodologia (e os modelos) desenvolvida permite a alteração dos ficheiros de entrada e de saída pelo utilizador, bem como a definição de novos limites condicionantes da selecção de áreas. Desta forma é possível utilizar esta metodologia para qualquer área geográfica urbana desde que os formatos de entrada sejam os adequados. A título exemplificativo, a figura 5.5 apresenta o quadro inicial de um dos modelos desenvolvidos.

Caso de estudo A – Concelho de Cascais

Potencial Eólico

De acordo com o exposto acima, apresenta-se na figura 5.6 o resultado obtido por aplicação das condições impostas na metodologia desenvolvida a ambas as freguesias em análise no concelho de Cascais.

Após obtenção do mapa final com os pontos que obedecem às condições impostas, procedeu-se ao cálculo da área ocupada pelos mesmos (figura 5.6). Para cada uma das freguesias considerou-se um modelo de micro-turbina disponível no mercado para o cálculo do potencial disponível. Neste caso seleccionou-se um modelo de turbina de eixo horizontal com 2.4kW de

potência nominal e 3.72 m de diâmetro o que corresponde a uma área de varrimento do rotor igual a 10.86 m² (ver características da turbina no Anexo IV).

Considerando uma distância inter-turbina igual a 5 diâmetros, a área mínima a considerar corresponde à área de um quadrado com 18.6 m de lado, o que corresponde a, aproximadamente, 346 m². O potencial disponível é então obtido pelo quociente entre a área total abrangida pelos pontos válidos para aproveitamento eólico e a área mínima exequível para a instalação de uma micro-turbina eólica tal como descrito no capítulo 5 deste trabalho. A tabela 5.2 e a figura 5.7 apresentam os resultados obtidos em cada freguesia.

Tabela 5.2 Potencial eólico nas áreas em análise considerando uma turbina de 2.4kW.

Freguesia	Área Total (m ²)	Área disponível (m ²)	Potencial Eólico (MW)
Estoril	8891376	1607856	11.152
São Domingos de Rana	20442544	540544	3.749

É de notar que neste estudo não foram tidos em conta aspectos relacionados com a distância à rede eléctrica para ligação das turbinas, as ruas e espaços abertos entre edifícios, ou outros que possam condicionar a instalação de turbinas eólicas. As ruas e espaços abertos são na realidade um tema de difícil abordagem uma vez que exige a disponibilidade de informação georeferenciada sobre os elementos existentes na zona urbana que não correspondem ao edificado, bem como um nível de detalhe em termos de representação da malha urbana e posterior modelação numérica que não se enquadra nos objectivos deste trabalho. No método aqui exposto podem, no entanto, ser introduzidas quantas restrições/condições se pretenderem, tornando-se os resultados mais ou menos precisos de acordo com a informação disponível para o efeito.

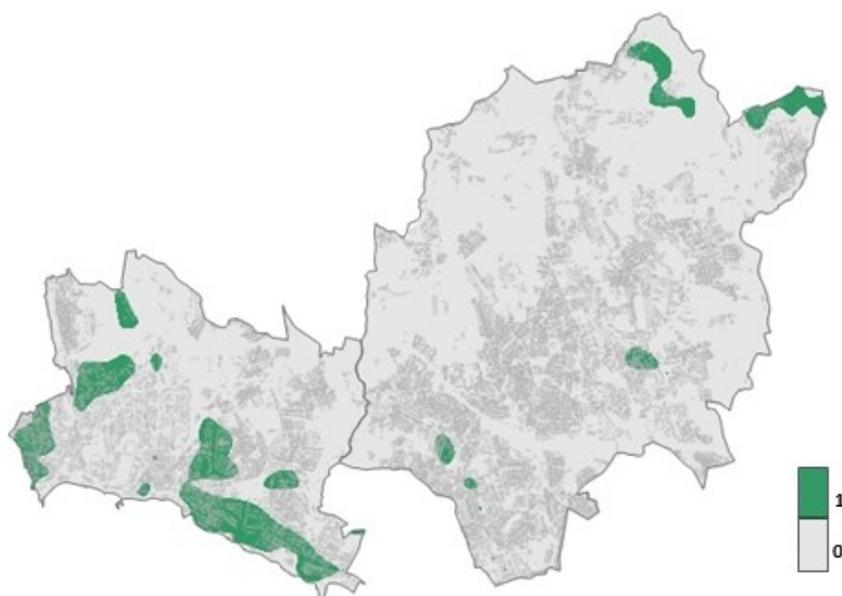


Figura 5.6 - Áreas resultantes da aplicação das restrições ao mapeamento da velocidade do vento e do fluxo de potência incidente nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana.

Potencial solar

O cálculo do potencial solar fotovoltaico disponível foi efectuado com base na metodologia apresentada no capítulo 4 deste documento. Para além do exposto no capítulo mencionado foram ainda rejeitadas as áreas livres de edifícios uma vez que não se afigura exequível na maioria das cidades a instalação de sistemas fotovoltaicos fora dos edifícios por questões práticas e logísticas relacionadas com a localização dos mesmos. Assim, aos mapeamentos obtidos excluíram-se as zonas envolventes aos edifícios. As figuras que se seguem apresentam os mapeamentos da radiação solar global apenas nos topos dos edifícios em ambas as áreas em análise. A distribuição do potencial solar no topo dos edifícios encontra-se representada na figura 5.9 para ambas as freguesias em análise.

Aos mapeamentos apresentados na figura 5.9 foi aplicada a condição referente ao limite mínimo de irradiação necessário ao funcionamento eficiente de um sistema fotovoltaico apresentado no capítulo 5.1. Os resultados obtidos apresentam-se na figura 5.10. Nas figuras 5.11 e 5.12 podem ver-se ampliações da figura 5.6 referentes às zonas assinaladas com um rectângulo para cada freguesia. Tendo em conta a metodologia apresentada em 5.1.2 e considerando um modelo de painel fotovoltaico padrão com 170W de potência nominal e 1.26m² de área, obtém-se para cada freguesia o potencial solar fotovoltaico disponível apresentado na tabela 5.3.

Tabela 5.3 Potencial solar fotovoltaico disponível nas áreas em análise de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5.1.2.

Freguesia	Área Total (m ²)	Área disponível (m ²)	Potencial solar fotovoltaico disponível (MW)
Estoril	8891376	376112	45.670
S. Domingos Rana	20442544	827280	100.455

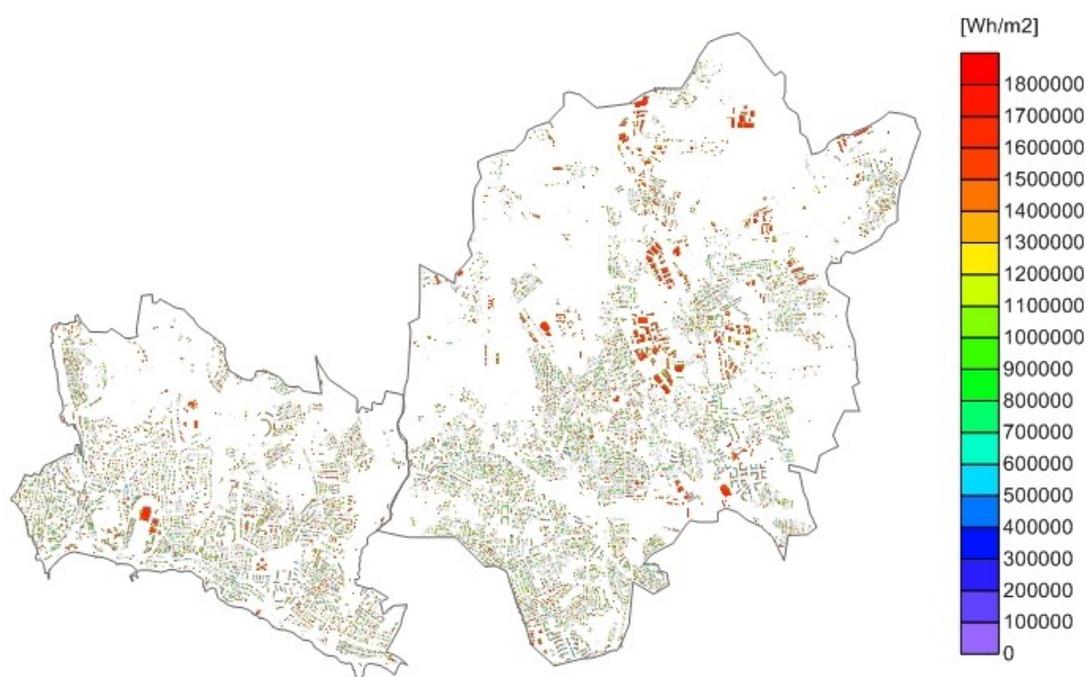


Figura 5.9 – Mapeamento da irradiação no topo dos edifícios nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana.

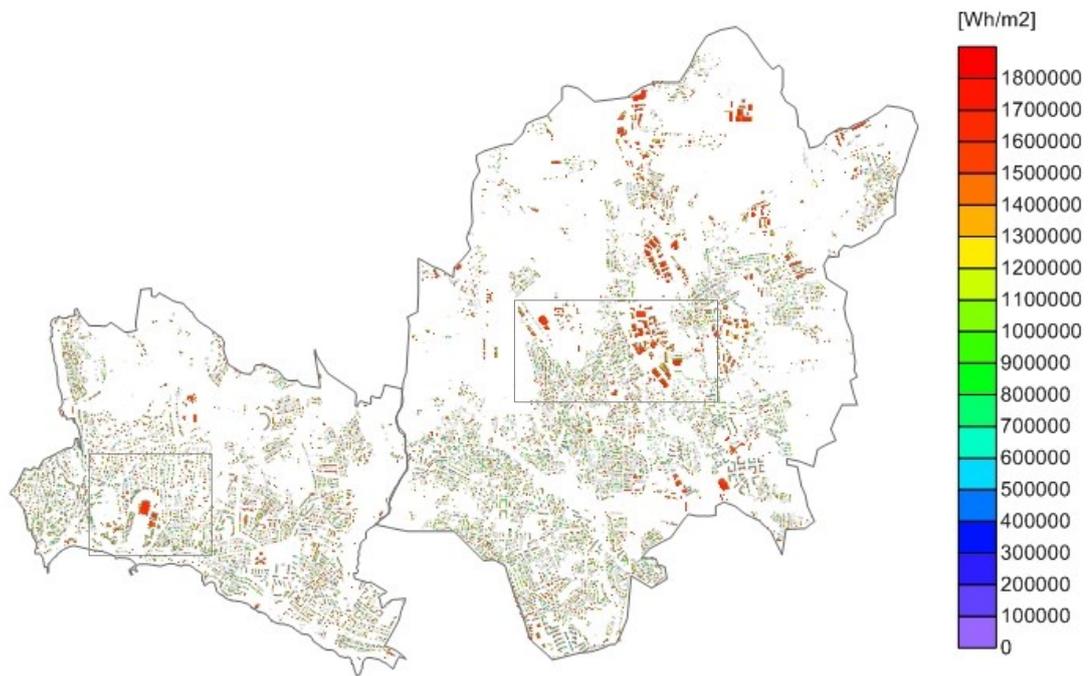


Figura 5.10 – Mapeamento da irradiação no topo dos edifícios nas freguesias de Estoril e São Domingos de Rana após aplicação da metodologia.

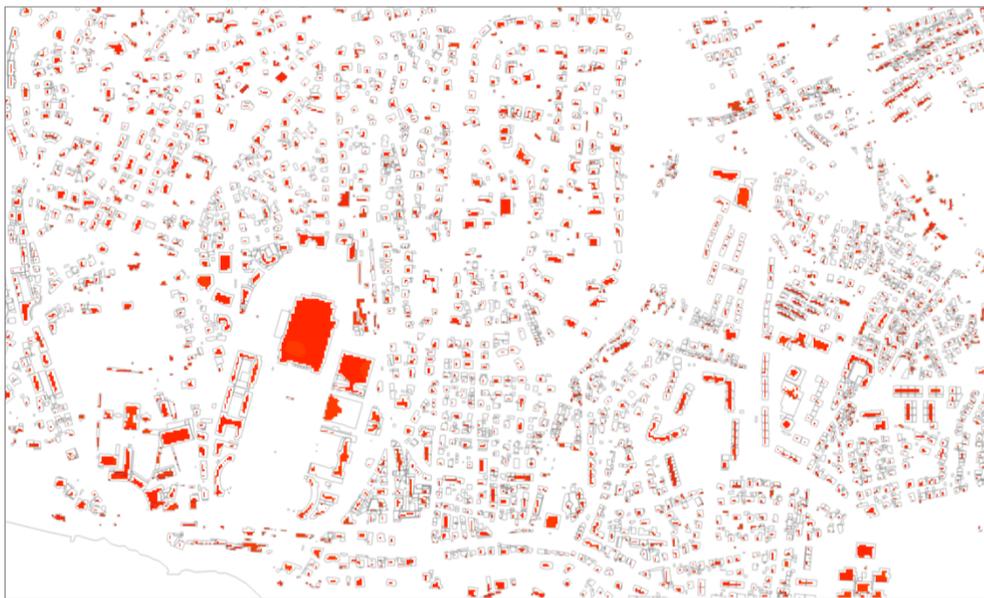


Figura 5.11 – Ampliação do mapeamento da insolação no topo dos edifícios na freguesia de São Domingos de Rana após aplicação da metodologia.



Figura 5.12 – Ampliação do mapeamento da irradiação no topo dos edifícios na freguesia de São Domingos de Rana após aplicação da metodologia.

Potencial renovável integrado

Finalmente foi ainda aplicada à zona em estudo a metodologia desenvolvida para identificar o potencial renovável integrado (eólico + solar fotovoltaico). A figura 5.13 apresenta as áreas resultantes obtidas para cada tecnologia e as áreas comuns.

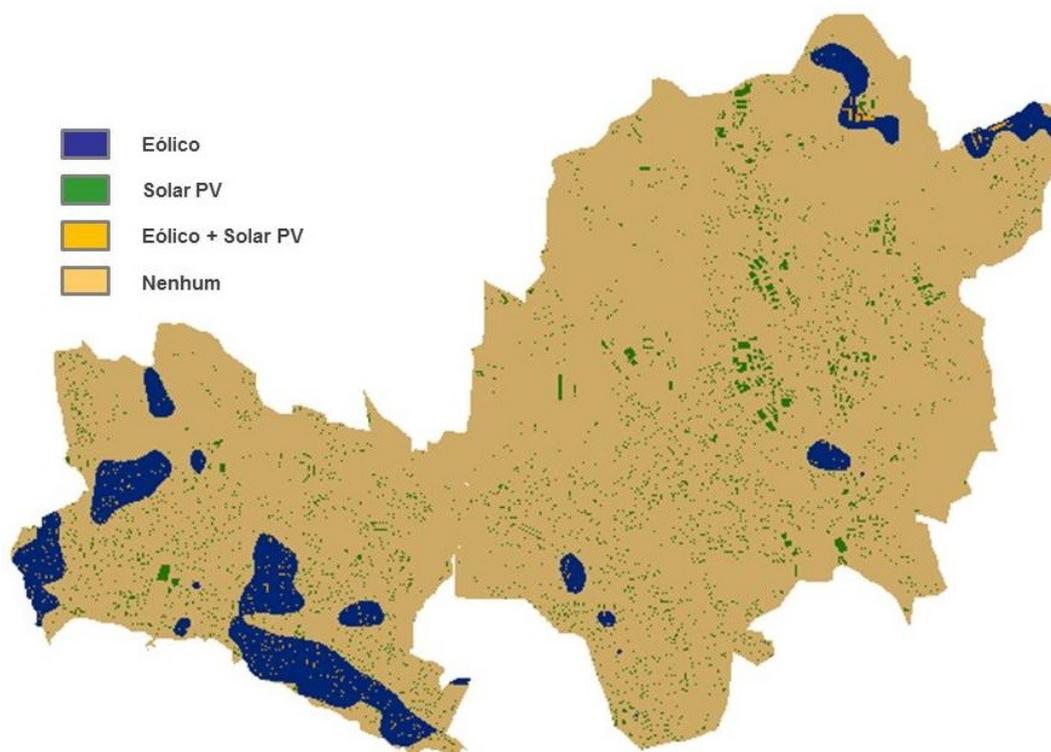


Figura 5.13 – Áreas resultantes da aplicação da metodologia de identificação do potencial renovável integrado em ambas as freguesias.

Os resultados obtidos por aplicação da metodologia apresentam-se na tabela 5.4, tendo em conta uma turbina de referência com 2.4 kW de potência nominal e altura de torre de sustentação igual a 10m, cuja área de sombreamento corresponde a 16.81 m²; e um painel PV de referência com 1.26 m² de área e 170W de potência nominal.

Tabela 5.4 - Potencial renovável integrado nas freguesias em análise.

