

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Micro-turbinas instaladas em ambiente urbano,
para aplicações de microgeração:
desenvolvimento de uma metodologia para identificação e
caracterização do potencial eólico

Ana Raquel Paulino de Aragão Teixeira

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

2010

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Micro-turbinas instaladas em ambiente urbano,
para aplicações de microgeração:
desenvolvimento de uma metodologia para identificação e
caracterização do potencial eólico

Ana Raquel Paulino de Aragão Teixeira

Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Trabalho realizado sob a supervisão de
Prof.^ª Dr.^ª Ana Estanqueiro (LNEG)
Prof. Dr. Jorge Maia Alves (FCUL)

2010

Agradecimentos

Ao LNEG, pela disponibilidade de espaços e pelo acesso à bibliografia existente nas suas bibliotecas. .

Aos meus orientadores: Doutora Ana Estanqueiro pela partilha de conhecimentos científicos e apoio na orientação deste trabalho, e ao Doutor Professor Jorge Maia Alves pela sempre simpática disponibilidade.

À Doutora Conceição Proença, do Laboratório de Apoio às Actividades Aeroespaciais do INETI, pela partilha de conhecimentos.

À Teresa Simões e ao Paulo Costa, pela sua disponibilidade, paciência e boa-disposição, na ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos colegas do grupo de Eólica e Oceanos do Departamento de Energias Renováveis do INETI, pelo apoio prestado e convívio que permitiu a criação de um ambiente favorável para a realização deste trabalho, durante os poucos meses de partilha de espaço.

Aos meus colegas de curso da Faculdade de Ciências, pela amizade que permanece e pelo apoio ao longo do mestrado.

À minha família, por todo o seu apoio e paciência em especial ao meu irmão, João.

Aos meus amigos de sempre, pelos momentos de distração e convívio e pela sua “presença” sempre constante.

Ao Rui, pela paciência, pelas palavras sempre positivas, pelas semanas de ausência e pela amizade.

Resumo

Compensará o investimento? Será fiável? Qual o investimento inicial? Qual o tempo de retorno do investimento? Estas são algumas das questões iniciais que preocupam quem pretende investir num sistema descentralizado de geração de energia e que devem ser esclarecidas da melhor forma, para que se torne possível uma mudança do cenário energético centralizado existente nos dias de hoje. A colocação de uma micro-turbina eólica num edifício urbano poderá não ser à partida a opção preferencial, quando se pretende investir num sistema de microgeração. Será mais fácil assegurar o projecto, se houver possibilidades de garantir ao produtor que o local, onde este pretende instalar o sistema, dispõe de potencial eólico suficiente para permitir um retorno seguro do investimento, uma redução nas emissões de CO₂ e, conseqüentemente, um futuro mais sustentável. Assim, neste trabalho, pretendeu-se desenvolver uma metodologia simples e expedita, que permitisse estimar o potencial eólico de uma micro-turbina, quando instalada em ambiente urbano. A metodologia teve por base uma fotografia panorâmica do local de implantação, que após processamento digital e posterior aplicação de um programa de cálculo, permitiu obter percentagens de obstrução do escoamento atmosférico ao ponto de interesse. Seguidamente, calculou-se o fluxo de potência incidente da velocidade do vento, após a contabilização das percentagens de obstrução, por forma a estudar a viabilidade energética de um sistema eólico. A aplicação da metodologia efectuou-se com recurso a dois casos de estudo, considerando como pontos de interesse para a instalação de uma micro-turbina o terraço no topo de um edifício de dois pisos, localizado no centro de Faro, no sul de Portugal, e o terraço no topo de um edifício de cinco pisos localizado mesma cidade. Concluiu-se que, embora com incertezas não desprezáveis associadas, a metodologia desenvolvida poderá constituir um ponto de partida para a obtenção de uma estimativa do potencial eólico em ambiente urbano com especial foco no estudo das obstruções e, assim permitir que a energia eólica penetre no mercado da microgeração de forma mais fiável.

Palavras-chave: microgeração, energia eólica, metodologia, ambiente urbano

Abstract

Will the return of the investment be favourable? Will it be reliable? How much will it cost? How long is the payback? These are some of the issues that concern those who want to invest in a decentralized system for power generation and should be clarified as well as possible, so there can be a change in the existing centralized energy scenario of today. To place a micro-wind turbine on the top of a building in an urban environment may not be the first choice. With the objective of helping those who pretend to invest in micro wind energy systems in urbanised areas, this work presents a simple methodology to estimate the wind potential of a certain site, in order to install a small wind turbine in an urban environment. This methodology is based on the use of a panoramic photography, which is processed with a scientific calculation program to obtain percentages of obstruction on the wind flow. After that, the wind power is calculated to assess the project availability. The methodology was then applied to two case study, where the first site is located in the top of a terrace of two-storey building, in the centre of the city of Faro, in the south of Portugal and the second site is located in the same city, in a five-storey building. It was concluded that, although with non-negligible uncertainties, the methodology developed could be a starting point to obtain objective estimates of the wind resource in urban areas and, thus enable a larger penetration of wind power from microgeneration market.

Keywords: microgeneration, wind energy, methodology, urban environment

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO DA DISSERTAÇÃO	4
2.1. A UNIÃO EUROPEIA E A NOVA VISÃO ENERGÉTICA	4
2.2. OBJECTIVOS DO TRABALHO	6
3. PRODUÇÃO DE ENERGIA DESCENTRALIZADA	9
3.1. O PARADIGMA DA ENERGIA DESCENTRALIZADA	9
3.2. VULNERABILIDADE DOS SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ENERGIA	11
3.3. MICROGERAÇÃO APLICADA À DESCENTRALIZAÇÃO DA ENERGIA	13
4. O RECURSO EÓLICO	17
4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO RECURSO EÓLICO	17
4.2. TURBULÊNCIA	20
4.2.1. A CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA	22
4.2.2. EFEITOS CONDICIONANTES AO RECURSO EÓLICO	27
4.2.3. DIFUSÃO DA TURBULÊNCIA PERTO DE EDIFÍCIOS	29
5. APROVEITAMENTO DO RECURSO EÓLICO EM AMBIENTE URBANO	32
5.1. APROVEITAMENTO DE RECURSO ENERGÉTICO DO VENTO ATRAVÉS DE MICRO-TURBINAS EÓLICAS	32
5.2. A ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE URBANO	35
6. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO	41
6.1. PRESSUPOSTOS E OBJECTIVOS DA METODOLOGIA A DESENVOLVER	43
6.2. MODELOS COMPUTACIONAIS A UTILIZAR	45
6.3. ANÁLISE DA ENVOLVENTE	47
6.4. ANÁLISE DA OBSTRUÇÃO	48
7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA EM AMBIENTE URBANO	50
7.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS PARA ANÁLISE DOS CASOS DE ESTUDO	50
7.2. CASO DE ESTUDO 1: EDIFÍCIO HABITACIONAL COM 2 PISOS	51
7.2.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	51
7.2.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	52
7.3. CASO DE ESTUDO 2: EDIFÍCIO DE SERVIÇOS COM 5 PISOS	54
7.3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	54
7.3.2. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	55
7.4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	56
8. CONCLUSÕES	64
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
10. BIBLIOGRAFIA	68

Índice de Figuras

Fig. 1 – “Mix” energético, na Europa – 27, em 2006 (consumo interno bruto em percentagem)	4
Fig. 2 – Esquema ilustrativo dos dois conceitos de sistema energético.....	9
Fig. 3 – Evolução da tarifa bonificada por cada 10 MW instalados	15
Fig. 4 – Forças actuantes numa partícula de ar.....	17
Fig. 5 – Esquema ilustrativo da origem do vento geostrófico	19
Fig. 6 – Vento de gradiente, designado por Ugr.....	19
Fig. 7 – Esquema ilustrativo das forças actuantes que têm origem nos ventos geostrófico e gradiente	20
Fig. 8 – Esquema ilustrativo da relação entre a rugosidade e o perfil vertical da velocidade do vento.....	23
Fig. 9 – Esquema ilustrativo dos perfis térmico e do nível de inversão.....	24
Fig. 10 – Esquema ilustrativo das camadas identificadas na Troposfera	25
Fig. 11 – Condicionantes para determinação de terreno plano	28
Fig. 12 – Ilustração do escoamento sobre um obstáculo, por exemplo um edifício	28
Fig. 13 – Efeitos na velocidade do vento, potencial eólico e turbulência a jusante de um edifício.....	29
Fig. 14 – Esquema ilustrativo da turbulência introduzida pelo edifício, orientado perpendicularmente e orientado a 45°	31
Fig. 15 – Exemplos de micro-turbinas eólicas.....	32
Fig. 16 – Turbinas de eixo horizontal com orientação do rotor, a upwind e a downwind	33
Fig. 17 – Escoamento do vento em torno de um edifício	36
Fig. 18 – Esquema ilustrativo de uma micro-turbina no topo de um edifício urbano	36
Fig. 19 – Simulação da velocidade do vento (m/s): (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista de cima	37
Fig. 20 – Simulação da turbulência (m ² /s ²): (a) vista frontal; (b) vista de cima.....	38
Fig. 21– Perfil típico da velocidade do vento em função da altura acima do solo, com a energia gerada pelo vento em cada unidade de área	39
Fig. 22 – Comparação da disponibilidade de recurso eólico entre um edifício isolado ou um edifício localizado em ambiente urbano	42
Fig 23 – Fluxograma da metodologia desenvolvida.....	44
Fig. 24 – Processamento da imagem panorâmica pelo algoritmo MATLAB.....	48
Fig. 25 – Análise da envolvente da localização Faro1	52
Fig. 26 – Imagem panorâmica (Faro1) montada a partir de diversas imagens digitais.	52
Fig. 27 – Imagem panorâmica recortada, para Faro1.....	53
Fig. 28 – Imagem panorâmica, de Faro1, após pré-tratamento no programa Microsoft Paint.....	53
Fig. 29 – Output da 1ª fase da metodologia.....	53
Fig. 30 – Identificação do Norte Geográfico, no Faro1	53
Fig. 31– Rosa-de-obstrução obtida pela metodologia, para Faro1.....	54
Fig. 32 – Análise da envolvente da localização Faro2.....	54
Fig 33 - Imagem panorâmica de Faro2 montada a partir de diversas imagens digitais.....	55
Fig. 34 – Imagem panorâmica recortada, para Faro2.....	55
Fig. 35 – Imagem panorâmica processada, para Faro2.....	55
Fig. 36 – Output da 1ª fase da metodologia, para Faro2	55
Fig. 37 – Identificação do Norte Geográfico, para Faro2.....	55
Fig. 38– Rosa-de-obstrução obtida pela metodologia, para Faro2.....	56
Fig. 39 – Rosa-dos-ventos obtida pelo modelo WAsP	57
Fig. 40 – Rosa-dos-ventos obtida pelo WAsP	57
Fig. 41– Densidade de probabilidade de Weibull (k=1,97 e A= 6,5m/s)	58
Fig. 42– Potência disponível para as três situações em análise.....	60
Fig. 43– Potência eléctrica produzida por velocidade média do vento, para a T.Urban.....	61
Fig. 44– Distribuição da energia produzida por velocidade média do vento, para as três situações	61