Freguesia	Área Total (m ²)	Área disponível Eólica + Solar(m ²)	Área disponível Eólica (não comum) (m ²)	Área disponível Solar (não comum) (m ²)	Potencial Renovável Integrado (MW)
Estoril	8891376	78768	1529088	297344	41.247
S. Domingos Rana	20442544	36288	496416	788320	96.408

Caso de estudo B – Cidade de Torres Vedras

Potencial eólico

No caso da cidade de Torres Vedras, na quase totalidade da área estudada a velocidade do vento é reduzida. Assim, foram aplicadas as condições mínimas de velocidade média do vento e fluxo de potência incidente descritas nas equações 5.2 a 5.8 na totalidade da região mapeada. As figuras 5.14 apresentam os mapeamentos obtidos após aplicação da correcção dos valores de velocidade do vento e do fluxo de potência incidente.

Analisando a figura 5.14a pode concluir-se que nesta área não existem zonas com velocidade média acima do limite mínimo imposto na metodologia desenvolvida, i.e., 5 m/s. No que respeita ao fluxo de potência incidente (figura 5.14b), existem pequenas zonas de edificado com valores dentro dos limites mínimos, no entanto, dado que o mesmo não acontece para a velocidade do vento, e as condições são aplicadas de forma conjunta, conclui-se que a região não possui indicadores adequados à instalação de sistemas eólicos urbanos.

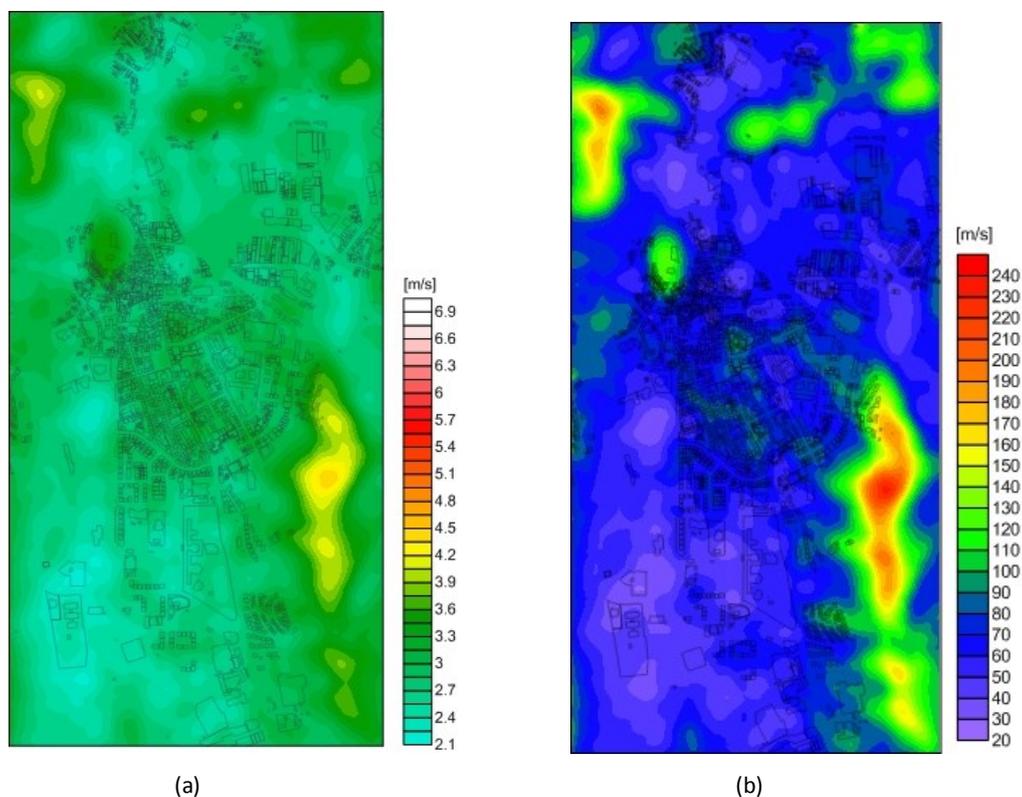


Figura 5.14 – Distribuição espacial da (a) velocidade média do vento e (b) do fluxo de potência incidente após aplicação dos factores de calibração.

Potencial Solar

Para o cálculo do potencial solar recorreu-se de novo ao mapeamento do centro histórico da cidade de Torres Vedras devido ao facto de esta zona se encontrar com maior detalhe no que respeita à geometria dos edifícios e respectivas cotas de telhado. Assim, à semelhança do caso de Cascais, ao mapa de radiação solar global anual foi retirada a zona envolvente aos edifícios de forma a representar apenas a radiação por edifício. A figura 5.15 representa o mapeamento resultante.

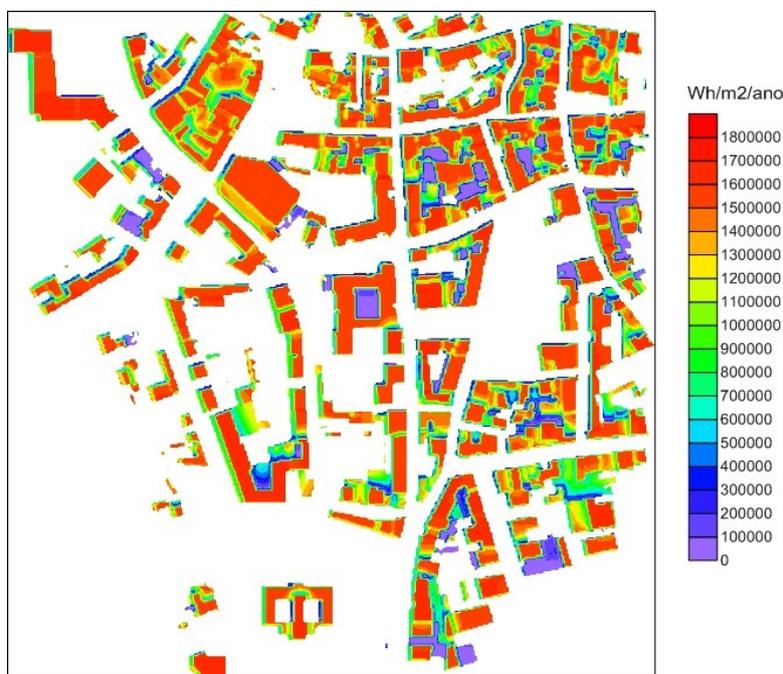


Figura 5.15 – Distribuição espacial da radiação global anual nas coberturas dos edifícios do centro histórico da cidade de Torres Vedras.

Foram ainda excluídos todos os edifícios com área de cobertura inferior a 29 m² (figura 5.16).

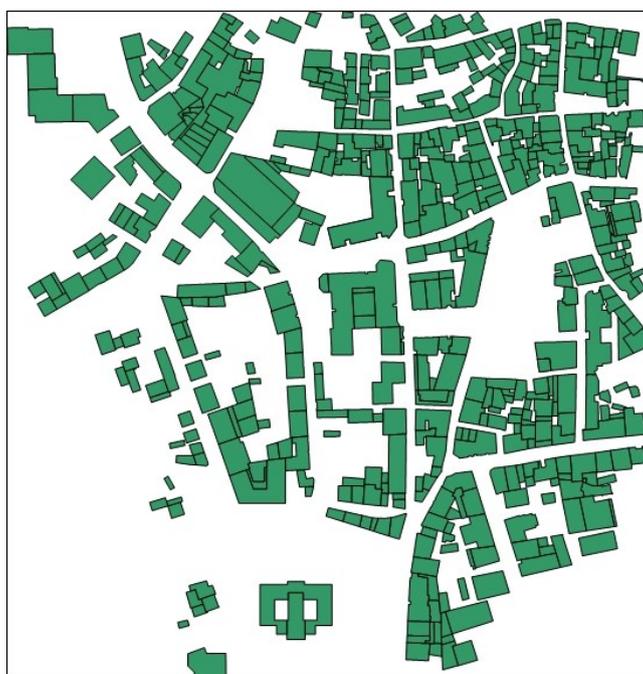


Figura 5.16 – Edifícios com área de cobertura superior a 29 m².

Procedeu-se então à aplicação da metodologia de selecção de locais com potencial solar interessante de acordo com o exposto no capítulo 5.1. O resultado obtido encontra-se representado na figura 5.17.

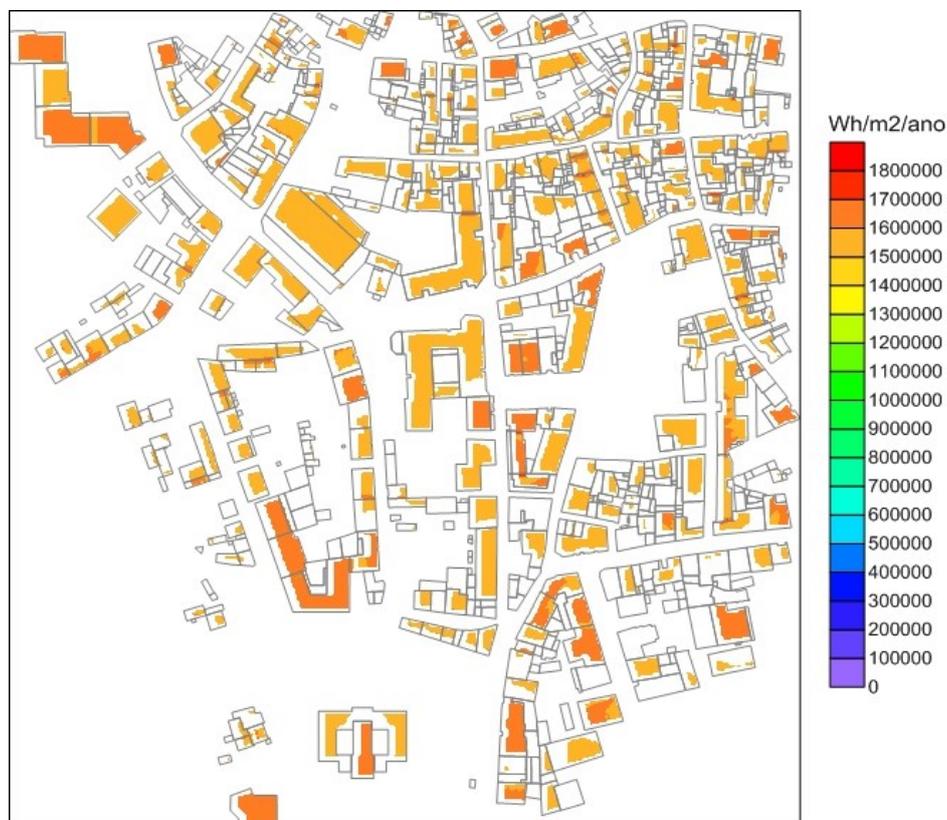


Figura 5.17 – Distribuição espacial da radiação global anual nos topos dos edifícios do centro histórico da cidade de Torres Vedras.

A tabela 5.5 apresenta o potencial disponível obtido na zona do centro histórico da cidade de Torres Vedras de acordo com a metodologia definida no capítulo 5.1.

Tabela 5.5 - Potencial solar fotovoltaico disponível nas áreas em análise de acordo com a metodologia definida no capítulo 5.1.2.

Região	Área Total (m ²)	Área disponível (m ²)	Potencial solar fotovoltaico (MW)
Centro Histórico Torres Vedras	59144	21469	2.900

Neste caso foi possível representar graficamente a distribuição da capacidade solar fotovoltaica passível de ser instalada nesta zona da cidade de Torres Vedras (figura 5.18).

Discussão das metodologias e dos resultados obtidos

A quantificação do potencial eólico e solar foi efectuada para duas freguesias do concelho de Cascais, Estoril e São Domingos de Rana, e para o centro histórico da cidade de Torres Vedras, tendo como base as metodologias descritas em 5.1.

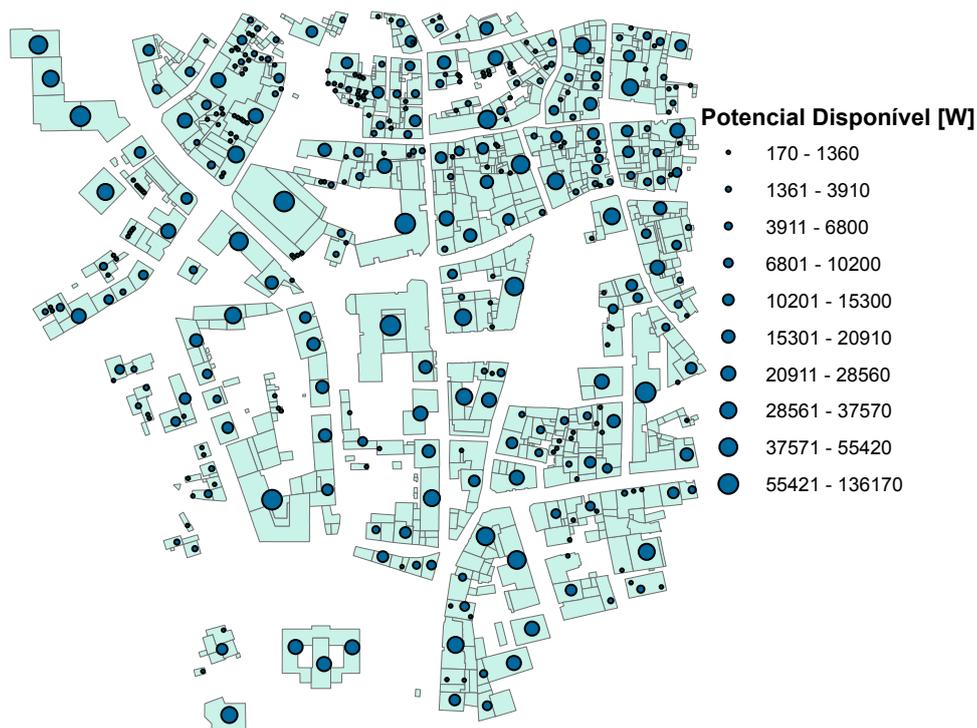


Figura 5.18 – Distribuição espacial do potencial solar fotovoltaico disponível no centro histórico da cidade de Torres Vedras.

No caso do concelho de Cascais, os resultados obtidos apresentam diferenças significativas entre o potencial eólico e o potencial solar disponíveis nas duas freguesias estudadas. Enquanto na freguesia de Estoril o potencial eólico disponível é superior ao potencial fotovoltaico, o oposto acontece na freguesia de São Domingos de Rana. Estas diferenças têm naturalmente a ver com o recurso energético renovável disponível em cada uma destas zonas urbanas e também com a área total de cada freguesia. A área total da freguesia de São Domingos de Rana é, aproximadamente, duas vezes a área da freguesia de Estoril, o que se reflecte num potencial solar fotovoltaico superior, uma vez que este depende fortemente da área disponível para a instalação de sistemas solares fotovoltaicos e ambas as freguesias se caracterizam pelo mesmo tipo e densidade do edificado. Já no que respeita ao potencial eólico disponível, a freguesia de Estoril apresenta maior área de interesse do que a freguesia de São Domingos de Rana, atribuindo-se esta diferença, essencialmente ao facto de a primeira estar mais exposta ao escoamento vindo do mar do que a segunda. Da mesma forma, a orografia tem aqui um papel importante uma vez que por análise das figuras 4.3, 4.4 e 5.8, pode ainda verificar-se que os locais de maior interesse do ponto de vista energético, após aplicação da metodologia de selecção de áreas de interesse, se situam, como esperado, nas zonas de maior altitude e nas zonas perto da costa.

No caso do potencial solar fotovoltaico, há a salientar o facto de se ter considerado os edifícios com coberturas planas e não ter contabilizado a inclinação dos telhados ou efectuado uma distinção ao nível do tipo de utilização do edifício, como em [Schallenberg-Rodríguez, 2013].

Este facto deve-se à indisponibilidade da informação necessária à identificação do nº de águas e respectiva inclinação. Em termos energéticos, a não contabilização das inclinações óptimas no estudo do potencial solar fotovoltaico, pode ser compensada pelo facto de os telhados com inclinação introduzirem áreas de sombreamento nas direcções opostas à exposição solar.

Já no que respeita à contabilização do potencial solar fotovoltaico nas fachadas dos edifícios, o mesmo não foi aqui estudado. No caso de estudo da cidade de Torres Vedras, a área analisada refere-se ao centro histórico da cidade, onde as ruas são muito estreitas havendo por isso um efeito marcante do sombreamento produzido pelos edifícios uns nos outros. Da mesma forma, trata-se de uma zona antiga da cidade onde o edificado é caracterizado por edifícios muito compactos cujas fachadas são maioritariamente ocupadas pelas janelas e portas, sobrando muito pouco espaço disponível para a instalação de sistemas solares fotovoltaicos (ainda que se considere pouco previsível o a hipótese de instalação deste tipo de sistemas em fachadas de edifícios históricos/antigos). No caso do concelho de Cascais, pese embora a tipologia do edificado seja diferente, ela é também muito variada e caracterizada por áreas de edifícios antigos e com características semelhantes às da cidade de Torres Vedras, e outras áreas de construção recente onde a área livre nas fachadas é superior. No entanto, e dado que se pretende uma metodologia de fácil generalização, a introdução das fachadas iria implicar uma complexidade acrescida que impediria a sua generalização. Da mesma forma, a instalação de painéis fotovoltaicos nas fachadas de edifícios pré-existentes exige obras de construção civil mais complexas e onerosas do que as previstas no topo dos edifícios, pelo que será mais previsível o aproveitamento das fachadas somente em edifícios novos e construídos de raiz com previsão da instalação destes sistemas na sua fase de concepção. Assim, e face ao exposto, optou-se por excluir desta análise a caracterização do potencial disponível tendo em conta as fachadas dos edifícios.

No que respeita ao caso da quantificação do potencial integrado, os resultados obtidos correspondem ao esperado, uma vez que o sombreamento introduzido pelas turbinas eólicas nos painéis PV é reduzido. Se se analisar os resultados apresentados nas tabelas 5.2, 5.3 e 5.4, pode concluir-se que a soma do potencial disponível individualizado por tecnologia, é superior, em cerca de 27% no caso da freguesia do Estoril e em cerca de 7% no caso da freguesia de São Domingos de Rana. Estes desvios são justificados pelo facto de a primeira freguesia se caracterizar por uma maior área comum adequada à instalação de turbinas eólicas provocando assim uma maior área de sombreamento nos painéis PV, o que não acontece na freguesia de São Domingos de Rana.

Esta fase do trabalho contou, no entanto com algumas limitações. A geração da malha urbana para a aplicação das metodologias aqui apresentadas e em especial para a quantificação do potencial integrado, obrigou a que se utilizasse a mesma discretização do modelo digital de terreno urbano para ambos os casos. Esta opção conduziu a resultados mais conservativos para o caso do potencial solar fotovoltaico face ao caso eólico, principalmente por se terem considerado apenas as coberturas dos edifícios no primeiro caso. Apesar da fase de selecção ter sido efectuada sobre o modelo digital de terreno “urbano” para a área total (terreno e edifícios), a quantificação do potencial solar PV foi efectuada tendo como base a camada de informação poligonal representativa do edificado, o que conduziu à exclusão de algumas células situadas nos bordos dos edifícios com geometrias mais irregulares. Em desenvolvimentos futuros deste trabalho, pretende-se estudar diversos cenários referentes à geração do modelo digital de terreno “urbano”, com vista ao melhoramento desta metodologia.

O potencial renovável disponível foi identificado por intermédio da aplicação de ferramentas SIG desenvolvidas especificamente para este efeito com recurso à *Model Builder* da plataforma SIG seleccionada para este trabalho (ArcGis [ESRI, 2010]). Numa primeira fase desenvolveram-se duas ferramentas, uma para identificação do potencial eólico disponível e outra para o potencial solar fotovoltaico disponível. Houve o cuidado de as programar de forma a possibilitar a variação dos dados de entrada (mapeamentos dos parâmetros eólicos e solares) e os parâmetros de selecção (velocidade média, fluxo de potência, irradiação média anual, etc) construindo assim uma ferramenta passível de generalização a outras regiões geográficas

urbanas. Numa segunda fase, outra ferramenta interactiva foi desenvolvida, por forma a possibilitar a identificação de áreas de interesse para a instalação conjunta das duas tecnologias em análise. Desse modo, considera-se que o conjunto de ferramentas desenvolvidas, pela sua interactividade e facilidade de utilização constituem uma mais valia para o planeamento urbano da utilização de sistemas de energias renováveis.

É no entanto de referir, que apesar da sua eficácia, a interface desenvolvida apresenta limitações no que respeita ao seu manuseamento, nomeadamente na ordem de apresentação da informação que se configura de difícil formatação. Assim, em desenvolvimentos futuros deste trabalho, pretende-se aperfeiçoar esta interface seleccionando uma linguagem de programação mais adequada a este propósito.

A metodologia de identificação do potencial renovável aqui apresentada, contou com a definição de valores limite para a selecção de áreas de interesse. Estes valores limite referem-se neste caso, essencialmente, a variáveis de recurso energético (velocidade média do vento, fluxo de potência incidente, radiação solar global). Outras variáveis poderiam ser utilizadas para este efeito, como por exemplo, a produção energética dos sistemas renováveis. No entanto, e em especial no caso da energia eólica, a tecnologia actual apresenta grandes variações em termos de produção energética para a mesma gama de potência nominal, o que faria com que os critérios de selecção fossem apenas válidos para um dado modelo de turbina eólica. Da mesma forma, a identificação de um valor limite baseado numa perspectiva económica dos projectos a desenvolver, faria depender os critérios de selecção dos custos associados à tecnologia e à venda da energia. Os custos dos equipamentos renováveis têm sofrido nos últimos anos uma forte queda, bem como as tarifas de venda da energia à rede eléctrica, com especial relevo para a tecnologia fotovoltaica e para o caso português onde a actual legislação tem sofrido frequentes alterações e feito variar de ano para ano as tarifas de venda da energia. Desta forma, a introdução destes aspectos no contexto português actual onde há uma tão elevada volatilidade de custos e preços da energia iria comprometer a generalização e a intemporalidade desta metodologia.

No caso particular da identificação do potencial solar fotovoltaico, alguns autores realizaram estudos onde este foi contabilizado tendo em conta a área total ocupada pelos topos dos edifícios e o rendimento de um modelo típico de painel fotovoltaico. Neste caso, e pelos motivos já expostos optou-se por não fazer depender a metodologia da tecnologia, acrescentando-se o facto de se pretender contabilizar o efeito de sombreamento dos edifícios uns nos outros, ainda que de forma aproximada, no resultado final, efeito esse não considerado em muitos dos trabalhos consultados para esta dissertação, [Bravo et al., 2007].

No que respeita à identificação do potencial eólico disponível, optou-se por prever a utilização de todo o espaço da área urbana e não somente as coberturas dos edifícios. Esta opção deveu-se essencialmente à reduzida ocupação de cada turbina eólica e também ao facto de o mapeamento do potencial eólico já prever a exclusão de parte das ruas da zona urbana por ausência natural de vento com velocidade adequada. É, no entanto, de notar que esta abordagem não exclui zonas com vento adequado e que poderão não estar acessíveis à instalação de sistemas eólicos (e.g. avenidas ou vias rodoviárias de largura considerável). Este tipo de detalhe e conseqüente processamento, muito embora pertinente, exige o recurso a informação referente à localização e mapeamento deste tipo de ocorrências, cujo grau de detalhe o coloca fora do âmbito do presente trabalho. Assim, embora não tenha sido identificado o potencial eólico correspondente às ruas e vias rodoviárias, excluindo as zonas não utilizáveis, a inclusão destes filtros iria aumentar a precisão do método, mas à custa de uma complexificação da metodologia que se pretende simples e expedita.

Ainda no que respeita à metodologia para identificação do potencial eólico, foi considerada uma altura constante acima (cota média) do topo dos edifícios, sendo a selecção de áreas de

interesse para os aproveitamentos eólicos limitada, como já referido, pelos valores de velocidade do vento e fluxo de potência incidente. Neste caso, a situação de edifícios isolados com alturas elevadas é salvaguardada pela presença de valores de potencial eólico adequado à instalação de turbinas eólicas. Pese embora não tenha sido efectuado um estudo detalhado da turbulência na envolvente de cada edifício – pela limitação da metodologia desenvolvida que se pretendia passível de generalização a várias zonas geográficas urbanas – os resultados obtidos descartam, com eficácia (e como pretendido), as zonas de menor potencial eólico. Acresce ainda que um estudo detalhado da turbulência pode ser efectuado, pontualmente, nos casos em que se considere ser este parâmetro interessante para os objectivos a atingir. Alerta-se no entanto, que a caracterização da turbulência necessita de dados medidos para as três componentes da velocidade do vento obtidos com taxas de amostragem elevadas, os quais, habitualmente, só podem ser obtidos por intermédio da realização de campanhas de medição com equipamentos específicos, naturalmente onerosos.

6. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Nas últimas décadas, os governos dos estados membros da união Europeia têm unido esforços para tomar acções conjuntas com vista à redução das emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera. Prova disso são o conjunto de regulamentos e directivas que têm sido publicadas nas duas últimas décadas, e que comprometem os estados membros a cumprir metas para este fim. Entre as acções previstas encontra-se, naturalmente, a redução da dependência dos combustíveis fósseis e o aumento da produção de electricidade a partir de fontes renováveis.

Da mesma forma, a crescente preocupação na gestão dos recursos energéticos sustentáveis ao nível das cidades motivou profundo interesse por modelos de *Cidades Inteligentes*. Pese embora sejam reconhecidas potencialidades nas cidades em termos de geração de energia e armazenamento de calor, é ainda necessário implementar metodologias concretas e estruturadas para o seu desenvolvimento sustentável e para a sua integração num conceito de *Cidade Inteligente*.

Neste trabalho desenvolveram-se metodologias para a caracterização e quantificação do potencial renovável urbano como contribuição para o desenvolvimento energético sustentável das cidades num contexto de *Cidades Inteligentes*. As metodologias apresentadas permitem identificar e mapear o potencial renovável urbano para a produção de electricidade tendo-se considerado como fontes renováveis viáveis à escala da cidade, a energia eólica (microturbinas) e a energia solar fotovoltaica.

Do ponto de vista da energia eólica, é facto conhecido que a caracterização do vento e seu potencial energético em meio urbano constitui um dos maiores entraves ao desenvolvimento destes sistemas de microgeração, fazendo com que a maioria dos potenciais investidores optem por outras formas de energia renovável, como é exemplo a energia solar fotovoltaica. As metodologias existentes recorrem, na sua maioria, à utilização de modelos CFD convencionais (não adaptados a aplicações eólicas) que são concebidos para aplicação a áreas de dimensão reduzida (da ordem das dezenas de metros – conjunto de habitações), e que exigem, habitualmente, um elevado esforço computacional para modelar áreas extensas.

A metodologia desenvolvida para a caracterização do potencial eólico teve como base a geração de uma superfície de cotas transformando a malha urbana e o terreno circundante numa superfície de orografia muito complexa (Modelo digital de terreno “urbano” – MDT-U). Após esta transformação da malha urbana em *orografia*, a metodologia recorre à utilização de dados de vento obtidos experimentalmente ou por meio de Atlas de Potencial Eólico. No presente caso, os dados tiveram por base o Atlas do Potencial Eólico de Portugal continental desenvolvido pelo LNEG.

O modelo digital de terreno “urbano” – MDT-U foi modelado com base num modelo numérico CFD especialmente desenvolvido para aplicações de energia eólica em orografias muito complexas. Os resultados foram posteriormente corrigidos com base na modelação de pequenas zonas urbanas, também com um modelo numérico CFD desenvolvido para aplicações eólicas urbanas, cujos resultados permitiram identificar um factor de correcção médio para obtenção dos mapeamentos finais do potencial eólico. Esta metodologia foi aplicada a dois casos de estudo em duas áreas urbanas com características distintas e validado com dados experimentais de medição do vento.

De uma forma geral, os resultados obtidos após a aplicação da metodologia aos dois casos de estudo são concordantes com os dados experimentais, tendo-se obtido um desvio médio da ordem de 3% para os mapeamentos da velocidade do vento e da ordem de 15% para o fluxo de potência incidente. Os desvios encontrados para o fluxo de potência incidente, devem-se ao facto de este parâmetro ter sido obtido com base nos parâmetros da distribuição de

Weibull obtidos pelos modelos. Estas diferenças podem observar-se quando se efectua a comparação entre os dados de entrada e os dados medidos. Ainda assim, considera-se que a introdução do MDT-U constitui uma opção viável, de fácil aplicação, que concorda de forma razoável com os dados experimentais e que cumpre os objectivos propostos, i.e. de simples aplicação e adequada ao planeamento de aproveitamentos renováveis em ambiente urbano.

No que se refere ao potencial solar, foi utilizada a ferramenta incluída num sistema de informação geográfica, a qual tem por base o MDT-U obtido para os casos de estudo. Os resultados foram comparados com dados experimentais de medição da radiação solar global e com dados obtidos na base de dados de informação geográfica PVGIS, tendo-se verificado, tal como no caso do potencial eólico, um desvio médio reduzido, igualmente na ordem de 3%.

A identificação do potencial renovável urbano foi efectuada com base nos mapeamentos dos recursos energéticos obtidos com o MDT-U. Para tal, foram desenvolvidas ferramentas interactivas que permitem ao utilizador alterar os dados de entrada (mapeamentos do recurso energético eólico e solar) e fazer variar os parâmetros de selecção. É ainda possível introduzir outras restrições à instalação de sistemas de produção de electricidade por fontes renováveis, desde que as mesmas possam ser adaptadas aos formatos aceites pela plataforma de informação geográfica seleccionada. Estas ferramentas permitiram, numa primeira fase, a identificação unicamente do potencial eólico disponível e, separadamente, do potencial solar fotovoltaico disponível numa área urbana. Numa segunda fase identificou-se o potencial renovável integrado (potencial conjunto eólico + solar fotovoltaico) assumindo-se a partilha de espaços para a instalação de sistemas eólico e solares fotovoltaicos. A metodologia desenvolvida - pese embora no presente caso as áreas de maior dimensão correspondam à escala de uma freguesia - pode ser aplicada a zonas de maior e relevante dimensão, i.e. concelhos ou distritos.

As metodologias são de simples e fácil aplicação, como pretendido, o que permite a sua utilização por técnicos menos experientes e a caracterização de áreas de dimensões razoavelmente elevadas o que não se verifica nas ferramentas CFD disponíveis à data. Assim, considera-se que as metodologias desenvolvidas no âmbito deste trabalho constituem uma mais-valia para o planeamento energético das cidades num contexto de *Cidades Inteligentes* através da integração de sistemas eólicos e solares fotovoltaicos nestes ambientes.

Trabalho futuro

O facto de se considerar que o trabalho aqui apresentado constitui uma contribuição para o planeamento da integração de energias renováveis em ambiente urbano num contexto de *Cidades Inteligentes*, permite olhá-lo como um ponto de partida para a integração de outras ferramentas conducentes ao fim em vista.

Desta forma, podem ser introduzidas condições/restrições adicionais ao desenvolvimento das tecnologias renováveis (eólica e solar PV) em meio urbano que venham a ser identificadas no futuro, como são exemplo, o consumo energético global das cidades, a divisão em tipologias de edifícios e suas utilizações, limitações ao impacto da microgeração na qualidade de energia, congestionamentos da rede eléctrica local, ou outros.

Da mesma forma, muito embora a metodologia apresentada permita, no limite, a extensão à escala distrital, a caracterização do edificado pode trazer algumas dificuldades quando não existem plantas urbanas e cartografia adequadas a este fim.

Nesse sentido, uma área que justifica investigação adicional passa pela identificação de métodos para a caracterização do potencial renovável urbano à escala nacional, onde se poderão ter de recorrer a metodologias de identificação do edificado com base em fotografias aéreas, imagens de satélite ou outras. Da mesma forma, a utilização de um maior número de

dados experimentais para validação das metodologias desenvolvidas será decerto uma mais-valia para o desenvolvimento futuro desta metodologia.

Neste trabalho foram apresentados dois métodos de geração do modelo digital de terreno “urbano”. No entanto, situações há que podem ser resolvidas com recurso ao método mais simples de obtenção do MDT-U quando a informação sobre a altura e geometria dos edifícios não está disponível. Assim, pretende-se no futuro desenvolver metodologias de identificação das situações em que o detalhe dos edifícios é importante e das situações em que o recurso a metodologias simples de geração do MDT-U pode ser complementado nalgumas zonas de interesse com maior detalhe da malha urbana.

Este trabalho constitui uma contribuição para o mapeamento do potencial renovável urbano com vista ao planeamento da introdução de sistemas de produção de electricidade renovável numa perspectiva do planeamento e da gestão dos recursos energéticos urbanos e de *Cidades Inteligentes*, pelo que, no futuro próximo, muito mais haverá a fazer para concretizar todo o potencial da ferramenta ora iniciada.