Índice de Tabelas

<i>Tabela 1 – Contribuição das energias renováveis para a electricidade gerada na UE</i>	6
<i>Tabela 2 – Dados estatísticos referentes à tarifa bonificada de 0,65€</i>	16
<i>Tabela 3 – Coeficientes de atrito do solo, para vários tipos de superfície</i>	26
<i>Tabela 4 – Identificação dos sectores correspondentes a cada intervalo de pixéis definidos para a imagem panorâmica</i>	49
<i>Tabela 5 – Características da micro-turbina eólica T.Urban</i>	51
<i>Tabela 6 – Valores percentuais de obstrução por sector, para Faro1</i>	53
<i>Tabela 7 – Valores percentuais de obstrução por sector, para Faro2</i>	56
<i>Tabela 8 – Valores médios obtidos através do WASP</i>	56
<i>Tabela 9 – Fluxo de potência incidente, em W/m^2, com e sem obstrução, para Faro1</i>	59
<i>Tabela 10 – Fluxo de potência incidente, em W/m^2, com e sem obstrução, para Faro2</i>	59

1. Introdução

Actualmente a União Europeia (UE), assumiu ambiciosos desafios no sector energético. Desafios esses que resultam de uma recente visão europeia que se baseia essencialmente na crescente preocupação com as alterações climáticas e ainda com a segurança de abastecimento energético e a dependência energética externa que caracteriza a Europa. O aumento da eficiência energética é outra das preocupações associadas a esta nova visão pois a Europa continua a desperdiçar uma elevada percentagem da sua energia através de uma mera ineficiência energética. É urgente uma mudança de paradigma no modo como as sociedades se comportam, para que a população da UE consuma menos energia e de forma mais eficiente, mas sem que isso prejudique os padrões de qualidade de vida a que as sociedades europeias se acostumaram nas últimas décadas.

A produção de energia descentralizada é encarada pela UE como um dos caminhos a seguir pois permite que a produção energética ocorra mais próxima do local de consumo, otimizando a gestão e reduzindo as perdas energéticas que ocorrem durante o transporte da energia nas redes de transmissão e, sobretudo, de distribuição.

Uma das vertentes da produção de energia descentralizada é a microgeração, a qual se define como uma produção de electricidade em pequena escala, efectuada normalmente em instalações domésticas e, na maioria dos casos a partir de fontes renováveis, como o sol e o vento, e que, regra geral, é consumida no mesmo local onde é produzida.

Actualmente em Portugal, assim como na UE, pretende-se diminuir a dependência energética dos combustíveis fósseis incentivando cada vez mais o uso das energias renováveis. Para incentivar e regulamentar o mercado da microgeração surgiu o Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro, o qual veio estabelecer o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência, designadas por unidades de microgeração. Segundo o dito regulamento “podem ser produtores de electricidade por intermédio de unidades de microprodução todas as entidades que disponham de um contrato de compra de electricidade em baixa tensão”. Neste contexto, os microprodutores passam a dispor de dois regimes remuneratórios, o regime geral e o regime bonificado. No regime geral o limite de potência instalada é 5,75 kW e a tarifa de venda de electricidade produzida iguala o custo da energia de consumo. O regime bonificado possibilita a venda da energia eléctrica produzida pelos consumidores, através de algumas fontes renováveis, à rede eléctrica nacional com uma tarifa consideravelmente superior à tarifa de compra. Neste caso, os microprodutores não podem injectar na rede uma potência superior a 50% da potência contratada e as unidades de microprodução poderão atingir uma potência de ligação de 3,68 kW.

É de referir que a microgeração apresenta ainda vantagens significativas, quando implementada em sistemas autónomos, já que permite o fornecimento de electricidade a instalações isoladas da rede eléctrica, como por exemplo, casas de campo ou férias, aldeias afastadas e zonas subdesenvolvidas ou em via de desenvolvimento. Estas aplicações, nos casos mais simples traduzem-se por sistemas de bombagem (i.e. abastecimento de água e regas), iluminação de rua ou sinalização rodoviária.

A microgeração é considerada positiva nos vários sectores prioritários no contexto do desenvolvimento sustentável, como é o caso da economia, do ambiente e da energia. A nível do sector energético, o recurso à microgeração permitirá uma redução das perdas existentes na rede de distribuição eléctrica, uma contribuição para o aumento da fiabilidade do fornecimento de electricidade aos consumidores, assim como para a diminuição da forte dependência energética que se verifica em Portugal, contribuindo, deste modo, também para o equilíbrio da balança de pagamentos (exportações/importações) no qual o sector energético tem uma pesada contribuição negativa.

No que respeita ao reforço na infra-estrutura da rede eléctrica, a disseminação da utilização de unidades de microgeração poderá adiar a instalação de novas linhas de transmissão, já que diminui o fluxo de potência das grandes centrais produtoras para os consumidores domésticos. Do ponto de vista económico poder-se-á afirmar que a microgeração criará oportunidades para a indústria portuguesa de desenvolvimento de equipamentos e componentes para o sector eléctrico/renovável possibilitando um novo *cluster* industrial e de serviços com impacto importante na criação de emprego e no crescimento económico.

Poderá ainda contribuir para possibilitar uma maior autonomia e poder de decisão aos consumidores individuais e às comunidades locais. Uma melhoria do desempenho ambiental do sistema energético no seu todo não poderá ficar esquecida, assim como o estímulo à utilização das energias renováveis.

As soluções de microgeração passam, normalmente, pela aplicação de duas tecnologias de origem renovável mais desenvolvidas, a fotovoltaica e eólica, as quais podem ser instaladas em conjunto ou separadamente. A energia fotovoltaica tem sido a opção mais procurada, não só pelo facto do recurso solar estar associado a uma menor variabilidade, quer espacial quer temporal, mas também porque o seu “rendimento energético” se torna mais fácil de estimar localmente. Contudo, a implementação destas tecnologias carece de optimização para que, de futuro, se possam obter estimativas mais precisas e economicamente viáveis da produção energética de uma instalação de microgeração, sobretudo na vertente eólica e em ambiente urbano.

Ao recurso eólico está associada uma grande variabilidade espacial e temporal, sendo que, o potencial eólico depende de diversos parâmetros, tais como a velocidade e direcção do vento, a orografia do local, a rugosidade e os obstáculos ao escoamento atmosférico: edifícios, árvores, depósitos de água, entre outros. Estes são parâmetros que diferem bastante de local para local, sendo que, em ambiente urbano, o recurso eólico é, normalmente, mais reduzido que em zonas não construídas.

Numa área urbanizada, o potencial eólico é fortemente influenciado pelos obstáculos, que influenciam o escoamento atmosférico junto do solo, dado que estes são normalmente numerosos e se apresentam densamente distribuídos. Os mesmos têm uma influência significativa na diminuição da velocidade do vento e são fontes de turbulência na sua vizinhança.

Acresce às razões anteriormente apresentadas, o facto de ser economicamente insustentável a caracterização experimental do potencial eólico no local de instalação de uma micro-turbina eólica, à imagem do que se faz para unidades eólicas de grande dimensão, já que uma campanha experimental com a duração de um ano custaria praticamente o dobro da turbina eólica a instalar e, conseqüentemente, o recurso a tal método inviabilizaria qualquer tentativa de incentivo a esse mercado. Assim, a caracterização do potencial eólico em ambiente urbano associada à microgeração constitui ainda um desafio, o qual depois de ultrapassado poderá contribuir, juntamente com a energia fotovoltaica, para a existência de áreas urbanas energeticamente sustentáveis e para uma descentralização da produção de electricidade.

Em face do exposto, pode finalizar-se justificando que existe um potencial de larga escala para a produção descentralizada de energia no nosso país, acrescido do facto de Portugal ser um país com elevada disponibilidade de radiação solar e/ou vento, dependendo do local, importando, por isso desenvolver metodologias simples e expeditas que permitam assegurar a eficiência dos sistemas e o retorno dos investimentos efectuados.

2. Enquadramento da dissertação

2.1. A União Europeia e a nova visão energética

De acordo com dados estatísticos do Eurostat, que remetem ao ano de 2006, o consumo interno bruto na UE-27, foi 1 825 Mtoe¹ enquanto que o consumo final de energia total, excluindo os consumos para a conversão energética, foi 1 176 Mtoe. Pela Figura 1, pode-se constatar que o petróleo é a matéria-prima mais consumida de todos os combustíveis de origem fóssil. Contudo, em comparação com a década de 90, e segundo a mesma fonte bibliográfica a percentagem de petróleo no consumo interno bruto decresceu ligeiramente, cerca de um ponto percentual, para os 37%. Durante o mesmo período, quer o gás natural como a energia nuclear, aumentaram seis e dois pontos percentuais atingindo os 24% e 14%, respectivamente. Os combustíveis fósseis sólidos sofreram uma descida significativa, cerca de dez pontos percentuais enquanto que as energias renováveis, no mesmo período de tempo, aumentaram quase três pontos percentuais [CE, 2008].

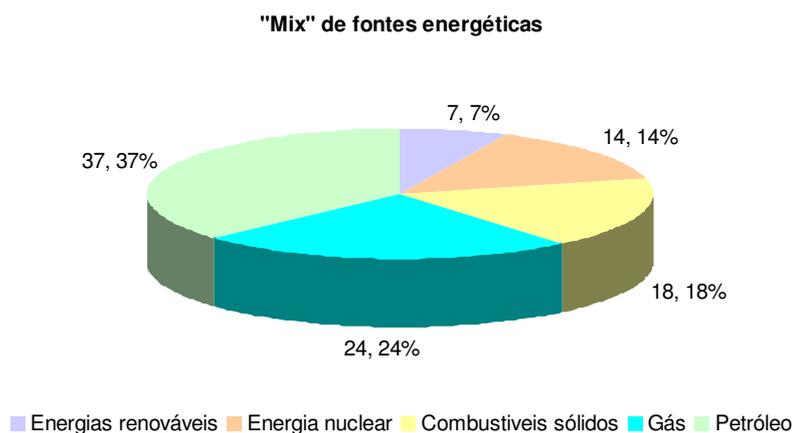


Fig. 1 – “Mix” energético, na Europa – 27, em 2006 (consumo interno bruto em percentagem) [Fonte: adaptado de Eurostat *in* CE, 2008]

Metade do aumento verificado nas energias renováveis atingiu-se no período compreendido entre 2000-2006, reflectindo a eficácia das políticas da UE que tinham como objectivo a redução das emissões de CO₂ e da dependência energética externa [CE, 2008].

Relativamente à dependência energética, a UE-27 permanece dependente da importação de combustíveis fósseis. Em 2006, a importação de petróleo atingiu os 83% do consumo interno bruto, enquanto que de gás natural atingiu os 55% [EUROSTAT, 2009].

¹ toe = *tonnes of oil equivalent*. Em português designa-se por “tep” que significa tonelada equivalente de petróleo. A conversão para outras unidades de energia é: 1 toe = 41868 J = 11,63 MWh.

A Polónia e o Reino Unido têm uma dependência de importação de energia relativamente baixa (perto dos 20%). No outro extremo situam-se países como a Irlanda, Itália, Portugal e Espanha que têm uma razão de importação energética que excede os 80% [CE, 2008].

Não obstante, este aumento permanece ainda longe daquilo a que a União Europeia se propôs. Assumiu-se um novo e ambicioso compromisso, com o objectivo de combater as alterações climáticas, segundo o qual a UE compromete-se, até 2020, a uma redução de 20% nas emissões de dióxido de carbono, um aumento em 20% de penetração renovável no “mix” energético europeu e a melhorar a eficiência energética também em 20%.

Segundo o “Livro Verde – Estratégia europeia para uma energia sustentável, competitiva e segura” [2006], a Europa entrou numa nova era energética. A dependência das importações está a aumentar e caso não se torne competitiva a produção interna de energia, prevê-se que nos próximos 20 a 30 anos, 70% das necessidades energéticas da UE sejam cobertas por produtos importados. Os preços do petróleo e do gás estão a aumentar e é expectável que os preços da electricidade acompanhem esta tendência. Assim sendo, com o aumento da procura global de combustíveis fósseis, cadeias de abastecimento alongadas e uma maior dependência das importações, os preços elevados do petróleo e do gás continuarão a ser uma realidade bem presente nas sociedades de hoje.

No futuro, espera-se um aumento das necessidades energéticas mundiais. Necessidades que continuarão a depender grandemente dos combustíveis fósseis e conseqüentemente ter-se-á um aumento das emissões de gases com efeito de estufa, agravando a actual questão das alterações climáticas. É urgente encarar uma mudança nas sociedades de hoje em prol de um desenvolvimento sustentável, tendo por base uma perspectiva económica, social e ambiental.

Há ainda, que não esquecer que os recursos fósseis têm uma disponibilidade limitada, agravada pelo facto de grande parte das suas reservas se situarem em zonas politicamente instáveis, e conseqüentemente o seu fornecimento está vulnerável a flutuações de preço ou a dificuldades logísticas ou políticas. Reforça-se, assim o papel importante que a diminuição da dependência energética externa e a diversificação das fontes de abastecimento de energia assumem no contexto económico actual. É neste contexto, que as energias renováveis surgem, pois constituem um forte contributo para a diversificação do “mix” energético e das fontes de energias a que a UE poderá recorrer. As energias renováveis têm também um elevado potencial para impulsionar a competitividade industrial europeia e espera-se que o impulsionar de investimentos nas energias renováveis ajude ao desenvolvimento da economia da UE.

As energias renováveis, quando aplicadas à electricidade, já contribuem em grande parte para as necessidades mundiais de electricidade por todo o globo, sendo a energia hídrica aquela com maior produção eléctrica, seguida da energia eólica [CE, 2007].

Tabela 1 – Contribuição das energias renováveis para a electricidade gerada na UE
[Fonte: Eurostat, 2009]

Energia	Electricidade (TWh)
Eólica	70,5
Solar Fotovoltaico	1,5
Biomassa	80,0
Hídrica	306,9
Geotérmica	5,4
Total de fontes de energias renováveis	464,4
Total de electricidade gerada na UE-27	3309

À semelhança de outros países europeus, Portugal tem investido grandemente no mercado das energias renováveis, em busca de um futuro mais sustentável quer energética quer ambientalmente, assumindo-se actualmente como um país na liderança das energias renováveis. Para além das grandes iniciativas associadas à construção de parques eólicos e centrais fotovoltaicas, a microgeração tem sido outra das fortes apostas de Portugal.

2.2. Objectivos do trabalho

Actualmente, em Portugal, a microgeração em ambiente urbano e construído é uma aposta com resultados já visíveis. No entanto, os mesmos devem-se essencialmente à energia solar fotovoltaica já que este é um mercado onde a energia eólica tem sentido dificuldades acrescidas em penetrar, por razões de ordem diversa, entre elas a reduzida garantia de recuperação dos investimentos por via da reduzida e deficiente caracterização do recurso eólico em ambiente urbano, adaptado a unidades de microgeração.

A penetração da energia eólica na microgeração é de grande interesse dado que esta é uma tecnologia que se apresenta relativamente madura e também porque, nos últimos anos, o número de parques eólicos *on-shore* aumentou o que, acrescido do facto de Portugal ser um país de pequenas dimensões, contribuirá, num futuro próximo, para uma possível limitação na disponibilidade de locais para implantação de novos projectos de aproveitamento de energia eólica.

Assim existe um grande potencial para o desenvolvimento de sistemas de microgeração eólica em zonas urbanas uma vez que já existe, nos dias de hoje, uma larga variedade de oferta tecnológica.

É de referir que os sistemas híbridos de energia solar com energia eólica se tornam muito interessantes pois, em períodos de nenhuma ou pouca produção solar, como por exemplo no período nocturno, poder-

se-á explorar o potencial eólico tornando assim o sistema mais eficiente. É importante, por isso, desenvolver ferramentas que permitam prever qual a viabilidade, quer de produção energética quer económica, da instalação de uma micro-turbina eólica em zonas urbanas, dado que o vento é fortemente influenciado pelos elementos urbanos.

À semelhança do que hoje existe quer para a energia solar térmica com o programa SolTerm¹ e quer para a energia fotovoltaica com o programa PVSYST², pretendem-se ferramentas que permitam, na fase de projecto, prever qual o potencial energético de produção por uma determinada instalação eólica, num local devidamente geo-referenciado, podendo desse modo calcular os indicadores económico-financeiros da instalação e pedir o auxílio de entidades de apoio ao financiamento. Só assim se poderá diminuir os riscos de instalação de micro-turbinas em locais com potencial eólico reduzido e, consequentemente, pouca produção energética, bem como otimizar a penetração eólica no mercado da microgeração.