Referências

- Abohela, I., Hamza, N. e Dudek, S., 2013. Effect of roof shape, wind direction, building height and urban configuration on the energy yield and positioning of roof mounted wind turbines. *Renewable Energy*, [Pdf]. 50, Elsevier pp.1106-18. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112005381> [Accessed 07 March 2014].
- Abramowitz, M. e Stegun, I., 1964. *Handbook of Mathematical Functions: with Formulas, Graphs and Mathematical tables*. 10th ed. p.470 [Pdf] New York, USA: Dover Publications (Dover Books on Mathematics). Available at: http://www.convertit.com/global/reference/AMS55/AMS55_Sample.pdf [accessed 04 December 2014].
- Acosta, J.L. e Djokic, S.Z., 2010. Assessment of Renewable Wind Resources in UK Urban Areas. In *MELECON 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference.*, 2010. IEEE. pp.1439 - 1444.
- Agudelo-Vera, C., Leduc, W.R.W.A., Mels, A.R. e Rijnaarts, H.H.M., 2012. Harvesting urban resources towards more resilient cities. *Resources, conservation and recycling*, [Pdf]. 64, Elsevier pp.3-12. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344912000250> [Accessed 07 March 2014].
- Aguiar, R., Coelho, R.E. e Carvalho, M.J., 2010. *SolTerm 5 - Manual de instalação e utilização do software SolTerm*. Lisboa: LNEG Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. p.73.
- Ahmed, S. e Bharat, A., 2012. Wind field modifications in habitable urban areas. *Current World Environment*, [Pdf]. 7(2), CWE pp.263-73. [Accessed 03 December 2014].
- Alcoforado, M.J. e Andrade, H., 2008. Global Warming and the Urban Heat Island. In J. Marzluff et al., eds. *Urban ecology - an international perspective on the interaction between humans and nature*. New York, USA: Springer. pp.249-62.
- Amador, J. e Domínguez, J., 2005. Application of geographical information systems to rural electrification with renewable energy sources. *Renewable Energy*, [Pdf]. 30(12), Elsevier pp.1897-912. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810500011X> [Accessed 05 January 2015].
- AutoDesk, 2009. *AutoCad 2001 G.55.0.0*. [Online] Available at: <https://www.Autodesk.com/>.
- Bahaj, A.S., Myers, L. e James, P.A.B., 2007. Urban energy generation: Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings. *Energy and Buildings*, 39(2), Elsevier pp.154-65. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778806001605> [Accessed 07 March 2014].
- Baik, J. e Fernando, H.J.S., 2003. A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *Journal of Applied Meteorology*, [Pdf].09 January, 42, American Meteorology Society pp.1636-48. Available at: [http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450\(2003\)042%3C1636%3AACMFSU%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450(2003)042%3C1636%3AACMFSU%3E2.0.CO%3B2) [Accessed 20 December 2014].
- Baik, J. e Kim, J., 2009. Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to mesoscale model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, [Pdf]. 48, American

- meteorological society pp.1667-81. Available at:
<http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2009JAMC2066.1> [Accessed 07 March 2014].
- Baker, T., 1992. Mesh Generation for the Computation of Flowfields Over Complex Aerodynamic Shapes. *Computers Mathematical Application*, [Pdf]. 24(5-6), Elsevier pp.103-27. Available at:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0898122192900441> [Accessed 05 January 2015].
- Barkley, D. e Henderson, R.D., 1996. Three-dimensional floquet stability analysis of the wake of a cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, [Pdf]. September, 332, Cambridge University Press pp.215-41. [Accessed 03 December 2014].
- Batagan, L., 2011. Smart cities and sustainability models. *Informatica Economica*, [Pdf]. 15(3), Academy of Economic Studies pp.80-87. Available at:
<http://revistaie.ase.ro/content/59/07%20-%20Batagan.pdf> [Accessed 30 January 2014].
- Batagan, L., 2012. The use of intelligent solutions in romanian cities. *Informatica Economica*, [Pdf]. 16(4), Academy of Economic Studies pp.37-43. Available at:
<http://www.revistaie.ase.ro/content/64/04%20-%20Batagan.pdf> [Accessed 07 March 2014].
- Batty, M. et al., 2012. Smart cities of the future. *The European Physical Journal - Special Topics*, [Pdf]. 05 December, 214(1), Springer pp.481-518. [Accessed 27 January 2014].
- Belcher, S.E., Jerram, N. e Hunt, J.C.R., 2003. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. *Journal of Fluid Mechanics*, [Pdf]. 02 July, 488, Cambridge University Press pp.369-98. [Accessed 03 December 2014].
- Beller, C., 2011. Development of a simulation tool to predict urban wind potential. In Howlett, R.J., Jain, L.C. e Lee, S.H., eds. (*SEB'10*), *Results of the Second International Conference on Sustainability in Energy and Buildings*. Berlin, Heidelberg, 2011. Springer. pp.111-20.
- Bellosio, B., Giaccone, L., Guerrisi, A. e Lazzeroni, P., 2011. Energy networks in sustainable cities: towards a full integration of renewable systems in urban area. In *IECON 2011 - 37th annual conference on IEEE industrial electronics society*. Melbourne, 2011. IEEE. pp.3146-51.
- Bentham, T. e Britter, R., 2003. Spatially averaged flow within obstacle arrays. *Atmospheric Environment*, [Pdf]. May, 37(15), Elsevier pp.2037-43. doi:10.1016/S1352-2310(03)00123-7. Available at:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231003001237> [Accessed 07 March 2014].
- Bowen, A.J. e Mortensen, N.G., 1996. Exploring the limits of WASP, the Wind Atlas Analysis and Application Program. In *EUWEC2006 - European Union Wind Energy Conference 2006*. Gotenborg, Sweden, 1996. EUWEC. pp.584-87.
- Bravo, J.D., Casals, X.G. e Pascua, I.P., 2007. GIS approach to the definition of the capacity and generation ceilings of renewable energy technologies. *Energy Policy*, [Pdf]. October, 35(10), Elsevier pp.4879-92. [Accessed 04 December 2014].
- Brito, M.C., Gomes, N., Santos, T. e Tenedório, J.A., 2012. Photovoltaic potential in a Lisbon suburb using LIDAR data. *Solar Energy*, [Pdf]. 86(1), Elsevier pp.283-88. [Accessed 05 January 2015].

- Britter, R.E. e Hanna, S.R., 2003. Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review Fluid Mechanics*, [Pdf]. 35, Annual Reviews pp.469–96. [Accessed 03 December 2014].
- Bullrich, K., 1982. Radiation and the radiation budget of the atmosphere. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier scientific publishing company. Ch. 2. pp.33-121.
- Bulut, H., 2003. Generation of typical solar radiation data for Istanbul, Turkey. *International Journal of Energy Research*, [Pdf].06 May, 27(9), John Wiley and Sons, Ltd pp.847-55. [Accessed 04 December 2014].
- Burian, S.J., Brown, M.J. e Linger, S.P., 2002. *Morphological analysis using 3D building databases: Los Angeles California*. Los Alamos: LANL Los Alamos National Laboratory. p.73.
- Caragliu, A., Del Bo, C. e Nijkamp, P., 2011. Smart Cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, [Pdf].1 April, 18(2), Taylor & Francis pp.65-82. [Accessed 05 January 2015].
- Carpentieri, M., Salizzoni, P., Robins, A. e Soulhac, L., 2012. Evaluation of a neighbourhood scale, street network dispersion model through comparison with wind tunnel data. *Environmental Modelling and Software*, [Pdf]. November, 37, Elsevier pp.110-24. [Accessed 03 December 2014].
- CHAM Ltd, 2013. *PHOENICS*. [Online] Available at: <http://www.cham.co.uk/>.
- Chang, C.-H. e Meroney, R.N., 2003. Concentrations and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, [Pdf].10 June, 91(9), Elsevier pp.1141-54. Available at: <http://www.engr.colostate.edu/~meroney/PapersPDF/CEP03-04-4.pdf> [Accessed 07 March 2014].
- Charabi, Y. e Gastil, A., 2011. PV suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, [Pdf]. September, 36(9), Elsevier pp.2554-61. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111000760> [Accessed 20 December 2014].
- Chourabi, H. et al., 2012. Understanding Smart Cities: An Integrative Framework. In *45th Hawaii International Conference on System Sciences, 2012*. Maui, 2012. IEEE. pp.2289-97.
- Claus, J. Coceal, O.; Thomas, T.G.; Branford, S.; Belcher, S.E.; Castro, I. P., 2012. Wind-direction effects on urban-type flows. *Boundary-Layer Meteorology*, [Pdf]. 142(2), Springer Science pp.265-87. [Accessed 03 December 2014].
- Coceal, O. e Belcher, S.E., 2004. A canopy model of mean winds through urban areas. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [Pdf]. 130(159), Royal Meteorological Society pp.1349-72. [Accessed 03 December 2014].
- Coceal, O., Thomas, T.G., Castro, I.P. e Belcher, S.E., 2006. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Boundary-Layer Meteorology*, [Pdf].03 June, 121(3), Springer Science pp.491-519. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10546-006-9076-2> [Accessed 07 March 2014].
- Costa, P., Estanqueiro, A. e Miranda, P., 2006a. Building a Wind Atlas for Mainland Portugal Using a Weather Type Classification. In *EWEC2006 - European Wind Energy Conference 2006*. Athens, 2006a. EWEA. pp.1-9.

- Costa, P., Miranda, P. e Estanqueiro, A., 2006b. Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas. In *EWECE 2006 - European Wind Energy Conference 2006*. Athens, 2006b. EWEA. pp.1-9.
- Cressie, N.A.C., 1990. The Origins of Kriging. *Mathematical Geosciences*, [Pdf] April. pp.239-52. [Accessed 04 December 2014].
- Dagdougui, H., Ouammi, A. e Sacile, R., 2011. A regional decision support system for onsite renewable hydrogen production from solar and wind energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, [Pdf]. November, 36(22), Elsevier pp.14324-34. [Accessed 04 December 2014].
- Date, A.W., 2005. *Introduction to computational fluid dynamics*. p.398 [e-book] New York, USA: Cambridge University Press. Available at: <http://users.abo.fi/rzevenho/iCFDbookDate.pdf> [accessed 21 Augustus 2014].
- Davenport, A.G., 1982. The interaction of wind and structures. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology*. 1st ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. Ch. 12. p.740.
- DGEG, 2013. *Microprodução. Despacho DGEG de 26 de Dezembro de 2013*. [Online] Lisboa, Portugal: DGEG Available at: <http://www.renovaveisnadora.pt/web/srm/legislacao>.
- DGEG, 2014. *Renováveis na Hora*. [Online] Available at: www.renovaveisnadora.pt [Accessed 11 January 2015].
- Díaz, F. et al., 2012. An adaptive solar radiation numerical model. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, [Pdf]. 236(18), Elsevier pp.4611–22. [Accessed 03 December 2014].
- Dubayah, R. e Rich, P.M., 1995. Topographic solar radiation models for GIS. *International journal of geographical information systems*, [Pdf]. 9(4), Taylor & Francis pp.405-19. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02693799508902046> [Accessed 06 May 2015].
- EC, 2009. *National Renewable Energy Action Plan - Portugal*. [Online] Available at: http://ec.europa.eu/energy/renewables/action_plan_en.htm [Accessed 12 October 2014].
- EC, 2010. *Plano Nacional de Acção para as Energias Renováveis ao abrigo da Directiva 2009/28/CE*. Lisboa: EC. pp.1-144.
- EC, 2011. Energy Roadmap 2050. Impact assessment and scenario analysis. *Official journal of the European Commission*, [pdf] pp.1-189. Available at: http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/doc/roadmap2050_ia_20120430_en.pdf [Accessed 10 December 2014].
- EC, 2012. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC. *Official Journal of the European Union*, [Online] 14 November. pp.L315/1 - L315/56. Available at: http://ec.europa.eu/energy/efficiency/eed/eed_en.htm [Accessed 20 October 2014].
- EC, 2013. *Solar radiation (Europe) in PVGIS*. [Online] Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/solres/solrespvgis.htm>.
- Eliasson, I., Offerle, B., Grimmond, C.S.B. e Lindqvist, S., 2006. Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, [Pdf]. January, 40(1), Elsevier pp.1-16. [Accessed 03 December 2014].

- EnergyTrend, 2013. © 2013 EnergyTrend, a Business Division of TrendForce Corp. All rights reserved. [Online] Available at: <http://pv.energytrend.com/pricequotes.html> [Accessed 7 January 2013].
- Environment Canada, 2003. *Canadian Wind Atlas*. [Online] Available at: <http://www.windatlas.ca/en/index.php> [Accessed 26 January 2014].
- ESI, 2011. *OpenFOAM® 2.2.0*. [Online] (2.2.0) Available at: <http://www.openfoam.com/>.
- ESRI, 2010. *ESRI (R) ArcMap 10.0*. [Online] Available at: <http://www.esri.com/software/arcgis>.
- ESRI, 2010. *ESRI (R) Model Builder*. [Online] Available at: <http://www.esri.com/software/arcgis>.
- ESRI, 2012. *ESRI (R) ArcGIS 10.0*. [Online] Available at: <http://www.esri.com/software/arcgis>.
- EU, 2010. *The European Strategic Energy Technology Plan - SET-Plan. Towards a low-carbon future*. Brussels, Belgium: EU European Commission. p.16.
- European Commission, 2012. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. [Online] Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/> [Accessed 27 December 2012].
- Ferry, M., 2002. New features of the MIGAL solver. In *9th Phoenix User Conference*. Moscow, 2002. PUC. pp.1-24.
- Fu, P. e Rich, P.M., 2000. *The Solar Analyst 1.0 Manual*. USA: Helios Environmental Modeling Institute - HEMI.
- Fu, P. e Rich, P.M., 2002. A geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, [Pdf]. 37, Elsevier pp.25-35. Available at: http://gislab.lanl.gov/docs/fu_rich_compag_02.pdf [Accessed 06 January 2015].
- Gaiddon, B., Kaan, H. e Munro, D., 2009. *Photovoltaics in the urban environment*. 1st ed. p.185 Stirling VA, London, United Kingdom: Earthscan.
- Gasset, N., Landry, M. e Gagnon, Y., 2012. A comparison of wind flow models for wind resource assessment in wind energy applications. *Energies*, [Pdf]. 5(11), Energies pp.4288-322. Available at: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/11/4288> [Accessed 04 December 2014].
- GeoModelSolar, 2010-2013. *SolarGis*. [Online] Available at: <http://solargis.info/doc/63> [Accessed 18 Março 2013].
- Giffinger, R., 2007. *Smart Cities - Ranking of european medium-sized cities*. Viena: Centre of Regional Science (SRF) Smart Technologies Cluster. pp.1-28.
- Goldstein, S., 1938. *Modern developments in fluid dynamics, Vol. 2, p.331*. N.Y. : Oxford University Press.
- Gomes, A., Soares, A. e Antunes, C.H., 2011. Impacts on demand side management and micro-generation units on low voltage distribution networks. In *EPQU 2011 - 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. Lisbon, 2011. IEEE. pp.1-7.
- GRASS DT, 1998-2013. *GRASS GIS - The world's leading free gis software*. [Online] Available at: <http://grass.osgeo.org/> [Accessed 18 March 2013].
- Grassi, S., Chokani, N. e Abhari, R.S., 2012. Large scale technical and economical assessment of wind energy potential with a GIS tool: case study Iowa. *Energy Policy*, [Pdf]. 45, Elsevier pp.73-85. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421512000870> [Accessed 12 December 2014].

- Grell, G.A., Dudhia, J. e Stauffer, D.R., 1995. *A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. Technical Note. Boulder: NCAR. pp.1-128.
- Grimmond, C.S.B. e Oke, T., 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of applied meteorology*, [Pdf]. 38(9), American Meteorological Society pp.1262-92. Available at: [http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0450\(1999\)038%3C1262%3AAPOUAD%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/1520-0450(1999)038%3C1262%3AAPOUAD%3E2.0.CO%3B2) [Accessed 03 December 2014].
- Gryning, S. e Batchvarova, E., 2009. Measuring meteorology in urban areas - Some progress and many problems. In Baklanov, A., Grimmond, C.S.B., Alexander, M. e Athanassiadou, M. *Meteorological and Air Quality Models*. 1st ed. London, UK: Springer. Ch. 12. pp.125-32.
- Heath, M.A., Walshe, J.D. e Watsom, S.J., 2007. Estimating the potential yield of small building-mounted wind turbines. *Wind Energy*, [Pdf].08 March, 10, John Wiley and Sons pp.271-87. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.222/pdf> [Accessed 07 March 2014].
- Helioclim, 2013. *ESRA*. [Online] Available at: <http://www.helioclim.org/esra/> [Accessed 9 January 2013].
- Hethrick, W.A., Rich, P.M., Barnes, F.J. e Weiss, S.B., 1993. *Gis-based solar radiation flux models*. Technical Paper. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. pp.132-43.
- Hirsch, C., 2007. *Numerical Computation of Internal and External Flows. Volume I. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics*. 2nd ed. p.696 [e-book] Burlington, USA: Elsevier. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750665940> [accessed 14 Augustus 2014].
- Hofierka, J. e Kanuk, J., 2009. Assessment of potential in urban areas using open-source solar radiation tools. *Renewable Energy*, [Pdf].31 March, 34(10), Elsevier pp.2206-14. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109000949> [Accessed 04 December 2014].
- Hofierka, J. e Suri, M., 2002. The solar radiation model for open source GIS: implementation and applications. In *Open source GIS - GRASS users conference 2002*. Trento, Italy, 2002. GRASS. pp.1-19.
- Hollands, R.G., 2008. Will the real smart city please stand up? *City: analysis of urban trends, culture, theory, policy, action.*, [Pdf].26 November, 12(3), Taylor & Francis pp.303-20.
- Holton, J.R., 1972. *An introduction to dynamic meteorology*. 3rd ed. p.511 [Book] San Diego, USA: Elsevier.
- Hunt, J.C.R. e Simpson, J.E., 1982. Atmospheric boundary layers over non-homogeneous terrain. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology. Fundamentals of Meteorology and Their Application to Problems in environmental and Civil Engineering*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company. Ch. 7. pp.269-318.
- Izquierdo, S., Rodrigues, M. e Fueyo, N., 2008. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*, [Pdf].16 April, 82, Elsevier pp.929-39..
- Jensen, N.O. e Bush, N.E., 1982. Atmospheric turbulence. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. Ch. 5. pp.179-231.