Uma avaliação energética ao escoamento do vento deverá ter uma duração nunca inferior a um ano, de forma a que seja possível medir a velocidade do vento de um determinado local. Em ambiente urbano, para aplicações de microgeração, uma avaliação energética com esta duração torna-se inviável do ponto de vista económico, quer pelo custo associado à medição em si quer pelo investimento da microgeração que é adiado. Como tal, a existência de modelos ou metodologias que permitam a determinação do potencial eólico em ambiente urbano torna-se fulcral para que a energia eólica penetre no mercado da microgeração.

A motivação para este trabalho surgiu, pois actualmente, não se conhece ainda nenhum modelo para a determinação do potencial eólico em ambiente urbano, de utilização simples e rápida para o utilizador comum e que analise directamente no local a obstrução existente ao escoamento atmosférico.

A previsão da viabilidade da instalação de uma micro-turbina em ambiente urbano, tem sido objecto de estudo por diversos projectos de investigação. No Brasil, Alé *et al* [s.d.], estudaram a viabilidade da instalação de uma micro-turbina eólica, ligada à rede de energia eléctrica, num edifício pertencente à malha urbana de Porto Alegre. O estudo foi realizado através de uma campanha experimental com a duração de um ano, na qual foram recolhidos dados sobre a velocidade e direcção do vento tendo sido posteriormente utilizado o modelo WAsP, com uma representação tridimensional da área onde se pretendia localizar a turbina. Os investigadores concluíram que a utilização do WAsP permitiu obter resultados satisfatórios. Também no Reino Unido, o Centro de Energia Sustentável, pretendeu estudar os factores indispensáveis ao planeamento, instalação e operação de sistemas energéticos com micro-

¹ SolTerm – Análise de Desempenho de Sistemas Solares Térmicos e Fotovoltáicos - http://www.ineti.pt/projectos/projectos_frameset.aspx?id=13812

² PVSYST – Software para sistemas fotovoltaicos - <http://www.pvsyst.com/5.0/index.php>

turbinas eólicas, com vista a desenvolver uma metodologia para maximizar o potencial do potencial eólico urbano [CSE, 2003]. Neste caso utilizou-se o modelo WAsP, com a respectiva informação sobre rugosidade, onde a classe de rugosidade escolhida foi a correspondente a uma superfície urbana.

Bahaj *et al* [2007], desenvolveram uma ferramenta de modelação, de nome “ μ -Wind” com o objectivo específico de estudar a viabilidade económica de projectos de instalação de micro-turbinas eólicas. Esta ferramenta possui quatro módulos, o recurso eólico, a performance da turbina, as necessidades energéticas e por último, o módulo económico e de análise da redução do dióxido de carbono emitido. O recurso eólico nesta ferramenta é analisado com base em dados de medições da velocidade do vento e da sua direcção efectuadas em estações meteorológicas localizadas no Reino Unido. Posteriormente os dados referentes à velocidade do vento são corrigidos em função da rugosidade do terreno e da altura da micro-turbina eólica acima do nível do solo, segundo a Lei de Prandtl.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objectivo o desenvolvimento de uma metodologia expedita que permita estimar, numa fase de projecto, o potencial eólico e a produção energética de uma micro-turbina instalada em ambiente urbano. A metodologia pretende-se que seja acessível e de uso simples, de forma a que possa ser utilizada por qualquer potencial microprodutor que pretenda instalar um sistema de microgeração eólica.

3. Produção de energia descentralizada

3.1. O Paradigma da Energia Descentralizada

Os sistemas eléctricos, tal como hoje se conhecem, baseiam-se numa lógica de centralização, consistindo em redes de transporte e distribuição de energia de grande escala. As grandes centrais eléctricas normalmente situam-se longe dos núcleos urbanos, sendo que a energia produzida é posteriormente conduzida pelas linhas de transmissão, em alta e média tensão, e por fim segue pelas linhas de distribuição até ao consumidor final. Neste conceito de distribuição eléctrica, a gestão entre a produção e a garantia da satisfação das necessidades eléctricas realiza-se através da análise das variações do diagrama de cargas¹.

Contudo na última década, com os avanços da tecnologia, na área da produção eléctrica, e devido à mudança económica da energia e questões ambientais, cresceu o interesse pela produção descentralizada. Na Figura 2, pode-se observar um esquema ilustrativo dos dois conceitos de sistema energético, centralizado e descentralizado.

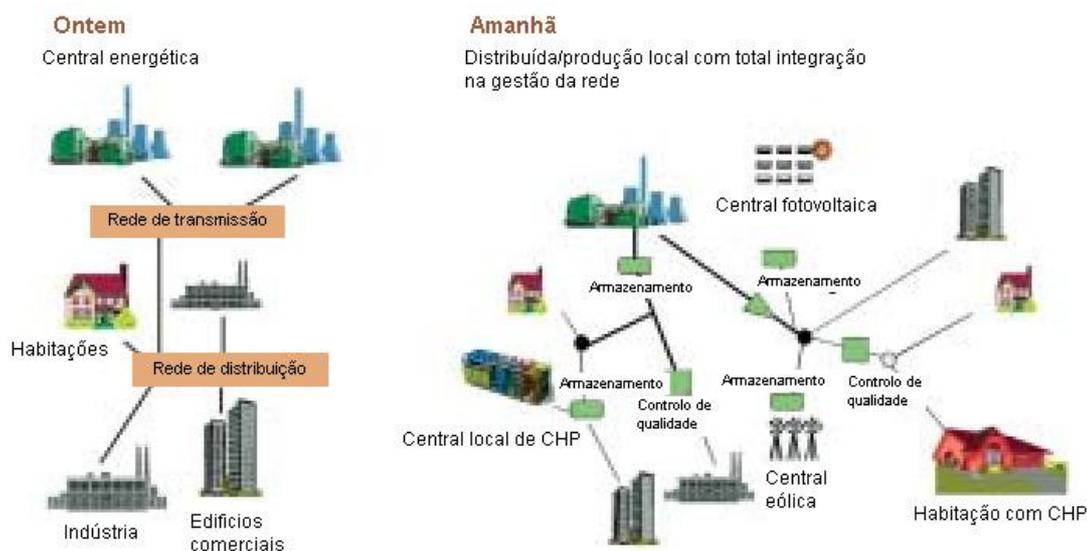


Fig. 2 – Esquema ilustrativo dos dois conceitos de sistema energético
[Fonte: adaptado de CE, 2003]

Segundo a *World Alliance for Decentralized Energy – WADE* [2007], a produção de energia descentralizada define-se como a produção de electricidade no ponto de consumo, ou perto dele, independentemente da dimensão, tecnologia ou recursos utilizados, quer seja em sistema isolado ou ligado à rede eléctrica. Os sistemas de produção descentralizada, segundo esta definição, incluem

¹ Cargas definem-se como consumidores que carecem de energia eléctrica.

sistemas com base em energias renováveis, sistemas de co-geração de alta eficiência (*Combined Heat and Power – CHP*) ou até mesmo, a reutilização da energia industrial.

Actualmente um dos principais inconvenientes das centrais de produção eléctrica centralizadas, é o facto de existirem lacunas relativas à percepção de quando uma central é necessária e em que local essa mesma central deve ser instalada para fornecer e entregar energia. Em muitos casos o planeamento, *design*, construção e licenciamento de uma grande central a carvão, nuclear ou hídrica podem demorar largos anos. No caso de energia descentralizada uma pequena central pode ser construída e iniciar o seu funcionamento em alguns meses, representando por isso um risco de investimento menor. O fenómeno NIMBY (*Not in my backyard*) é também um problema recorrente aquando da instalação de uma grande central eléctrica, podendo gerar conflitos, por vezes de difícil resolução.

Nessa perspectiva, a produção de energia descentralizada apresenta-se como mais vantajosa em termos de receptividade por parte da sociedade. Existe cada vez mais, um cuidado estético quer na integração arquitectónica da energia fotovoltaica e/ou energia eólica, quer no desenvolvimento e *design* tecnológico, por exemplo das micro-turbinas.

Os painéis solares instalados em habitações, um agricultor que utiliza os resíduos dos seus animais para gerar electricidade em pequenos digestores, um hospital que utiliza uma turbina a gás para electricidade e recicla a sua energia térmica residual para aquecer água dos chuveiros, são exemplos de produção descentralizada de energia já visível nos dias de hoje.

Comparativamente aos tradicionais sistemas centralizados que consistem nas grandes centrais fora dos núcleos urbanos, a energia descentralizada apresenta menos vulnerabilidade a perturbações da rede de distribuição, menos perdas resultantes do transporte de energia ao longo das linhas de transmissão e uma maior independência dos combustíveis fósseis com conseqüente redução de emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente. Os sistemas descentralizados começam, assim, a emergir como uma alternativa com a vantagem de serem sistemas, muitas vezes, assentes nas energias renováveis ou em tecnologias de alta eficiência, como é o exemplo de sistemas combinados de calor/electricidade.

Os benefícios da energia descentralizada são inúmeros, sendo cada vez mais procurada por ser uma “tecnologia” que oferece benefícios económicos, através da redução dos investimentos capitais, aumento da eficiência do consumo de combustíveis, redução significativa da poluição incluindo de alguns gases com efeito de estufa e contaminantes atmosféricos, aumento da fiabilidade energética, custos de manutenção da rede reduzidos e representa muitas vezes a opção mais económica para permitir o acesso à electricidade a povoações sem acesso à rede de distribuição eléctrica. Contudo, o factor mais relevante é

que a energia descentralizada pode aumentar as perspectivas de segurança energética, quer em termos de redução.

Os benefícios da produção de energia descentralizada têm sido documentados em vários estudos académicos e industriais, por todo o mundo. Estudos recentes da Universidade Carnegie Mellon [King, 2006 e Zerriffi, 2004], nos Estados Unidos da América (EUA), concluíram que à medida que os níveis de instabilidade de uma rede (tais como falhas de manutenção ou incidentes de sabotagem) aumentam, os sistemas distribuídos demonstram-se menos vulneráveis do que os sistemas centralizados. As razões identificadas baseiam-se no facto de que, ao utilizar um sistema descentralizado, a necessidade de margens de reserva que uma central energética pode requerer poderá vir a ser praticamente eliminada sem uma redução da quantidade de energia entregue, e por essa razão a fiabilidade dos sistemas descentralizados é geralmente superior. Os custos representam outra das vantagens identificadas da produção eléctrica descentralizada no estudo.

De acordo com Bouffard e Kirschen [2008], a produção de energia descentralizada será um passo importante no futuro, contudo dever-se-á investir sempre num sistema combinado com a energia centralizada, o que permitirá usufruir das vantagens de ambos os sistemas. Para além disso, o mais importante deverá ser uma infra-estrutura energética flexível com possibilidade de adaptação e que seja fiável, podendo assim contribuir para uma evolução tecnológica mais sustentável. Também Karger e Hennings [2009] após estudarem a produção descentralizada de energia, com base numa metodologia de avaliação de sustentabilidade, concluíram que a produção energética dever-se-á basear numa combinação de sistemas centralizados com sistemas descentralizados.

3.2. Vulnerabilidade dos sistemas de abastecimento de energia

A segurança do fornecimento de energia pode ser enquadrada no contexto de garantir o fornecimento de combustíveis ou de proteger as infra-estruturas de energia tais como, centrais de produção, linhas de transmissão e redes de distribuição. A segurança de abastecimento é de forma directa quando o sistema eléctrico iguala a produção ao consumo e de forma indirecta em termos de fornecimento de energia, numa perspectiva a longo prazo¹.

A actual economia internacional de energia, baseada no paradigma da electricidade centralizada, é particularmente vulnerável. Grande parte da energia total utilizada na UE é importada. Assim, o primeiro e maior risco para a segurança de abastecimento na Europa, resulta da dependência de fornecedores estrangeiros de gás, petróleo e carvão, sendo seguido pelas falhas na infra-estrutura eléctrica, devido a

¹ Cada sistema eléctrico deve estar concebido para recuperar o seu (quase) normal funcionamento, 15 minutos após o evento mais severo que o pode afectar. As reservas operacionais devem assegurar que a capacidade existente nas centrais de produção energética terão disponibilidade para aumentar a entrega ao sistema eléctrico, sempre que solicitado.

ameaças naturais ou humanas. Um exemplo desta vulnerabilidade é o caso da famosa cegonha que, tendo inadvertidamente poisado nas linhas da Rede Eléctrica Nacional, na noite de 9 de Maio de 2000, deixou metade de Portugal às escuras.

Todos os sectores económicos e tecnológicos apresentam vulnerabilidades relativamente a interrupções de fornecimento de combustíveis, especialmente quando esses combustíveis são importados. Estas interrupções do fornecimento podem resultar por razões de escassez devido à elevada procura, motivos atmosféricos, sanções económicas impostas a países importadores ou simplesmente por razões de competitividade da fonte. Tanto as ameaças como as respostas internacionais a interrupções do fornecimento de combustíveis tendem a ser de âmbito transfronteiriço.

O sector energético é fortemente susceptível à variação dos preços da energia, os quais podem oscilar das mais diversas formas. Como exemplo tem-se o caso das greves laborais onde se verificou que, por exemplo, no Reino Unido a produção de electricidade foi afectada durante a grande greve laboral dos mineiros de carvão, em 1984-85, tendo o mesmo acontecido na Índia em 2001 e na África do Sul, em 2007 [WADE, 2007].

Assim sendo, segundo Zerrifi [2004] e WADE [2007], os acontecimentos que contribuem para a vulnerabilidade das infra-estruturas de abastecimento energético podem-se dividir em:

- Ameaças terroristas – actos de terrorismo contra as infra-estruturas quer de produção quer de transporte da energia são relativamente comuns, em determinadas regiões que apresentam instabilidade económica e política. Estes são acontecimentos que podem afectar de forma acentuada os preços finais da energia assim como a segurança de abastecimento;
- Desastres naturais – o aumento de acontecimentos climáticos extremos;
- Interesses geopolíticos – as decisões, muitas vezes, unilaterais de países produtores ou exportadores de energia primária são responsáveis por muitos dos cortes de abastecimento;
- Infra-estruturas de transporte de energia antigas – grande parte dos sistemas de transmissão e distribuição de energia eléctrica estão próximo do final do seu tempo de vida útil e representam um investimento muito elevado em toda a sua renovação;
- Alterações climáticas – grande parte das centrais energéticas utilizam o carvão, o petróleo ou o gás como fonte de energia primária e em consequência emitem grandes quantidades de gases com efeito de estufa contribuindo para a alteração do clima. Muitas destas centrais possuem tecnologias antigas que se reflectem em processo de produção pouco eficientes;
- Riscos económicos e legislativos – a construção de novas centrais de produção é actualmente um processo difícil devido à necessidade de aprovação dos projectos que é muitas vezes complexa e devido às grandes necessidades monetárias para a execução desses projectos.

3.3. Microgeração aplicada à descentralização da energia

Para que seja possível cumprir os objectivos da UE relativamente à vertente energética, ou seja, os 20% de aumento nas energias renováveis até 2020, é necessário que os governos criem planos de acção que incentivem os proprietários e os consumidores finais a tomar medidas pró-activas que contribuam para a nova visão energética europeia. O conceito de microgeração de energia enquadra-se nesse contexto e refere-se às aplicações da produção descentralizada onde são utilizadas tecnologias com menores potências, habitualmente à escala de um produtor doméstico ligadas à rede pública de baixa tensão.

Em Portugal, o primeiro passo foi dado com o Decreto-Lei n.º 68/2002 de 25 de Março onde se definia o conceito de microgeração como a “produção de energia eléctrica em baixa tensão destinada predominantemente a consumo próprio, sem prejuízo de poder entregar a produção excedente a terceiros ou à rede pública”. No entanto, “a potência a entregar à rede pública (...) não poderá ser superior a 150 kW”. Este acabou por ser um pequeno passo pois cinco anos após a sua entrada em vigor verificou-se que o número de sistemas de microgeração de electricidade licenciados e a funcionar ao abrigo do enquadramento legal não atingiu uma expressão significativa, não ultrapassando a dezena de unidades.

Tornou-se então, importante incentivar a procura destes sistemas para que se atingisse o aumento pretendido. Assim, em 2007 surge um novo enquadramento legal, o Decreto-Lei n.º 363/2007, que veio não só simplificar significativamente o regime de licenciamento existente como também veio criar dois regimes de remuneração: o regime geral e o regime bonificado. Com a publicação do referido decreto-lei, a 2 de Novembro estabelece-se “o regime jurídico aplicável à produção de electricidade por intermédio de instalações de pequena potência”.

Este decreto-lei aplica-se às ditas unidades “de grupo I”, ou seja, unidades de “produção de electricidade monofásica em baixa tensão com potência de ligação até 5,75 kW”, quer utilizem recursos renováveis como energia primária quer produzam, combinadamente, electricidade e calor.

Tal como anteriormente referido este regulamento veio criar dois regimes remuneratórios, o geral e o bonificado. O regime geral é aplicável a todos os que tenham acesso à actividade de microgeração e onde as condições de acesso, segundo o decreto-lei em questão, são as seguintes:

1. Potência de ligação limitada a 50% da potência contratada com um máximo de 5,75 kW, quando as instalações não estiverem integradas num condomínio;
2. Instalações de microprodução integradas num condomínio, onde não foi realizada auditoria energética ou não foram implementadas as medidas de eficiência energética identificadas na auditoria;

3. Restantes instalações onde não foram instalados colectores solares térmicos para aquecimento de água na instalação de consumo, com uma área mínima de 2 m² da área de colector, caso não esteja prevista a instalação de cogeração a biomassa a qual a existir deverá estar integrada no aquecimento do edifício;
4. Produção de energia por cogeração com base em energia não renovável;
5. Tarifa de venda aplicável é coincidente com a tarifa aplicada na instalação de consumo.

Ao regime bonificado podem ter acesso unidades de microgeração com potência de ligação limitada a 50% da potência contratada e com um limite máximo de 3,68 kW. Para que sejam cumpridas as condições de acesso a este regime dever-se-á ainda instalar colectores solares térmicos para aquecimento de água na instalação de consumo, com uma área de 2m² de área de colector, caso não esteja prevista a instalação de cogeração a biomassa a qual a existir deverá estar integrada no aquecimento do edifício. É necessário ainda que o limite de potência anual registada, a nível nacional, não tenha sido excedido¹.

No regime bonificado, a tarifa de remuneração ao produtor corresponde a “uma tarifa única de referência aplicável à energia produzida no ano da instalação e nos cinco anos civis seguintes”. Contudo a tarifa de remuneração é função da tecnologia de energia utilizada, ou da combinação de tecnologias utilizadas. De acordo com a tecnologia de energia utilizada estabeleceu-se que as primeiras tarifas de referência seriam:

- Energia Solar – 0,6500€/kWh
- Energia eólica – 0,4550€/kWh
- Energia hídrica – 0,1950€/kWh
- Cogeração a biomassa – 0,1950€/kWh
- Pilhas de combustível – tarifa aplicável à tecnologia renovável utilizada na produção de hidrogénio.
- Combinação de tecnologias de energia – tarifa aplicada é a média ponderada das percentagens individuais correspondentes às diferentes tecnologias utilizadas.