- Jiang, Y. Alexander, D.; Jenkins, H.; Arthur, R. e Chen, Q., 2003. Natural ventilation in buildings: Measurement in a wind tunnel and numerical simulation with Large Eddy Simulation. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, [Pdf]. February, 91(3), Elsevier pp.331-53. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016761050200380X> [Accessed 07 March 2014].
- Jones, W.P. e Launder, B.E., 1972. The prediction of laminarization with a two equation model of turbulence. *International journal of heat and mass transfer*, [Pdf]. 17 May, 5, Elsevier pp.301-14. Available at: <http://implicit.che.utah.edu/Teaching/7753-7755/Papers/k-e%20model%20of%20turbulence.pdf> [Accessed 03 December 2014].
- Jo, J.H. e Otaric, T.P., 2011. A hierarchical methodology for the mesoscale assessment of building integrated roof solar energy systems. *Renewable Energy*, [Pdf]. 36(11), Elsevier pp.2992-3000. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09601481/36/11> [Accessed 05 January 2015].
- Justus, C.G., 1980. *Vent et performances des éoliennes*. p.140 Translated by J.L. Plazy. [Book] Paris, France: Editions SCM, 1980.
- Justus, C.G., Hargraves, W.R., Mikhail, A. e Graber, D., 1978. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal of applied meteorology*, [Pdf]. 17(3), American Meteorological Society pp.350-53. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281978%29017%3C0350%3AMFEWSF%3E2.0.CO%3B2> [Accessed 05 January 2015].
- Kalmikov, A., Dupont, G., Dykes, K. e Chan, C., 2010. Wind power resource assessment in complex urban environments. MIT campus case-study using CFD analysis. In *AWEA 2010 Windpower Conference, May 23-26*. Massachusetts, 2010. MIT, Meteodyn. pp.1-28.
- Kalnay, E. et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor.*, [Pdf]. 77, American Meteorological Society pp.437-71. Available at: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437%3ATNYRP%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437%3ATNYRP%3E2.0.CO%3B2) [Accessed 04 December 2014].
- Kanda, M., 2009. Review of Japanese Urban Models and a Scale Model Experiment. In Baklanov, A.; Grimmond, C.S.B.; Alexander, M.; Athanassiadou; M.. *Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas*. 1st ed. London, UK: Springer. Ch. 5. pp.39-46.
- Kanda, M. et al., 2007. Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, [Pdf]. July, 46(7), American Meteorological Society pp.1067-79. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAM2500.1> [Accessed 03 December 2014].
- Kasten, F., 1996. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. *Solar Energy*, 56(3), [Pdf] pp.239-44. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X95001147> [Accessed 05 January 2015].
- Lackner, M.A., Rogers, A.L. e Manwell, J.F., 2008. The round robin site assessment method: A new approach to wind energy site assessment. *Renewable Energy*, [Pdf]. September, 33(9), Elsevier pp.2019-26. Available at:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014810700403X> [Accessed 07 March 2014].
- Launder, B.E. e Sharma, B.I., 1974. Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, [Online]. 1(2), Elsevier pp.131-38. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00944548/1/2> [Accessed 02 May 2014].
- Lazaroiu, G.C. e Roscia, M., 2012. Definition methodology for the smart cities model. *Energy*, [Online]. 47(1), Elsevier pp.326-32. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544212007062> [Accessed 04 December 2014].
- Ledo, L., Kosasih, P.B. e Cooper, P., 2011. Roof mounting site analysis for micro-wind turbines. *Renewable Energy*, [Pdf]. May, 36(5), Elsevier pp.1379-91. doi:10.1016/j.renene.2010.10.030. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811000501X> [Accessed 07 March 2014].
- Li, D., Wang, S. e Yuan, P., 2010a. A review of micro-wind turbines in the built environment. In APPEEC, ed. *APPEEC 2010 - Power and energy engineering conference, 28-31 March 2010*. Chengdu, 2010a. IEEE. pp.1-4.
- Li, F., Xu, L., Guyenne, P. e Yu, J., 2010b. Recovering fluid-type motions using Navier-Stokes potential flow. In *CVPR 2010 - IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, CA, 2010b. IEEE. pp.2448-55.
- Macdonald, R.W., 2000. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorology*, [Pdf].01 October, 97(1), Kluwer academic publishers pp.25-45. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1002785830512#> [Accessed 07 March 2014].
- Manwell, J.F., McGowan, J.G. e Rogers, A.L., 2002. *Wind Energy Explained - Theory, design and application*. [Book] West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- MAOTE, 2014. Dec-Lei 153/2014. *Diário da República*, 20 October. pp.5298-311.
- MAOTE, 2014. Dec-Lei 153/2014 de 20 de Outubro. *Diário da República*, [Pdf] 20 October. pp.5298-311. Available at: http://www.renovaveisnatura.pt/c/document_library/get_file?uuid=05bdb091-4730-44b7-9896-41076ee16611&groupId=13360 [Accessed 28 December 2014].
- Marlatt, S., Waggy, S. e Biringen, S., 2011. Direct numerical simulation of the turbulent Ekman layer: evaluation of closure models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, [Pdf]. 69(3), American Meteorological Society pp.1106-17. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAS-D-11-0107.1> [Accessed 20 October 2014].
- Martilli, A. e Santiago, J.L., 2009. How to use computational fluid dynamics models for urban canopy parametrizations, Chapter 4. In Baklanov, A.; Grimmond, C.S.B.; Alexander, M.; Athanassiadou, M.. *Meteorological and air quality models for urban areas*. 1st ed. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer. pp.31-37.
- Martilli, A., Santiago, J.L. e Martin, F., 2007. Micrometeorological modelling in urban areas. *Física de La Tierra*, [Pdf].17 May, 19, Universidad Complutense pp.133-45. Available at:

- <http://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/viewFile/FITE0707110133A/11568>
[Accessed 03 December 2014].
- McIntyre, J.H., Lubitz, W.D. e Stiver, W.H., 2011. Local wind energy potential for the city of Guelph. *Renewable Energy*, [Pdf]. 36(5), Elsevier pp.1427-46. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811000491X> [Accessed 14 January 2014].
- MEE, 2012. Portaria nº431. *Diário da República*, 31 December. pp.7326-27.
- MEI, 2007. Dec-Lei nº363/2007. *Diário da República*, 2 November. pp.7978-84.
- MEID, 2010. Dec-Lei nº118A. *Diário da República*, 25 October. pp.4834(2)-4834(16).
- Meroney, R.N., 1982. Turbulent diffusion near buildings. In E. Plate, ed. *Engineering meteorology - Fundamentals of Meteorology and Their Application to Problems in Environmental and Civil Engineering*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V. Ch. 11. pp.481-525.
- Meteodyn, 2010. *UrbaWind 2.1.0.0 64bits (c) Meteodyn 2010*. [Online] Available at: <http://meteodyn.com/en/#.VLALvyusVZ4> [Accessed 25 January 2014].
- Milashuk, S. e Crane, W.A., 2011. Wind speed prediction accuracy and expected errors of RANS equations in low relief inland terrain for wind resource assessment purposes. *Environmental Modelling & Software*, [Pdf]. April, 26(4), Elsevier pp.429-33. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521000263X> [Accessed 04 December 2014].
- Millward-Hopkins, J.T. et al., 2012. The predictability of above roof wind resource in the urban roughness sublayer. *Wind Energy*, [Pdf]. March, 15(2), John Wiley and Sons, Ltd pp.225-43. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.463/pdf> [Accessed 03 December 2014].
- Millward-Hopkins, J.T. et al., 2013. Mapping the wind resource over UK cities. *Renewable Energy*, [Pdf]. July, 55, Elsevier pp.202-11. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112008051> [Accessed 07 March 2014].
- Millward-Hopkins, J.T. et al., 2011. Estimating aerodynamic parameters of urban-like surfaces with heterogeneous buildings heights. *Boundary layer meteorology*, [Pdf]. 12 August, 141(2), Springer pp.443-65. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10546-011-9640-2#page-1> [Accessed 03 December 2014].
- Ministério da Economia e do Emprego, 2012. Portaria nº 430/2012. *Diário da República*, 31 Dezembro.
- MM5, 2013. *MM5 Community Model*. [Online] Available at: <http://www.mmm.ucar.edu/mm5/> [Accessed 15 Março 2013].
- Monteiro, C. et al., 2013. Short-term forecasting models for photovoltaic plants: analytical versus soft-computing techniques. *Mathematical problems in engineering*, [Pdf]. 19 October, 2013, Hindawi Publishing corporation pp.1-9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/767284> [Accessed 28 February 2014].
- Montero, G., Escobar, J.M., Rodriguez, E. e Montenegro, R., 2009. Solar radiation and shadow modelling with adaptive triangular meshes. *Solar Energy*, [Pdf]. 83(7), Elsevier pp.998-1012. Available at:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09000061> [Accessed 12 January 2014].
- Mortensen, N.G., Heathfield, D.N., Myllerup, L.L.L. e Rathman, O., 2007. *Getting Started with WAsP 9*. Technical Report. Roskilde: DTU Technical University of Denmark. pp.1-72.
- Muneer, T., 1997. *Solar Radiation and Daylight Models for Energy Efficient Design of Buildings*. 2nd ed. p.341 [E-book] Oxford: Taylor & Francis. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750659741> [accessed 05 October 2013].
- Natural Resources, 2013. *RetScreen International - Empowering clean energies decisions*. [Online] Available at: <http://www.retscreen.net/ang/home.php> [Accessed 18 Março 2013].
- Nguyen, D.D., Lehman, B. e Kamarthi, S., 2007. Solar Photovoltaic Array's Shadow Evaluation Using Neural Network with On-Site Measurement. In *2007 IEEE Canada Electrical Power Conference.*, 2007. IEEE. pp.44-49.
- Nguyen, H.T., Pearce, J.M., Harrap, R. e Barber, G., 2012. The Application of LiDAR to Assessment of Rooftop Solar Photovoltaic Deployment Potential in a Municipal District Unit. *Sensors*, [Pdf].10 April, 12(4), MDPI AG pp.4534-58. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22666044> [Accessed 07 March 2014].
- NUDAPT, 2012. *NUDAPT*. [Online] Available at: <http://www.nudapt.org> [Accessed 18 Julho 2012].
- Oke, T.R., 1988. The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, [Online]. 12(4), Sage Journals pp.471–508. Available at: <http://ppg.sagepub.com/content/12/4/471.full.pdf> [Accessed 21 October 2013].
- Oliveira Panão, M.J.N., Gonçalves, H.J.P. e Ferrão, P., 2008. Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach. *Renewable Energy*, [Pdf]. May, 33(5), Elsevier pp.887-96. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148107001358> [Accessed 10 February 2014].
- Panofsky, H.A., 1982. The Atmosphere. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology*, [Book] Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company. Ch. 1. pp.1-32.
- Pearlmutter, D., Berliner, P. e Shaviv, E., 2005. Evaluation of urban surface energy fluxes using an open-air scale model. *Journal of Applied Meteorology*, [Pdf]. 44, AMS pp.532-45. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAM2220.1> [Accessed 23 January 2013].
- Petersen, E.L. et al., 1997. *Wind Power Meteorology*. Technical Report. Roskilde, Denmark: Risoe National Laboratory Risoe National Laboratory. p.46.
- Pirisi, A., Grimaccia, F., Musetta, M. e Zich, R.E., 2012. Novel speed bumps design and optimization for vehicles' energy recovery in smart cities. *Energies*, [Online].14 November, 5(11), MDPI AG pp.4624-42. Available at: <http://connection.ebscohost.com/c/articles/83595044/novel-speed-bumps-design-optimization-vehicles-energy-recovery-smart-cities> [Accessed 07 March 2014].
- Plate, E., 1982. Wind tunnel modelling of wind effects in engineering. In E. Plate, ed. *Engineering Meteorology*. Amsterdam: Elsevier. Ch. 13. pp.573-639.
- Plate, E.J. e Kiefer, H., 2001. Wind Loads in Urban Areas. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, [Pdf]. 89(14-15), Elsevier pp.1233-56. Available at:

- <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610501001593> [Accessed 03 December 2014].
- Pons, X. e Ninyerola, M., 2008. Mapping a topographic global solar radiation model implemented in a GIS and refined with ground data. *International Journal of Climatology*, [Pdf]. 14 March, 28(13), Royal Meteorological Society pp.1821-34. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.1676/pdf> [Accessed 04 December 2014].
- Quah, A.K.L. e Roth, M., 2012. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city - Singapore. *Atmospheric Environment*, [Pdf]. 46, Elsevier pp.92-103. Available at: <http://profile.nus.edu.sg/fass/geomr/quah%20roth%20ae12.pdf> [Accessed 25 October 2012].
- Rafailidis, S., 1997. Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-Layer Meteorology*, [Online]. 85(2), Kluwer Academic Publishers pp.255–71. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1000426316328#page-1> [Accessed 03 December 2014].
- Ramachandra, T.V., 2007. Solar energy potential assessment using GIS. *Energy Education Science and Technology*, [Pdf]. 18(2), Sila Science pp.101-14. Available at: http://www.ces.iisc.ernet.in/biodiversity/pubs/ces_pubs/pubs_2007/theme4_38.pdf [Accessed 03 December 2014].
- Raupach, M.R., Thom, A.S. e Edwards, I., 1980. A wind-tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces. *Boundary Layer Meteorology*, [Online]. 18(4), Springer Netherlands pp.373-97. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF00119495#page-1> [Accessed 03 December 2014].
- Ray, M.L., Rogers, A.L. e McGowan, J.G., 2006. Analysis of wind shear models and trends in different terrains. In *AWEA 2006 - Windpower 2006 Convention*. Pittsburgh, 2006. AWEA. pp.1-14.
- Redweik, P., Catita, C. e Brito, M., 2013. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. *Solar Energy*, [Pdf]. November, 97, Elsevier pp.332-41. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13003460> [Accessed 05 March 2014].
- Reynolds, W.C., 1976. Computation of Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, [Pdf]. 8, Annual Reviews pp.183-208. Available at: <http://iod.ucds.edu/~falk/reading/reynolds76.pdf> [Accessed 03 December 2014].
- Ribeiro, C.A.M., Carvalho, H.J.M. e dos Santos, M.A., 2010. Metodologia para análise do sombreamento em centros urbanos. In *III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação*. Recife, 2010. pp.1-9.
- Rich, P.M., Dubayah, R., Hetrick, W.A. e Saving, S.C., 1994. *Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology*. Technical Paper. NY: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing American Society of Photogrammetry and Remote Sensing. pp.524–29.
- Rich, P.M. e Fu, P., 2000. Topoclimatic Habitat Models. In *GIS/EM4 - Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling: Problems, Prospects and Research Needs*. Banff, 2000.

- Rotach, M.W., 1999. On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmospheric Environment*, [Pdf]. 33(24-25), Elsevier pp.4001-08. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099001417> [Accessed 03 December 2014].
- Roth, M., 2000. Review of atmospheric turbulence over cities. *Q. J. R. Meteorol. SOC.*, [Pdf]. 126(564), Royal Meteorological Society pp.941-90. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.49712656409/pdf> [Accessed 05 January 2013].
- Ryan, K., Thomson, M.C. e Hourigan, K., 2005. Three-dimensional transition in the wake of bluff elongated cylinders. *Journal of fluid mechanics*, [Pdf]. 538, Cambridge University Press pp.1-29. Available at: http://mec-mail.eng.monash.edu.au/~mct/pubs/pdfs/RyThHo05_jfm.pdf [Accessed 03 December 2014].
- Schallenberg-Rodríguez, J., 2013. Photovoltaic techno-economical potential on roofs in regions and islands: the case of the Canary Islands. Methodological review and methodology proposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [Online]. April, 20, Elsevier pp.219-39. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006922> [Accessed 04 December 2014].
- Seabra, J., 2011. *Atlas do Potencial de Microgeração Eólica em Portugal Continental*. Lisboa: FCUL. p.20.
- Shen, H. e Tzempelikos, A., 2013. Evaluation of Shading Retrofit Strategies for Energy Savings in Office Buildings. In *CISBAT 2013 - International Conference on Cleantech for Smart Cities and Buildings from Nano to Urban Scale. 4-6 September*, Lausanne - Switzerland, 2013. pp.55-60.
- Simiu, E. e Scanlan, R.H., 1986. *Wind effects on structures. An introduction to wind engineering. 2nd edition*. 2nd ed. p.589 [Book] New York, USA: John Wiley and Sons.
- Simoens, S., Ayrault, M. e Wallace, J.M., 2007. The flow across a street canyon of variable width - part 1: kinematic description. *Atmospheric Environment*, [Pdf]. 41(39), Elsevier pp.9002-17. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007007169> [Accessed 03 December 2014].
- Simões, T., Costa, P. e Estanqueiro, A., 2008. A Methodology for the Identification of the Sustainable Wind Potential. The Portuguese Case Study. In *PSCE '09. IEEE/PES - Power Systems Conference and Exposition, 2009.*. Seattle, Washington, EU, 2008. IEEE. pp.1-7.
- Skamarock, W.C. e Klemp, J.B., 2007. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, [Pdf]. 17 February, 227, Elsevier pp.3465-85. Available at: http://www.mmm.ucar.edu/people/skamarock/Papers/cv_39.pdf [Accessed 07 March 2014].
- SoDa, 2013. *SoDa*. [Online] Available at: <http://www.soda-is.com/eng/index.html> [Accessed 9 January 2013].
- Spokas, K. e Forcella, F., 2006. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data. *Weed Science*, [Online]. 54(1), BioOne pp.182-89. Available at: <http://www.bioone.org/doi/abs/10.1614/WS-05-098R.1> [Accessed 04 December 2014].

- Spronken-Smith, R.A., Oke, T.R. e Lowry, W.P., 2000. Advection and the surface energy balance across an irrigated urban park. *International journal of climatology*, [Pdf]. 20, Royal Meteorological Society pp.1033-47. Available at: [http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1097-0088\(200007\)20:9%3C1033:AID-JOC508%3E3.0.CO;2-U/pdf](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1097-0088(200007)20:9%3C1033:AID-JOC508%3E3.0.CO;2-U/pdf) [Accessed 04 May 2011].
- Suri, M. et al., 2007a. Uncertainties in photovoltaic electricity yield prediction from fluctuations of solar radiation. In *Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Milano, Italy, 2007a. pp.1-6.
- Suri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D. e Ossenbrink, H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the european union member states and candidate countries. *Solar Energy*, [Pdf]. 81(10), Elsevier pp.1295-305. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X07000229> [Accessed 05 January 2014].
- Syngellakis, K., Clement, P. e Cace, J., 2005. *Wind energy integration in the urban environment - WINEUR. Techno-economic report*. Project report. U.K.: European Comission - Intelligent Energy europe. pp.1-40.
- Takimoto, H. et al., 2011. Particle image velocimetry measurements of turbulent flow within outdoor and indoor urban scale models and flushing motions in urban canopy layers. *Boundary-Layer Meteorology*, [Online]. 140(2), Springer Netherlands pp.295-314. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10546-011-9612-6#page-2> [Accessed 03 December 2014].
- Taylor, J., Eastwick, C., Lawrence, C. e Wilson, R., 2013. Noise leves and noise perception from small and micro wind turbines. *Renewable Energy*, [Pdf]. July, 55, Elsevier pp.120-27. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112007665> [Accessed 07 March 2014].
- Tennekes, H. e Lumley, J.L., 1972. The dynamics of turbulence. In Tennekes, H. e Lumley, J.L. *A first course in turbulence*. Massachusetts, USA: The Massachusetts Institute of Technology. pp.59-75.
- Tewari, M. et al., 2010. Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion. *Journal of Atmospheric Research*, [Pdf]. June, 96(4), Elsevier pp.656-64. Available at: <http://nldr.library.ucar.edu/repository/collections/OSGC-000-000-000-696> [Accessed 07 March 2014].
- Tiba, C. et al., 2010. A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. *Renewable Energy*, [Pdf]. 35(12), Elsevier pp.2921-32. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148110002272> [Accessed 02 June 2013].
- Troen, I., 1990. A high resolution spectral model for flow in complex terrain. In *In proceedings of the Ninth Symposium on Turbulence and Diffusion 1990*. Roskilde, 1990. Risoe. pp.419-20.
- Troen, I. e Petersen, E.L., 1989. *European Wind Atlas*. 1st ed. Roskilde, Denmark: Riso National Laboratory.
- Tsoutos, T. et al., 2009. sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy Policy*, 37, pp.1587-600.

- Tutar, M. e Oguz, G., 2004. Computational Modeling of Wind flow Around a Group of Buildings. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, [Pdf]. 18(8), Taylor and Francis pp.651-70. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10618560412331291160#.VKxBvyusVZ4> [Accessed 03 December 2014].
- Tutar, M. e Oguz, G., 2007. Computational Modeling of wind flow around a group of buildings. *International journal of computational fluid dynamics*, [Pdf]. 25 January, 18(8), Taylor and Francis pp.651-70. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10618560412331291160#.UxoNvWyp2M8> [Accessed 07 March 2014].
- Unger, J., 2004. Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research*, [Pdf]. 27, Inter-Research pp.253–64. Available at: <http://www.int-res.com/articles/cr2004/27/c027p253.pdf> [Accessed 03 December 2014].
- Walker, S.L., 2011. Building mounted wind turbines and their suitability for the urban scale - A review of methods of estimating urban wind resource. *Energy and Buildings*, [Pdf]. Augustus, 43(8), Elsevier pp.1852-62. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811001101> [Accessed 08 December 2013].
- Wallbank, T., 2008. *WindSim Validation Study - CFD validation in complex terrain*. Validation Report. Tønsberg: WindSim WindSim AS. pp.1-89.
- Wang, H. e Chen, Q., 2012. A new empirical model for prediction single-sided, wind-driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*, [Pdf]. November, 54, Elsevier pp.386-94. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812003738> [Accessed 07 March 2014].
- Weekes, S.M. e Tomlin, A.S., 2013. Evaluation of a semi-empirical model for predicting the wind energy resource relevant to small-scale wind turbines. *Renewable Energy*, [Pdf]. 24 July, 50, Elsevier pp.280-88. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112004041> [Accessed 04 December 2014].
- Weis, T. e Ilinca, A., 2010. Assessing the potential for a wind power incentive for remote villages in Canada. *Energy Policy*, [Pdf]. October, 38(10), Elsevier pp.5504-11. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421510003137> [Accessed 04 December 2014].
- Wiesmann, W., Azevedo, I.L., Ferrão, P. e Fernández, J.E., 2011. Residential electricity consumption in Portugal: Findings from top-down and bottom-up models. *Energy Policy*, 39(5), Elsevier pp.2772-79. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.047> [Accessed 21 February 2014].
- Wiginton, L.K., Nguyen, H.T. e Pearce, J.M., 2010. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Computers, Environment and Urban Systems*, [Pdf]. 34(4), Elsevier pp.345-57. [Accessed 04 December 2014].
- Wilcox, D.C., 1993. Comments on the physics of turbulence. In Wilcox, D.C. *Turbulence modeling for CFD*. Glendale, California, USA: DCW Industries, Inc. Ch. 1. pp.2-3.
- Wilcox, D.C., 1993. Turbulence energy equation models. In Wilcox, D.C. *turbulence modeling for CFD*. 1st ed. Glendale, California, USA: DCW Industries, Inc. Ch. 4. pp.73-140.

- WindPower, 2008. *Carbon Trust. Small-scale wind energy. Policy insights and practical guidance*. Technical Report. WindPower. p.41.
- WindPower, 2012. *Carbon Trust. Small-scale wind energy. Policy insights and practical guidance*. Technical Report. WindPower. pp.1-41.
- WindSim, 2012. *WindSim 5.0.1 (c) WindSim*. [Online] Available at: <https://www.windsim.com/> [Accessed 15 January 2014].
- Wittmann, H., Bajons, P., Doneus, M. e Friesinger, H., 1997. Identification of roof areas suited for solar energy conversion systems. *Renewable Energy*, [Pdf]. 11(1), Elsevier pp.25-36. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148196001164> [Accessed 04 December 2014].
- Xie, Z. e Castro, I.P., 2009. Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets. *Journal of Atmospheric Environment*, [Pdf]. April, 43(13), Elsevier pp.2174-85. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135223100900034X> [Accessed 07 March 2014].
- Yakhot, V. e Orszag, S.O., 1986. Renormalization group methods in turbulence. I. Basic Theory. *Journal of Scientific Computing*, [Pdf]. May, 4(2), Springer pp.1-51. Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007%FBF01061452> [Accessed 03 December 2014].
- Yassin, M., 2009. Numerical study of flow and gas diffusion in the near-wake behind an isolated building. *Advances in atmospheric sciences*, [Pdf]. 11 January, 26(6), Springer pp.1241-52. Available at: http://download.springer.com/static/pdf/559/art%253A10.1007%252Fs00376-009-8025-7.pdf?auth66=1394386044_ff7403e2c86da9ea80f8017123738ed9&ext=.pdf [Accessed 07 March 2014].
- Yassine Charabi, A.G., 2011. PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy, Volume 36, Issue 9*, pp.2554-61.
- Zajic, D. et al., 2011. Flow and turbulence in an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, [Pdf]. 50(1), American Meteorological Society pp.203-23. Available at: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2010JAMC2525.1> [Accessed 03 December 2014].
- Zen, A.C. e Bianchi, A.L., 2011. Assessment of sustainable energy of cities: A proposal of indicators. In *WCST 2011 - World Congress on Sustainable Technologies*. London, 2011. IEEE. pp.32-35.

ANEXO I – EQUAÇÕES METEOROLÓGICAS DA ATMOSFERA

Equação dos gases

A equação dos gases para o ar seco é dada por:

$$P = R\rho T ; \quad (1.1)$$

onde R é a constante dos gases para o ar seco, e tem o valor 2.87×10^2 Joules/Kg/K. Na presença de humidade esta constante deve ser modificada para:

$$R = R_d(1 + 0.61q) ; \quad (1.2)$$

onde R_d é a constante dos gases para o ar seco e q é a humidade específica.

Evitando a utilização de constantes dos gases variáveis surge o conceito de temperatura virtual, T_V definida por:

$$p = R\rho T_V . \quad (1.3)$$

Dada uma parcela de ar húmido, a temperatura virtual é a temperatura que o ar seco teria de produzir para uma densidade sobre uma dada pressão observada.

Equação da humidade

A equação da humidade pode ser escrita como:

$$\frac{dq}{dt} = -Cond \pm Evap + D_{mol} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho \overline{w_i q_i}}{\partial x_i} ; \quad (1.4)$$

onde $\frac{d}{dt}$ é a derivada total, pelo que $\frac{dq}{dt}$ descreve a variação da humidade específica de uma parcela de ar com uma determinada dimensão. *Cond* representa a perda de humidade por condensação. *Evap* é o ganho de humidade por evaporação. Este termo é importante apenas em superfícies de água e é frequentemente desprezado. D_{mol} é o ganho ou perda de humidade por difusão molecular. Este termo é normalmente desprezável quando comparado com o último termo que representa as alterações de humidade devido à mistura com o ar de diferente conteúdo de mistura, um processo que é também denominado de *eddy diffusion*.

Equações do tipo da 1.3 são frequentemente resolvidas para variações locais. Nestes casos são adicionados termos ao lado direito da equação, da forma: $-u_i [(\partial q)/(\partial x_i)]$.

Estas alterações são denominadas de advectivas, e descrevem as alterações locais das variáveis devido ao movimento de ar com características diferentes. As alterações advectivas podem ocorrer devido a movimento quer horizontal quer vertical.

1ª lei da termodinâmica

Para aplicações meteorológicas, a 1ª lei da termodinâmica pode ser escrita na forma:

$$c_p \frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} + L_E(C - E) + r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho_p \overline{wT'}}{\partial x_i}; \quad (1.5)$$

onde c_p é o calor específico a pressão constante ($1000 \text{ joules kg}^{-1} \text{ grau}^{-1}$), r representa as variações de temperatura devido a fluxos radiantes, pequeno comprimento de onda e infravermelho, C representa a perda de humidade por condensação, E representa as alterações na humidade devido a mistura com ar de diferente humidade e L_E é o calor latente de vaporização que para aplicações meteorológicas é próximo de $2.5 \times 10^6 \text{ joules/kg}$.

Estabilidade da atmosfera

O conceito de estabilidade da atmosfera é normalmente representado considerando o deslocamento ascendente de um pequeno elemento de ar para uma altitude com menor pressão ambiente. Apesar de existir uma elevada variabilidade na taxa de redução da temperatura do ar envolvente com a altitude, pode assumir-se a taxa padrão de $0.66''\text{C}/100\text{m}$. Por outro lado, o pequeno elemento de ar em movimento ascendente irá arrefecer a uma taxa igual a $10^\circ\text{C}/100\text{m}$ (Gradiente adiabático seco). Se o elemento de ar tivesse a mesma temperatura que o ar circundante de início, depois de subir 100m , teria arrefecido mais depressa do que o ar circundante e estaria $0.34''\text{C}$ mais frio que o ar envolvente. A amostra será mais densa e tenderá a voltar ao seu nível original. A este estado atmosférico denomina-se “estável”.

Para generalizar, qualquer atmosfera a variação da temperatura com a altitude em condições normais é superior à mesma variação para condições adiabáticas é estável. A maioria dos modelos utilizados na avaliação do potencial eólico considera atmosfera estável ou neutra (no caso dos modelos lineares).

Da mesma forma, para haver estabilidade não é necessário existir inversão (aumento da temperatura com a altitude), muito embora nesse caso a atmosfera seja ainda mais estável [Manwell et al., 2002].

ANEXO II – PARÂMETROS RELEVANTES PARA O ESTUDO DO BALANÇO ENERGÉTICO NUMA ÁREA URBANA

O balanço energético à superfície de uma dada área urbana pode ser descrito da seguinte forma:

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow ; \quad (\text{II.1})$$

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_G ; \quad (\text{II.2})$$

onde $K \downarrow$ e $K \uparrow$ representam a radiação descendente e ascendente de pequeno comprimento de onda, Q^* , Q_F , Q_H , Q_E , e Q_G representam, respectivamente, radiação líquida (*net*), emissão de calor artificial, fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e armazenamento de calor [Kanda, 2007].

O parâmetro Q^* - Radiação “líquida”

Este parâmetro depende fortemente da poluição e naturalmente do tipo de ambiente em análise, i.e., rural ou urbano. De acordo com a natureza e quantidade de poluição há maior ou menor atenuação da radiação líquida que atinge a zona urbana. Esta atenuação pode variar entre 3% e 10%, aproximadamente, sendo o maior valor observado em cidades fortemente poluídas. As componentes $K \downarrow$, $K \uparrow$, $L \downarrow$ e $L \uparrow$ têm comportamentos diferentes em zonas rurais e urbanas. As primeiras duas apresentam valores inferiores em áreas urbanas devido ao reduzido albedo que se verifica nestes ambientes, e as duas últimas, valores superiores. $L \downarrow$ é maior em áreas urbanas devido à emissão de gases e partículas poluentes, mas $L \uparrow$ é igualmente superior devido ao aumento da temperatura. Estas relações de equilíbrio entre as componentes radiativas resultam em pequenas diferenças na radiação “líquida” entre zonas urbanas e rurais.

O parâmetro Q_G - armazenamento de calor

Uma grande quantidade de armazenamento de calor, Q_G/Q^* é a situação mais significativa do balanço energético num ambiente urbano. As propriedades térmicas urbanas, tais como a elevada capacidade de aquecimento e o aumento do volume térmico activo motivado pela complexa geometria tridimensional vão permitir armazenamento adicional de calor nos edifícios.

Ao contrário da vegetação, o tecido urbano não mostra influência evidente em dados observados neste tipo de ambientes. No entanto, modelos desenvolvidos para este tema, bem como ensaios *in situ*, sugerem que a geometria da superfície influencia a relação Q_G/Q^* , sendo a absorção de radiação e o armazenamento de calor mais elevados em conjuntos de edifícios com alturas elevadas e ruas bem definidas (*desfiladeiros urbanos*) [Pearlmutter et al., 2005].

Da mesma forma, grandes quantidades de Q_G diurnas, são equilibradas pela elevada libertação de Q_G nocturno. Os valores nocturnos de Q_G/Q^* nas cidades varia, geralmente, entre 0.9 e 1.3. A libertação nocturna de Q_G é frequentemente superior à perda radiactiva de Q^* , e o excesso de energia suporta os fluxos de calor sensível e latente ascendentes mesmo durante a noite [Kanda, 2007].

O parâmetro Q_E – Fluxo de calor latente (Evapotranspiração)

A vegetação é a maior fonte de vapor de água das áreas urbanas. Assim, existe uma relação entre a componente diurna Q_E/Q^* e a fracção de vegetação da superfície.

A razão de Bowen, $B = Q_H/Q_E$, onde Q_H é o fluxo de calor sensível, depende das condições climáticas e da superfície e varia de cidade para cidade. A evapotranspiração urbana tem sido assumida ao longo dos anos como bastante inferior à que se verifica em zonas rurais. No entanto, estudos recentes mostram que a evapotranspiração tem um valor significativamente superior ao que se pensava especialmente em parques e zonas verdes com alguma dimensão [Spronken-Smith et al., 2000].