Assim sendo, atribuiu-se “aos primeiros 10 MW de potência de ligação registados a nível nacional, a tarifa de referência de 650€/MWh” dependendo do tipo de energia renovável utilizada, “mediante a aplicação das seguintes percentagens à tarifa de referência”, onde a energia solar corresponde a 100%, a eólica a 70%, a hídrica e a cogeração a biomassa a 30%, segundo o Decreto-Lei n.º363/2007, de 2 de Novembro. Por cada 10 MW adicionais de potência de ligação registada, a nível nacional, a tarifa de referência é sucessivamente reduzida de 5%, conforme a Figura 3.

¹ A potência de ligação registada é sujeita a um limite anual. Para o ano de 2008, o limite anual foi de 10 MW, sendo acrescido anual e sucessivamente, em 20% e como tal para 2009 o limite anual foi de 12 MW e para 2010 será de 14,4 MW. As instalações registadas a partir da data em que o limite da potência de ligação registada para um dado ano tenha sido atingido, só terão acesso ao regime geral.

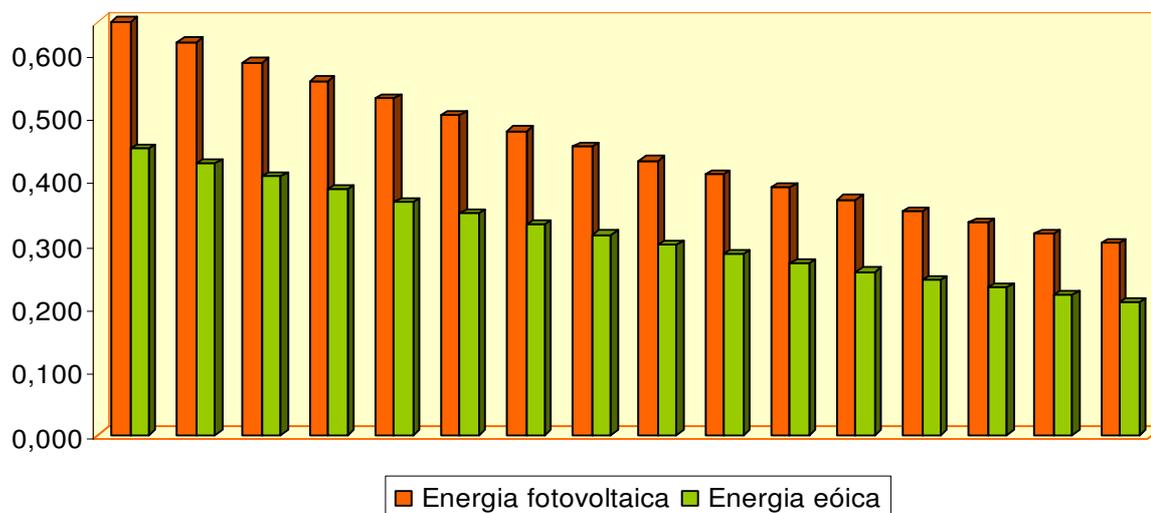


Fig. 3 – Evolução da tarifa bonificada por cada 10 MW instalados

Todo o processo de registo e licenciamento de unidades de microprodução tem sido um pouco conturbado em Portugal devido ao limite da potência anual registada que se tem verificado como inferior à procura. Segundo dados estatísticos disponibilizados pela plataforma “Renováveis na Hora”¹ (ver Tabela 2), para a tarifa bonificada de 0,65€, o total de unidades de microprodução registadas foram 7 338, o que se traduz numa potência registada de cerca de 25 MW. Contudo o processo de licenciamento está definido em três etapas, os registos efectuados, os registos pagos e os registos com pedido de inspecção. Dos 7 338 registos efectuados apenas 3 075 se tornaram registos com pedido de inspecção, o que totalizou cerca de 10,78 MW de potência. Prevê-se que esta potência corresponde à potência que foi efectivamente instalada.

Infelizmente não estão ainda disponibilizados dados estatísticos referentes às unidades de microprodução realmente aprovadas após o pedido de inspecção e que neste momento já são unidades microprodutoras. Segundo a informação disponibilizada na plataforma “Renováveis na hora”, os 10 MW de potência instaladas foram atingidos num período de tempo aproximado de 10 meses. Também não foi divulgada informação estatística referente ao número de instalações já em funcionamento, que têm por base a energia solar, a energia eólica, sistemas híbridos ou outro tipo de energia abrangida pelo Decreto-Lei n.º 363/2007.

¹ Entidade que gere todo o processo de registo e licenciamento de unidades de microprodução. Disponível em www.renovaveisnahaora.pt.

Tabela 2 – Dados estatísticos referentes à tarifa bonificada de 0,65€

[Fonte: Renováveis na hora, 2010]

Fase	Registos Efectuados		Registos Pagos		Registos com Pedido de Inspeção	
	Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)	Qtd	Potência (kW)
1ª	657	2260,74	374	1306,75	263	924,61
2ª	700	2263,81	395	1369,01	287	994
3ª	641	2164,86	365	1271,28	229	798,89
4ª	766	2700,54	394	1391,05	234	817,56
5ª	581	1989,8	342	1163,04	234	808,4
6ª	777	2656,95	486	1690,6	329	1150,98
7ª	817	2816,33	453	1588,05	344	1209,62
8ª	829	2917,81	436	1543,1	364	1287,01
9ª	816	2866,78	493	1733,78	421	1479,89
10ª	754	2656,5	465	1655,96	370	1311,81
Total	7338	25294,13	4203	14712,63	3075	10782,77

4. O Recurso Eólico

4.1. Características gerais do recurso eólico

Segundo Miranda [2001], desde que foi inventado o barómetro que se sabe da existência de uma relação directa entre a distribuição da pressão atmosférica e o vento. O deslocamento de massas de ar na Terra resulta das diferenças de temperatura e, portanto das diferenças de densidade, nessas mesmas massas de ar. Consequentemente essas diferenças de temperatura dependem da maior ou menor incidência de energia solar sobre a superfície terrestre em função da latitude, pelo que é certo que nas zonas equatoriais o ar é mais quente do que nas zonas polares.

O aquecimento mais intenso das zonas equatoriais relativamente às zonas polares origina uma lenta circulação das massas de ar. O ar quente ascende próximo do Equador enquanto que o ar frio desce nos Pólos, dando origem às denominadas células de convecção terrestres. Este aquecimento diferencial das massas de ar juntamente com a denominada força de Coriolis, resultante da rotação terrestre, origina o vento.

No movimento de uma partícula de ar, as principais forças envolvidas são a força da gravidade ($m\vec{g}$), a força do gradiente de pressão (\vec{F}_p , actuando na sua superfície), a força de atrito (\vec{F}_a), a força centrífuga (\vec{F}_{cf}) e a força de Coriolis (\vec{F}_{cor}) (ver Figura 4). Assumindo a Lei Fundamental da Dinâmica ($\vec{F} = m\vec{a}$), em que \vec{F} é a resultante de todas as forças externas que actuam sobre a partícula, m a sua massa e \vec{a} a aceleração, tem-se que:

$$m\vec{g} + \vec{F}_p + \vec{F}_{cf} + \vec{F}_{cor} + \vec{F}_a = m\vec{a} \quad (4.1)$$

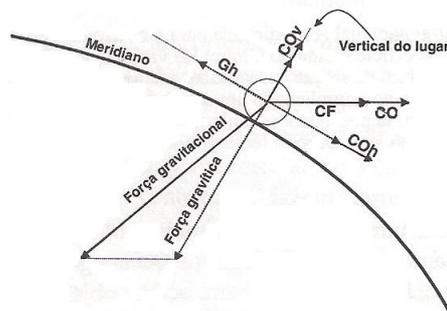


Fig. 4 – Forças actuantes numa partícula de ar
[Fonte: adaptado de Miranda, 2001]

A força de atrito resulta da viscosidade do ar e actua tangencialmente à superfície de um elemento de volume de ar (sendo a força do gradiente de pressão normal a essa superfície) opondo-se ao seu movimento em relação a outras partículas. Como o ar é um fluido muito pouco viscoso, a força de atrito é, em geral, desprezável, excepto no caso dos movimentos de muito pequena escala (inferior ao mm) [Miranda, 2001].

Tanto a força centrífuga como a força de Coriolis são forças de inércia, isto é, forças aparentes que resultam do facto de se observar o movimento do ar a partir de um ponto fixo na superfície de um planeta em rotação. Por sua vez, a força centrífuga e a força de Coriolis resultam do movimento de rotação da Terra. A força centrífuga resulta directamente do movimento de rotação e consiste numa força perpendicular ao eixo de rotação da Terra, dirigida para o exterior. Muito mais subtil é a força de Coriolis que só revela a sua presença no caso de objectos com movimento em relação ao planeta. Quando um objecto se desloca em relação à superfície da Terra o seu movimento será a soma do seu movimento em relação à Terra com o próprio movimento da superfície da Terra no espaço. Assim, mesmo que o movimento relativo seja uniforme e rectilíneo, o movimento absoluto será curvilíneo, implicando acelerações centrífugas. Assim, a diferença entre a força centrífuga total e a força centrífuga que actua sobre um objecto em repouso é a força de Coriolis [Miranda, 2001].

Uma situação de puro equilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis implica a inexistência de aceleração. Esta situação acontece quando a distribuição de velocidades não varia no tempo – solução estacionária – e em quando cada partícula de ar se desloca em movimento rectilíneo e uniforme. Nesta situação admite-se, naturalmente, que a força de atrito é nula. A condição de equilíbrio entre a força (horizontal) do gradiente de pressão e a força de Coriolis designa-se por equilíbrio geostrófico e o valor do vento que lhe corresponde por vento geostrófico [Miranda, 2001].

Por outras palavras, o vento geostrófico representa uma desaceleração do vento. Conforme se observa na Figura 5, quando se desenvolve um gradiente de pressão horizontal, a partícula de ar acelera atravessando directamente as isóbaras, no sentido das altas pressões para as baixas pressões. Enquanto que as partículas de ar aceleram o seu movimento, o efeito de Coriolis torna-se mais forte o que faz com que as mesmas se desviem gradualmente do percurso inicial. As duas forças actuantes acabam por atingir um equilíbrio, pelo que o vento sopra a uma velocidade constante, directamente paralelo às isóbaras, sendo designado por vento geostrófico [Kaltschmitt *et al*, 2007].

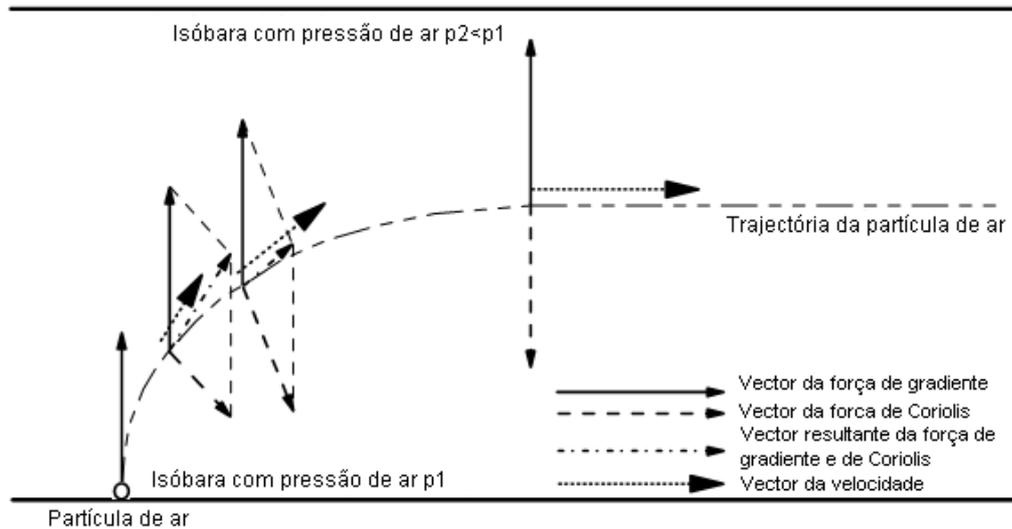


Fig. 5 – Esquema ilustrativo da origem do vento geostrófico
 [Fonte: adaptado de Kaltschmitt *et al*, 2007]

Quanto maior for o gradiente de pressão, mais próximas estarão as isóbaras e maior será a força de gradiente. Consequentemente, as partículas de ar possuem uma maior aceleração, e a velocidade da partícula na deslocação entre a isóbara com pressão p_1 para uma isóbara com pressão p_2 aumenta. A magnitude da força de Coriolis, contudo, aumenta proporcionalmente à velocidade da partícula que está a ser actuada. A velocidade do vento geostrófico depende apenas da dimensão das diferenças de pressão.

Contudo, apenas numa situação idealizada é que as isóbaras são paralelas entre si. De acordo com Miranda [2001] as isóbaras são, na realidade, quase sempre, linhas curvas observando-se frequentemente sistemas de forma elíptica ou circular, correspondentes a máximos e mínimos locais de pressão. Assim impõe-se uma terceira força, para além das duas anteriormente referidas, a força centrífuga, a qual actua também sobre a partícula de ar, pelo que o vento resultante se designa por vento de gradiente e encontra-se ilustrado na Figura 6.

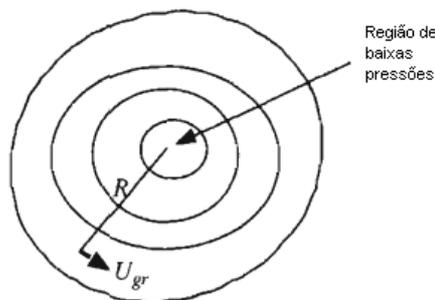


Fig. 6 – Vento de gradiente, designado por U_{gr}
 [Fonte: adaptado de Manwell *et al*, 2002]

No hemisfério norte, o vento de gradiente sopra no sentido inverso aos ponteiros do relógio, enquanto que no hemisfério sul sopra no sentido dos ponteiros do relógio, em torno de áreas de baixas pressões. Para áreas de altas pressões a situação é inversa. Enquanto que a força centrífuga intensifica a força de

gradiente nas zonas de elevadas pressões, nas zonas de baixas pressões a mesma é enfraquecida, e a velocidade do vento de gradiente nas zonas de altas pressões é superior as zonas de baixas pressões [Kaltschmitt *et al*, 2007].

Na Figura 7, é possível observar um esquema ilustrativo das forças actuantes nas partículas de ar e que dão origem aos dois tipos de vento discutidos, o vento geostrófico e o vento de gradiente.

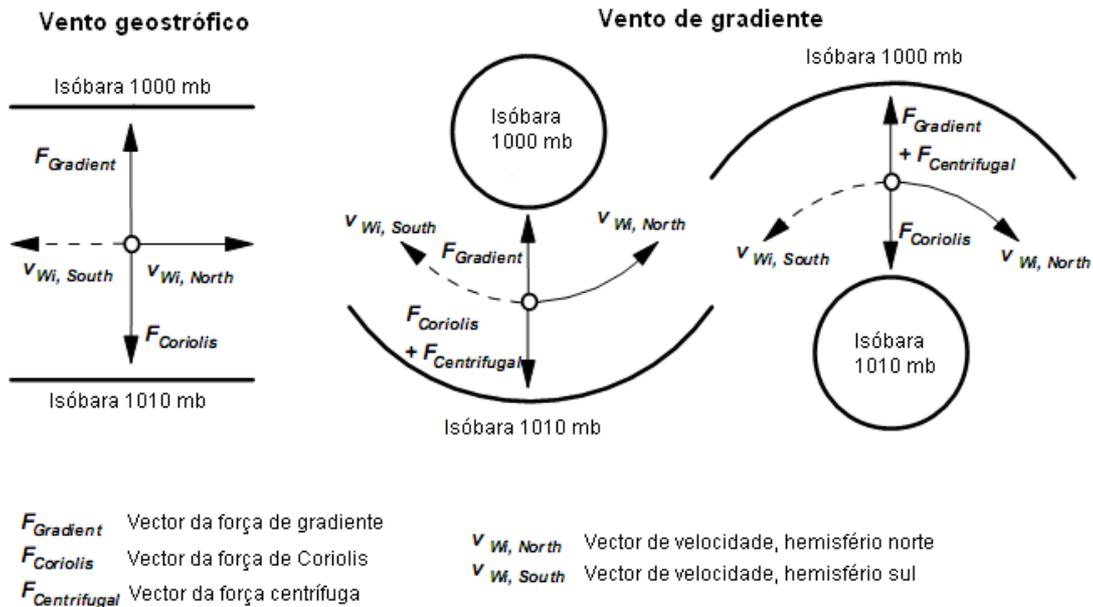


Fig. 7 – Esquema ilustrativo das forças actuantes que têm origem nos ventos geostrófico e gradiente [Fonte: adaptado de Kaltschmitt *et al*, 2007]

4.2. Turbulência

A turbulência no vento é provocada por dissipação da energia cinética do vento em energia térmica através da formação e destruição progressiva de pequenos turbilhões. O vento turbulento poderá ser relativamente constante em períodos de uma hora ou mais, no entanto em pequenos períodos (minutos ou menos) poderá ser, e normalmente até o é, muito variável [Manwell *et al*, 2002]. Segundo Burton *et al* [2001], a turbulência refere-se a flutuações na velocidade do vento, numa escala de tempo relativamente rápida, tipicamente inferior a 10 minutos.

A razão da turbulência deve-se essencialmente a dois factores principais, a “fricção” com a superfície terrestre e os efeitos térmicos. A fricção pode ser considerada como uma extensão dos distúrbios na escoamento do ar resultantes das características topográficas (como colinas, vales e/ou montanhas) enquanto que os efeitos térmicos podem provocar o movimento vertical das massas de ar, resultante de uma variação de temperaturas, e como tal, da densidade do ar. Muitas vezes as duas razões referidas estão

interligadas, como é o caso de uma massa de ar que flui sobre uma montanha e é forçada a subir para zonas mais frias onde não estará em equilíbrio térmico com a sua vizinhança [Burton *et al* 2001].

Em termos matemáticos a função velocidade do vento $u(t)$ pode-se expressar por:

$$u(t) = \bar{u} + u'(t) \quad (4.2)$$

em que \bar{u} é a velocidade média e $u'(t)$ é a turbulência. A velocidade média é calculada com base num período que caia dentro do vazio espectral¹, tipicamente entre 20 minutos e 1 hora e representa o regime quase-estacionário² de energia disponível para a turbina. A turbulência também afecta a energia disponível, mas de forma indirecta, uma vez que a turbina não reage a flutuações rápidas na velocidade ou na direcção do vento [Castro, 2003].