O parâmetro Q_F – Emissão de calor artificial (antropogénico)

O termo Q_F é essencialmente a energia libertada pelas fontes humanas, tais como veículos, edifícios residenciais, comerciais e de serviços, indústria, metabolismo humano ou centrais de produção de energia. O interesse no estudo deste parâmetro tem crescido ao longo dos anos, principalmente porque estudos recentes mostram que em cidades densamente povoadas, com elevados consumos energéticos, Q_F pode ser potencialmente importante no balanço energético das áreas urbanas com potencial para influenciar o clima urbano.

A magnitude de Q_F varia de forma significativa, não só entre cidades mas também dentro das cidades dependendo da utilização de energia *per capita*, densidade populacional e condições meteorológicas. De acordo com Oke [1988] a média anual de Q_F para grandes cidades pode variar entre 20 e 160 W/m² [Quah e Roth, 2012].

ANEXO III – CÁLCULO DOS PARÂMETROS INCLUÍDOS NA FERRAMENTA DE ANÁLISE DA RADIAÇÃO SOLAR DO SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Cálculo da linha de vista

A linha de vista (*viewshed*) é uma representação *raster* do céu que é visível ou obstruído quando visto de uma dada localização. É calculada percorrendo um determinado nº de direcções em redor do local ou área de interesse e determinando o ângulo máximo de obstrução do céu, ou ângulo de horizonte. Para as direcções não contempladas, os ângulos de horizonte são interpolados. Os ângulos de horizonte são convertidos para um sistema de coordenadas hemisféricas, representando assim um hemisfério tridimensional de direcções como uma imagem *raster* bidimensional.

A cada célula *raster* da representação da linha de vista, é atribuído um valor que corresponde ou a céu visível ou a céu obstruído. A localização das células de saída (linhas e colunas), corresponde a ângulos de zénite e de azimute no hemisfério de direcções.

A figura abaixo ilustra o cálculo de uma linha de vista para uma célula do modelo digital de terreno utilizado. Os ângulos de horizonte são calculados ao longo de um número específico de direcções e utilizados para criar uma representação hemisférica do céu. A linha de vista resultante caracteriza as direcções do céu do ponto de vista da sua visibilidade (na figura III.1, a branco as visíveis e a cinzento as obstruídas).

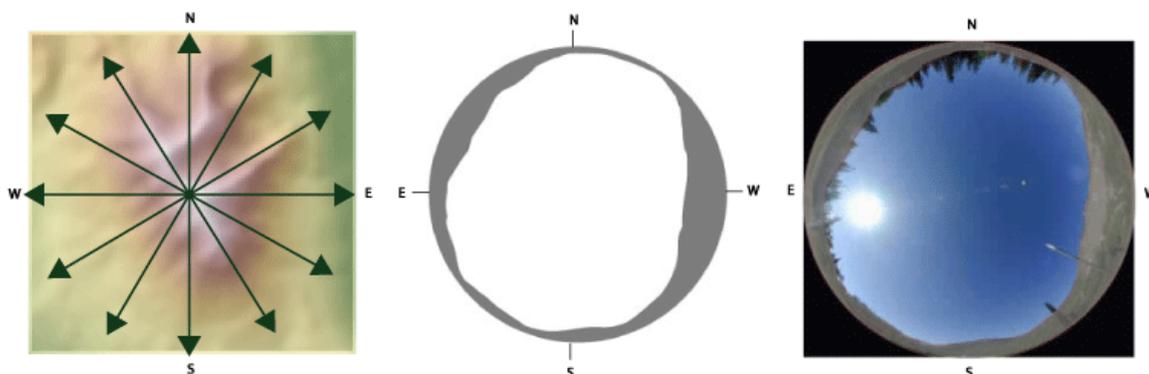


Figura III.1 – Representação do processo de cálculo da linha de vista hemisférica.

As linhas de vista são utilizadas em conjunto com a informação sobre a posição do sol e direcção do céu (mapa de sol e mapa de céu respectivamente) para calcular a radiação total, directa e difusa para cada localização de forma a produzir um mapa de radiação preciso.

Cálculo do mapa de Sol

A radiação solar directa originada para cada direcção do céu é calculada através de um mapa de sol na mesma projecção hemisférica que a linha de vista. Um mapa de Sol é uma representação *raster* que apresenta o caminho solar ou posição aparente do sol à medida que esta varia com as horas do e ao longo de cada dia do ano. O mapa de Sol consiste num conjunto discreto de sectores de mapa de Sol definidos pela posição do sol em determinados intervalos de tempo ao longo do ano (horas, dias, meses).

O caminho solar é calculado com base na latitude da área em análise e na configuração temporal que define os sectores do mapa de sol. Para cada sector do mapa de sol, é

identificado apenas um único valor juntamente com o zénite do centróide (do pixel ou elemento de grelha) e ângulo de azimute. A radiação solar originada em cada sector é calculada separadamente e a linha de vista é sobreposta ao mapa de sol para o cálculo da radiação directa. A figura III.2 representa um exemplo de mapa de Sol.

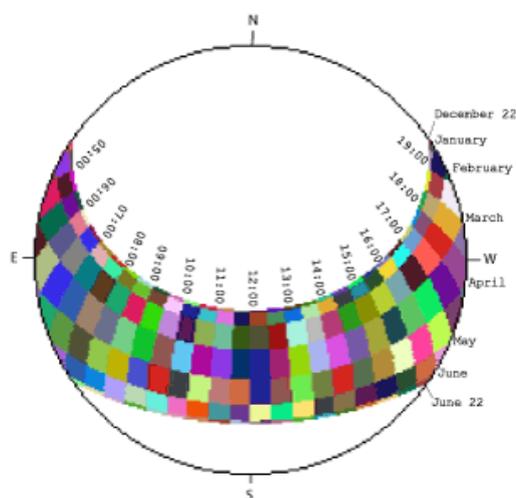


Figura III.2 – Exemplo de um mapa de Sol.

Cálculo do mapa de Céu

A radiação difusa é originada de todas as direcções do céu como resultado da dispersão provocada pelos constituintes atmosféricos (nuvens, partículas,...). Para calcular a radiação difusa para um dado local, é criado um mapa de Céu para representar uma vista hemisférica de todo o céu dividido numa série de sectores de céu definidos pelos ângulos de zénite e azimute.

A figura III.3 representa um exemplo de um mapa de Céu com sectores de céu definidos por 8 divisões de zénite e 16 de azimute. Cada cor representa um sector de Céu ou porção de céu, da qual é originada radiação difusa.

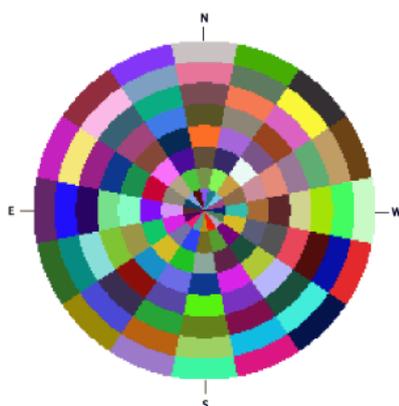


Figura III.3 – Exemplo de mapa de Céu.

Durante o cálculo da irradiação o *raster* de linha de vista é sobreposto ao mapa de Sol e mapa de Céu para calcular as componentes da radiação directa de difusa recebida por cada direcção de céu. A proporção de área de céu visível em cada sector é calculada através da divisão do nº de células desobstruídas pelo número total de células de cada sector.

A figura III.4 ilustra o processo descrito onde as zonas a cinzento representam sectores de céu obstruído. A radiação solar é calculada através da soma das componentes directa e difusa originadas pelos sectores de céu desobstruído.

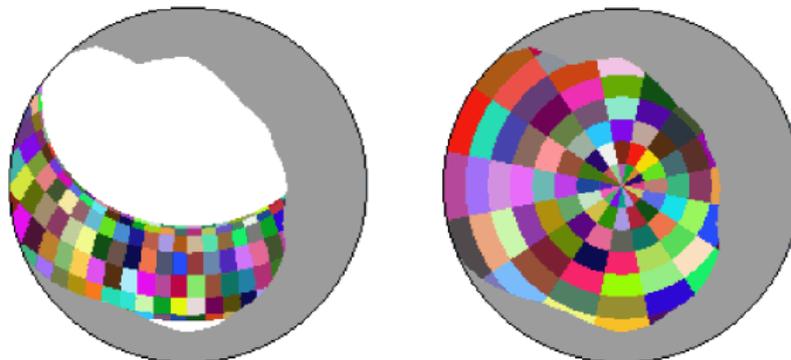


Figura III.4 – Exemplos de mapa de Sol e mapa de Céu sobrepostos a linha de vista.

Equações de Análise da Radiação Solar

As ferramentas de análise da radiação solar, calculam a irradiação numa dada área geográfica apresentada na forma de grelha de pontos (mapa *raster*) ou em localizações específicas, e recorrem ao método do algoritmo de linha de vista (ou *viewshed* hemisférico) desenvolvido por, [Fu e Rich, 2000], [Fu e Rich, 2002], [Rich et al., 1994], [Rich e Fu, 2000].

A quantidade total de radiação calculada para uma determinada localização ou área é dada como radiação global. O cálculo da irradiação directa, difusa e global é repetida para cada local e ocorrência na superfície topográfica produzindo mapas de irradiação para uma área geográfica completa.

Cálculo da radiação global

A irradiação global $Glob_{tot}$ é calculada através da equação III.1 para todos os sectores de um mapa de Sol e de um mapa de Céu.

$$Glob_{tot} = Dir_{tot} + Dif_{tot}; \quad (III.1)$$

onde Dir_{tot} representa a irradiação directa total e Dif_{tot} a irradiação difusa total.

Cálculo da radiação directa

A irradiação directa total para uma dada localização é a soma de todas as irradiações directas, $Dir_{\theta,\alpha}$, de todos os sectores do mapa de Sol:

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta,\alpha}. \quad (III.2)$$

A irradiação directa do sector do mapa de Sol $Dir_{\theta,\alpha}$ com um centróide no ângulo de zénite (θ) e no ângulo de azimute (α) é calculada utilizando a equação III.3:

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{const} \times \beta m(\theta) \times SunDur_{\theta,\alpha} \times SunGap_{\theta,\alpha} \times \cos(Anghn_{\theta,\alpha}); \quad (III.3)$$

onde:

S_{const} é o fluxo solar fora da atmosfera a meia distância entre a Terra e o Sol, conhecida como constante solar. A constante solar utilizada tem o valor 1367 W/m^2 , consistente com a constante solar do World Radiation Center (WRC).

β é a transmissividade da atmosfera para o caminho mais curto (na direcção do zénite);

$m(\theta)$ é o comprimento óptico relativo medido como a proporção relativa do comprimento do caminho do zénite (*zenith path length*).

$SunDur_{\theta,\alpha}$ é a duração temporal representada pelo sector do céu. Para a maioria dos sectores, é igual ao intervalo diurno (por exemplo, um mês), multiplicado pelo intervalo horário (ex. meia hora). Para sectores parciais (perto do horizonte) a duração é calculada utilizando geometria esférica;

$SunGap_{\theta,\alpha}$ é a fracção de abertura (*gap fraction*) para o sector de mapa solar;

$Angln_{\theta,\alpha}$ é o ângulo de incidência entre o centróide do sector de céu e o eixo normal à superfície.

O comprimento óptico relativo $m(\theta)$ é determinado pelo ângulo de zénite solar e a elevação acima do nível médio do mar. Para ângulos de zénite inferiores a 80° , pode calcular-se utilizando a equação seguinte:

$$m(\theta) = \frac{\exp(-0.000118 \times Elev - 1.638 \times 10^{-9} \times Elev^2)}{\cos(\theta)}; \quad (III.4)$$

onde:

θ é o ângulo de zénite solar;

$Elev$ é a elevação acima do nível médio do mar, em metros.

O efeito da orientação da superfície é tido em conta através da multiplicação pelo co-seno do ângulo de incidência. O ângulo de incidência $AnglnSky_{\theta,\alpha}$ entre a superfície interceptante e um dado sector de céu com um centróide no ângulo de zénite e no ângulo de azimute é calculado com recurso à equação seguinte:

$$Angln_{\theta,\alpha} = \arccos[\cos(\theta) \times \cos\theta_z + \sin(\theta) \times \sin(\theta_z) \times \cos(\alpha - \alpha_\alpha)]; \quad (III.5)$$

onde:

θ_z é o ângulo de zénite da superfície;

α_α é o ângulo de azimute da superfície. Para ângulos de zénite superiores a 80° a refração assume um papel importante.

Cálculo da Radiação Difusa

Para cada sector de céu, a radiação difusa no seu centróide $Difn_{\theta,\alpha}$ é calculada através da integração sobre o intervalo de tempo e corrigida pela fracção do ângulo de incidência, recorrendo-se à seguinte equação:

$$Difn_{\theta,\alpha} = Rglb \times P_{dif} \times Dur \times SkyGap_{\theta,\alpha} \times Weight_{\theta,\alpha} \times \cos(Angln_{\theta,\alpha}); \quad (III.6)$$

onde:

R_{glb} é a radiação global normal;

P_{dif} é a proporção do fluxo de radiação global normal que é difundido (“diffused”). Tipicamente é de aproximadamente 0.2 para condições de céu limpo e 0.7 para condições de céu muito nublado;

Dur é o intervalo de tempo para análise;

$SkyGap_{\theta,\alpha}$ é a proporção de céu visível para o sector de céu;

$Weight_{\theta,\alpha}$ é a proporção de radiação difusa originada num dado sector de céu relativo a todos os sectores;

$Angln_{\theta,\alpha}$ é o ângulo de incidência entre o centróide do sector de céu e a superfície interceptante.

A radiação global normal pode ser calculada, somando a radiação directa de cada sector (incluindo sectores obstruídos) sem correcção para o ângulo de incidência, corrigindo para a proporção de radiação directa, que é igual a $1 - P_{dif}$:

$$R_{glb} = (S_{const} \times \sum \beta m(\theta)) / (1 - P_{dif}). \quad (III.7)$$

Para o modelo de difusão de céu uniforme, $Weight_{\theta,\alpha}$ é calculado da seguinte forma:

$$Weight_{\theta,\alpha} = \frac{(\cos \theta_2 - \cos \theta_1)}{Div_{azi}}, \quad (III.8)$$

onde:

θ_1 e θ_2 são os ângulos de ligação do zénite (“bounding zenith angles”) para o sector de céu;

Div_{azi} é o número de divisões azimutais no mapa de céu.

Para o modelo padrão de céu nublado, $Weight_{\theta,\alpha}$ é calculado da seguinte forma:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (2\cos\theta_2 + \cos 2\theta_2 - 2\cos\theta_1 - \cos 2\theta_1) / (4 \times Div_{azi}). \quad (III.9)$$

A radiação solar difusa total para a localização em análise é calculada como a soma da radiação solar difusa de todos os sectores do mapa de céu:

$$Dif_{tot} = \sum Dif_{\theta,\alpha}. \quad (III.10)$$

ANEXO IV – MODELOS CFD

Tipos de métodos numéricos em CFD

Os métodos numéricos normalmente utilizados nos modelos CFD podem ser classificados em elementos finitos, diferenças finitas ou volumes finitos. A selecção de um método e da estratégia de construção da malha de cálculo estão fortemente ligados e interdependentes.

- Método das diferenças finitas: Este método representa a aproximação mais antiga para a obtenção de soluções numéricas de equações diferenciais. Os métodos de diferenças finitas correspondem a uma estimativa de uma derivada através da implementação de um quociente entre duas diferenças de acordo com a definição teórica de derivada. A equação (2.90) representa a derivada no ponto x de uma função $u(x)$:

$$u_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} \quad (\text{IV.1})$$

Se se remover o limite da equação, obtém-se uma diferença finita, o que explica o nome atribuído ao método.

Se Δx for pequeno mas finito, a expressão da direita é um valor aproximado do valor exacto de u_x . Na realidade o conceito de aproximação de diferença finita é baseado nas propriedades da expansão de Taylor. Desenvolvendo $u(x + \Delta x)$ em torno de x tem-se [Hirsch, 2007]:

$$\frac{u(x+\Delta x)-u(x)}{\Delta x} = u_x(x) + \frac{\Delta x}{2} u_{xx}(x) + \frac{\Delta x^2}{6} u_{xxx}(x) + \dots; \quad (\text{IV.2})$$

onde $\frac{\Delta x}{2} u_{xx}(x) + \frac{\Delta x^2}{6} u_{xxx}(x) + \dots$ é o erro de truncatura.

Se se restringir o erro de truncatura ao seu termo dominante, i.e., à potência mais baixa de Δx , pode ver-se que esta aproximação para $u(x)$ tende para zero como a primeira potência de Δx , diz-se que é de primeira ordem em Δx e pode escrever-se:

$$\frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x} \cong u_x(x) + O(\Delta x) \quad (\text{IV.3})$$

indicando que o erro de truncatura $O(\Delta x)$ tende para zero como a primeira potência de Δx .

- Método dos volumes finitos: Este método foi desenvolvido para resolver as equações de Euler dependentes no tempo, inicialmente para escoamentos bidimensionais, tendo sido posteriormente estendido a problemas de escoamentos tridimensionais. A base deste método assenta na discretização directa da forma integral da lei de conservação da quantidade de movimento no espaço físico. A implementação deste método passa pela subdivisão da malha do problema em pequenos volumes finitos,

sendo que cada volume de controlo está associado a um ponto da malha e pela aplicação do integral da lei de conservação (e.g. da quantidade de movimento) a cada um dos pequenos volumes finitos. Este método pode ser aplicado a malhas estruturadas e não estruturadas. Para o mesmo tipo de malha podem definir-se duas abordagens; centrada na célula, onde as incógnitas se situam no centro das células da malha e as linhas da malha definem os volumes finitos e superfícies. As variáveis do escoamento são valores médios sobre a célula e podem ser consideradas representativas de um ponto no interior da célula (e.g. ponto central da célula). A segunda abordagem denomina-se vértice da célula, onde as incógnitas são definidas nos cantos das células da malha. As variáveis são anexadas aos pontos da malha, e existe uma maior flexibilidade na definição do volume de controlo. As figuras IV.1 representam as duas abordagens para malhas estruturadas e não estruturadas.

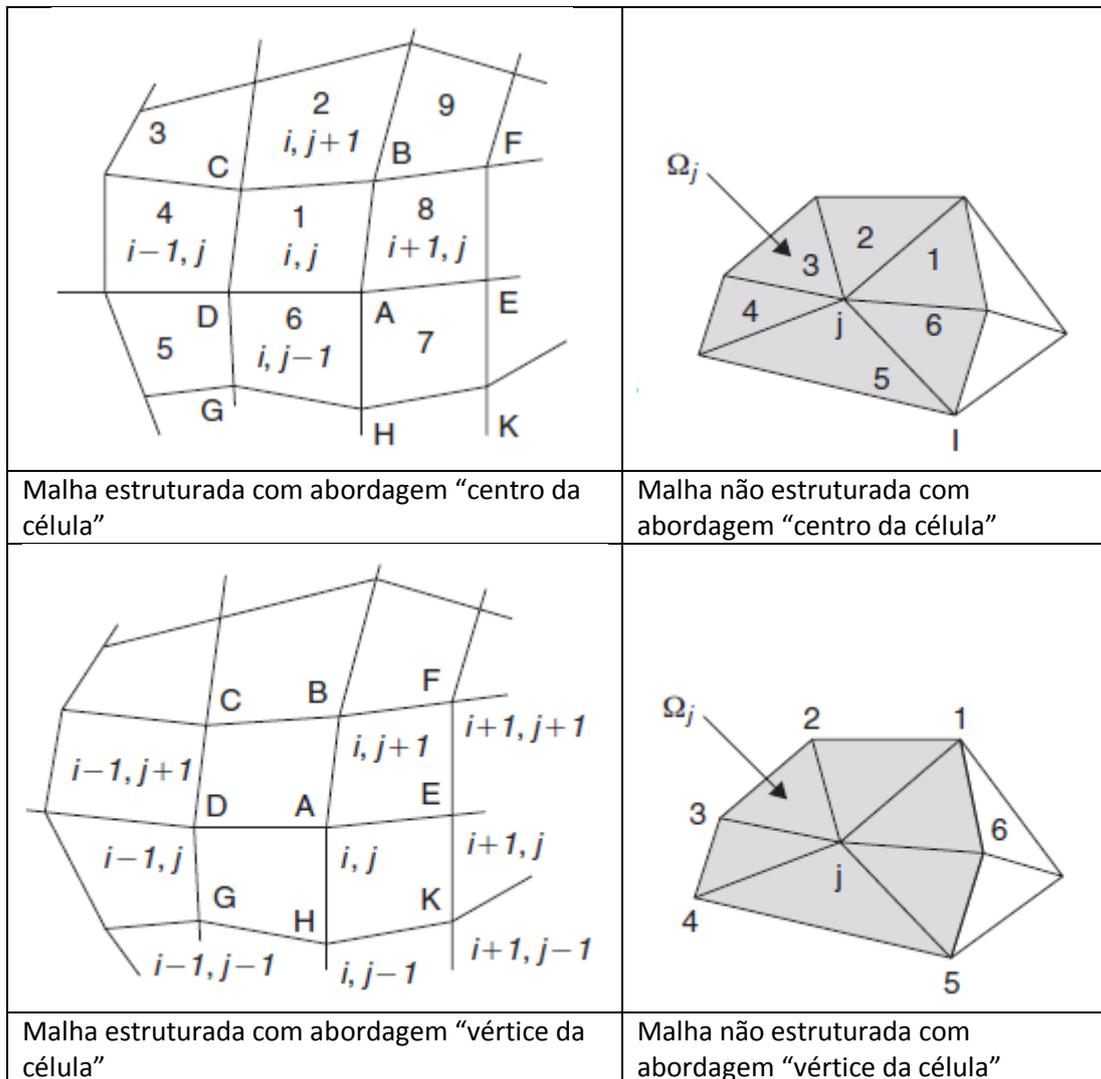


Figura IV.1 – Configuração “centro da célula” e vértice da célula” de volumes finitos para malhas estruturadas e não estruturadas.

O integral da lei de conservação é aplicado a cada volume Ω_j , associado a cada ponto da malha, J , definido pela equação de discretização para as incógnitas U_j anexas ao mesmo vértice ou célula:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_J} U d\Omega + \int_{\Omega_J} \vec{F} \cdot d\vec{S} = \int_{\Omega_J} Q d\Omega \quad (IV.4)$$

A vantagem deste método é que os fluxos são calculados apenas em superfícies bidimensionais em vez de no espaço tridimensional. Substituindo a equação IV.4 pela sua forma discreta, onde os integrais de volume são expressos como os valores médios sobre toda a célula e onde o integral de superfície é substituído pela soma de todas as faces delimitadoras do volume Ω_J , tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_J \Omega_J) + \sum_{faces} \vec{F} \cdot \Delta \vec{S} = Q_J \Omega_J ; \quad (IV.5)$$

onde \vec{F} representa um determinado fluxo, $\Delta \vec{S}$ é o elemento de superfície e Q_J é um termo fonte no ponto J do volume Ω_J .

- **Método elementos finitos:** Este método foi inicialmente desenvolvido para a resolução de problemas de mecânica aplicados a estruturas (estudo de tensões estruturais, entre outros). Neste caso, a estrutura em análise é subdividida em pequenas subestruturas de várias formas e posteriormente, “remontada” após análise de cada elemento. Mais tarde concluiu-se que poderia ser igualmente aplicado a meios contínuos. Assim, o método dos elementos finitos surge como um método de aproximação geral para a obtenção de soluções numéricas para problemas físicos descritos por equações em meios contínuos. Este método tem dois pontos comuns com o método dos volumes finitos; a discretização do espaço é considerada um conjunto de volumes ou células denominadas de elementos em oposição ao conjunto de pontos referentes aos métodos de diferenças finitas e requer uma formulação integral como ponto de partida a qual pode ser considerada como uma generalização do método dos volumes finitos. O método dos elementos finitos baseia-se na discretização do espaço em elementos arbitrários contíguos, típicos de malhas não estruturadas para as quais é mais adequado. Neste caso é definida em cada elemento uma representação paramétrica das incógnitas com base em métodos de interpolação ou em funções de forma associadas a cada célula. É ainda definida uma formulação integral das equações a ser resolvidas em cada elemento do espaço discretizado.

É importante referir que, nos métodos de elementos finitos e diferenças finitas, as principais quantidades numéricas correspondem aos valores das funções locais obtidos para os pontos que constituem a malha de cálculo, enquanto no método dos volumes finitos as quantidades numéricas principais referem-se aos valores médios das células ou elementos da malha de cálculo.

Esquema numérico

O processo de definição de um esquema numérico é da maior importância para a obtenção de resultados fidedignos na resolução de um problema com recurso a modelação CFD. Para tal, torna-se necessário definir o método de discretização das equações. Para tal há que decidir entre a utilização de um método de diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos, bem como seleccionar o grau de precisão e eventualmente a discretização temporal a aplicar na resolução do problema. É ainda necessário analisar o algoritmo numérico seleccionado o

que implica a análise da qualidade do esquema em termos das propriedades de estabilidade e convergência do modelo, bem como, a análise dos erros gerados. Por fim, há que seleccionar um método de resolução do sistema de equações diferenciais no tempo, para o sistema algébrico de equações e para o tratamento iterativo de eventuais não-linearidades [Hirsch, 2007].

As equações que descrevem os fenómenos mais importantes dos meios contínuos são a conservação da massa, movimento e energia. No caso presente, importa resolver as equações de Navier-Stokes. A obtenção de uma solução numérica destas equações para o escoamento turbulento apresenta muitas dificuldades principalmente na forma/geometria da malha extremamente fina que é necessária para considerar a totalidade das escalas de comprimento, bem como na necessidade de elevada capacidade computacional e longo período de tempo necessários para a obtenção das soluções. Assim, as aplicações mais expeditas dos CFD para modelar o escoamento turbulento recorrem a modelos do tipo $k - \epsilon$.

Dependendo das equações seleccionadas são igualmente escolhidas as condições fronteira mais adequadas, paredes, escoamento de entrada e de saída (*inflow*, *outflow*) simetria, entre outras [Date, 2005]. No caso presente neste estudo em que se pretende resolver as equações de Navier-Stokes, existem quatro tipos de condição fronteira do tipo matemático: Condição fronteira de Dirichlet – definição específica do valor da variável na fronteira; Von Neuman – especificação do gradiente da variável na fronteira; combinação das duas condições anteriores; e Periódica – duas fronteiras opostas são conectadas e os seus valores são igualados quando o problema físico do escoamento pode ser considerado periódico no espaço.

Do ponto de vista numérico, existem dois tipos de condição fronteira; condições fronteira artificiais – existe uma fronteira apenas no modelo numérico; e condições fronteira físicas. Este último caso aplica-se, por exemplo, quando a superfície de um corpo está exposta a um fluido. Por exemplo, no caso de um fluido invíscido governado pelas equações de Navier-Stokes, é assumida uma velocidade relativa nula entre a superfície e o escoamento imediatamente acima desta, o que corresponde à denominada condição fronteira de “não escorregamento” (“*no-slip*”), e neste caso, $u = v = w = 0$ à superfície.

As condições iniciais determinam o estado do fluido no instante $t=0$ ou no primeiro passo do processo iterativo. É claro que quanto mais precisa (ou próxima da solução esperada) for a estimativa inicial mais depressa se chegará à solução final a obter para o problema. Assim, é importante que a solução inicial satisfaça pelo menos as equações que governam o escoamento a modelar e as relações termodinâmicas adicionais.

A convergência do esquema numérico depende das suas condições de estabilidade, e deste ponto de vista, um esquema numérico pode ser incondicionalmente estável, condicionalmente estável ou instável. O método mais aplicado para a análise de estabilidade de um esquema numérico refere-se ao denominado método de Von Neumann. Este método é baseado numa decomposição de Fourier dos erros da solução numérica, consistindo numa forma simples de distinguir o tipo de estabilidade de um esquema numérico [Hirsch, 2007].

Para que um esquema numérico seja estável, é necessário que se verifique a condição de Courant-Friedrich-Levy – CFL, a qual estabelece a relação entre a distância percorrida por uma onda num passo de tempo e o espaçamento da malha de cálculo (equação IV.6). É no entanto de referir, que a condição de CFL é necessária mas não suficiente para que se conclua que um dado esquema numérico é estável. Para tal é necessário aplicar igualmente o método de Von Neumann [Hirsch, 2007] [Date, 2005].

$$\sigma_{CFL} = \frac{a_w \Delta t}{\Delta x}; \quad (IV.6)$$

Onde a_w é a velocidade da onda, Δt é o intervalo de tempo e Δx a distância percorrida.

Malha de cálculo

Um dos aspectos mais importantes no sucesso da aplicação de modelos CFD é a construção da malha de cálculo. Deve ser seleccionado um método e uma estratégia para dividir o domínio do escoamento em células ou elementos, criando uma malha de cálculo. Existem diversas estratégias de construção da malha incluindo, estruturadas, não estruturadas, híbridas, compostas ou malhas sobrepostas.

Os tipos de malhas mais comuns e utilizadas pelos modelos CFD são as malhas estruturadas e não estruturadas.

A maioria dos métodos de cálculo para fluídos aerodinâmicos utiliza malhas de cálculo que consistem em quadriláteros para domínios 2D e hexaedros para domínios 3D. Este tipo de malhas são habitualmente referidas como malhas estruturadas uma vez que possuem um elevado grau de organização espacial. As malhas estruturadas são compostas por famílias de linhas que se intersectam, uma para cada dimensão do espaço (2 famílias de linhas em 2D, 3 famílias de linhas em 3D), onde cada ponto da malha está localizado na intersecção de uma linha, e apenas uma linha, de cada família. Este tipo de malhas pode ser considerado o mais adequado na resolução de problemas de escoamento nos algoritmos para obtenção de soluções em regime estacionário das equações para escoamentos invíscidos e de Navier-Stokes, tendo atingido nos últimos anos um grau elevado de maturidade. As malhas estruturadas podem ainda ser consideradas mais eficientes do ponto de vista dos CFD em termos de precisão e custos computacionais (menor tempo de simulação e exigência de menor capacidade de memória).

No entanto, em geometrias complexas a utilização de malhas estruturadas é de difícil concepção constituindo muitas vezes uma fonte de erro nos resultados pois não conseguem descrever de forma fidedigna o problema que se pretende resolver. Uma solução para este tipo de problemas é a divisão do domínio em várias regiões e a aplicação de malhas estruturadas a cada uma delas. Este processo, no entanto, apenas resolve parcialmente o problema pois a construção da malha torna-se de alguma forma não estruturada sendo uma tarefa complexa e morosa podendo originar problemas de convergência do modelo. Assim, este tipo de problemas conduziu ao desenvolvimento de malhas não estruturadas que são, habitualmente, facilmente geradas de forma automática.

As malhas não estruturadas são construídas de forma que a distribuição das células não possua qualquer ordem ou estrutura definida. Por exemplo, em problemas 2D pode preencher-se uma região com triângulos ou mistura de triângulos, quadriláteros ou qualquer outra forma das células. Estas malhas estão frequentemente associadas a métodos de elementos finitos que originalmente foram desenvolvidos para resolver regiões onde se torna difícil construir malhas totalmente estruturadas – geometrias muito complexas e de elevado pormenor. Este tipo de malhas aumenta significativamente o custo computacional de um problema.

Assim, pode dizer-se que em problemas de elevada complexidade geométrica a opção por malhas não estruturadas é uma solução que à primeira vista garante melhores resultados do que a malha estruturada por regiões.

De acordo com [Baker, 1992], a escolha do tipo de malha depende naturalmente do tipo e dimensão do problema a resolver. Para o cálculo de escoamentos aerodinâmicos, o desenvolvimento de algoritmos centra-se tradicionalmente em malhas estruturadas de quadriláteros e hexaedros dependendo da dimensão do problema.

Análise de resultados e representação gráfica

Esta é a última fase do processo de resolução do problema. Os resultados obtidos após a modelação necessitam de pós processamento para o cálculo de forças, grandezas, quantificação e avaliação de erros. Habitualmente, este processamento é efectuado com recurso a ferramentas informáticas gráficas incluídas nos modelos de simulação ou independentes dos mesmos.

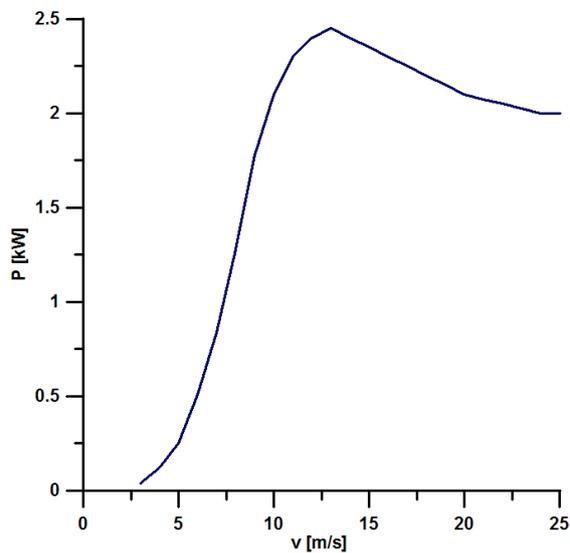
ANEXO V – CURVA DE POTÊNCIA DA TURBINA DE TESTE

Figura V.1 – curva de potência da turbina de teste utilizada neste trabalho

Tabela V.1 – Curva de potência da turbina de teste (2.4kW)

v [m/s]	P [kW]
3	0.040
4	0.120
5	0.250
6	0.510
7	0.840
8	1.280
9	1.780
10	2.100
11	2.300
12	2.400
13	2.450
14	2.400
15	2.350
16	2.300
17	2.250
18	2.200
19	2.150
20	2.100
21	2.075
22	2.050
23	2.025
24	2.000
25	1.800