A turbulência é um processo complexo, o qual não pode ser representado simplesmente em termos de equações determinísticas. Embora obedeça às leis da Física, que descrevem a conservação da massa, o momento e a energia, para descrever a turbulência com base nessas mesmas leis será necessário considerar ainda a temperatura, pressão, densidade e humidade assim como o movimento do próprio ar, em campo tridimensional. Por essa mesma razão, normalmente, opta-se pelo desenvolvimento de descritores da turbulência em função das suas propriedades estatísticas [Burton *et al*, 2001].

A intensidade da turbulência é uma medida do nível total de turbulência. É definido pela seguinte expressão:

$$I = \frac{\sigma}{\bar{u}} \quad (4.3)$$

onde σ é o desvio-padrão da variação da velocidade do vento e \bar{u} a média da componente horizontal da velocidade do vento, usualmente definido sobre 10 minutos ou 1 hora.

Os dois factores responsáveis pela turbulência, como seria de esperar, influenciam também a sua intensidade. Esta depende directamente da topografia de superfície terrestre, ou seja, da sua rugosidade e da elevação do terreno. Por sua vez, a rugosidade depende da cobertura do solo, como seja a vegetação, edificações entre outros. As características térmicas da atmosfera terrestre também influenciam a intensidade da turbulência, pois se o ar em contacto com o solo aquecer num dia solarengo tornar-se-á mais leve, o suficiente para subir através da atmosfera, provocando um padrão de células de convecção. Consequentemente à medida que a distância ao solo aumenta, os efeitos de todos estes processos

¹ A zona de vazio espectral, associada a períodos compreendidos aproximadamente entre 10 minutos e 2 horas e relacionada com zonas do espectro correspondentes a muito pouca energia.

² No sentido em que as variações são lentas, quando comparadas com as variações associadas à turbulência.

resultantes das interações com a superfície terrestre enfraquecem, até que se atinge um ponto no qual o ar deixa de sofrer influência da superfície terrestre.

Assim, a turbulência contrasta com uma característica importante da atmosfera, a estabilidade, isto é, a resistência que apresenta ao movimento vertical ou à turbulência existente. A estabilidade da atmosfera é, geralmente, classificada em estável, neutra ou instável.

De acordo com Manwell *et al* [2002], a estabilidade na atmosfera terrestre é consequência da distribuição vertical da temperatura, resultante do aquecimento ou arrefecimento radiativo da superfície terrestre e a consequente mistura convectiva do ar adjacente à superfície terrestre.

Uma estratificação instável verifica-se quando ocorre o aquecimento da superfície terrestre seguido do posterior aquecimento da massa de ar adjacente, provocando assim uma subida da massa de ar por aquecimento. À medida que a massa de ar sobe resulta a sua expansão, devido à diminuição da pressão atmosférica, ocorrendo assim o arrefecimento adiabático. Se este arrefecimento não for o suficiente para conduzir a massa de ar até ao equilíbrio térmico com o ar circundante, a subida continua originando largas células convectivas. Por sua vez, quando o processo de arrefecimento adiabático permite que a massa de ar se torne mais fria que o ar circundante, o movimento vertical é anulado, atingindo-se uma estratificação estável. Nesta situação, a turbulência é dominada pela fricção com a superfície terrestre e dá-se o aumento da velocidade média do vento com a altura.

Numa atmosfera neutra, o arrefecimento adiabático da massa de ar dá-se à medida que a mesma sobe, por forma a que a massa de ar se mantenha em equilíbrio térmico com o ar circundante. Esta é muitas vezes a situação de fortes ventos, quando a turbulência causada pela rugosidade da superfície terrestre provoca uma suficiente mistura da camada limite atmosférica. Para aplicações eólicas, a estabilidade neutra é normalmente a situação mais relevante a considerar [Manwell *et al*, 2002].

4.2.1. A camada limite atmosférica

Um parâmetro importante na caracterização do recurso eólico é a variação horizontal da velocidade do vento com a elevação, ou seja, a distância acima do nível da superfície terrestre. Esta variação, assim como a variação da estabilidade atmosférica, dependem da rugosidade da superfície terrestre e da topografia.

A velocidade horizontal do vento é nula ao nível da superfície terrestre sendo que, com a elevação e consequente diminuição do efeito da rugosidade, a velocidade tende a aumentar dando origem ao denominado perfil vertical da velocidade do vento [Manwell *et al*, 2002]. A determinação do perfil vertical da velocidade do vento (ver Figura 8) é importante, em aplicações eólicas, pois permite

determinar a produtividade de uma turbina eólica instalada numa torre com determinada altura e pode, ainda, influenciar fortemente o tempo de vida útil do rotor de uma turbina, auxiliando a prever o seu desgaste mecânico.

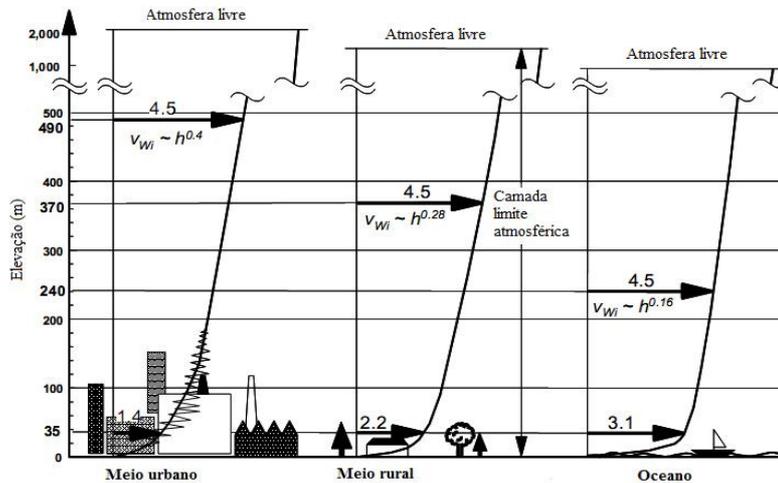


Fig. 8 – Esquema ilustrativo da relação entre a rugosidade e o perfil vertical da velocidade do vento [Fonte: adaptado de Kaltschmitt et al, 2007]

Para além do perfil vertical da velocidade do vento é importante perceber o que é a camada limite atmosférica - CLA. Esta camada é constituída pela região inferior da atmosfera, formada como consequência das interações entre a mesma e uma camada inferior, que varia entre a superfície terrestre ou a superfície oceânica. Na CLA, os efeitos da rugosidade da superfície, da temperatura e de outras propriedades são transmitidos através do mecanismo de mistura turbulenta. A força do vento geostrófico, a rugosidade da superfície, o efeito de Coriolis e os efeitos térmicos são os principais responsáveis pelas propriedades da camada limite [Burton *et al*, 2001].

Em situação de estratificação neutra, a espessura da CLA varia normalmente entre centenas de metros até vários quilómetros. O efeito da força de atrito vai-se desvanecendo até que atinge uma determinada altura onde acaba por se anular. Neste ponto, acima da camada limite atmosférica, diz-se que a atmosfera é livre.

Tal como referido, diferentes temperaturas originam diferentes estabilidades na atmosfera. A temperatura normalmente diminui com a altitude em relação ao solo, no entanto, em certas camadas da troposfera, por vezes a temperatura aumenta com a altitude. Nestes casos, diz-se que ocorreu uma inversão térmica, ou seja, a variação normal da temperatura na troposfera inverteu-se.

Na Figura 9 encontram-se representados dois perfis térmicos, o diurno (a castanho) e o nocturno (a azul). Durante o dia, a superfície terrestre está mais fria do que o ar circundante, pelo que à medida que a altura aumenta o ar fica mais quente por radiação solar. Contudo a determinada altura dá-se uma inversão desta tendência, a temperatura passa a diminuir com a altura. Durante a noite verifica-se o contrário pois a superfície terrestre está mais quente do que o ar circundante. O nível de inversão é o ponto onde o perfil térmico se reverte e está identificado na Figura 9 por z_1 .

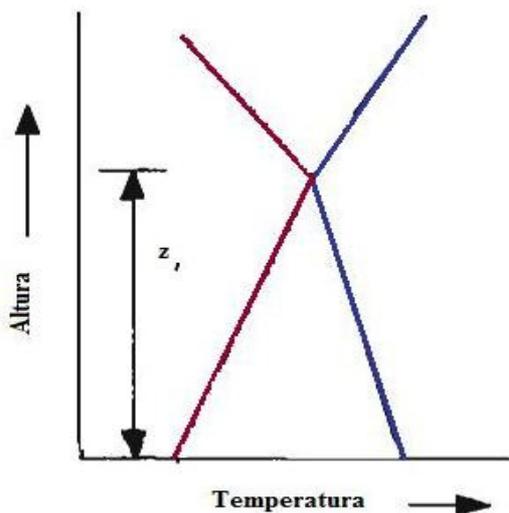


Fig. 9 – Esquema ilustrativo dos perfis térmico e do nível de inversão
[Fonte: adaptado de Manwell *et al*, 2002]

A turbulência contribui muitas vezes para a ocorrência de inversões térmicas. A turbulência provocada pelos obstáculos pode obrigar o ar frio na base de uma inversão à superfície¹ a ser transportado para altitudes superiores. O arrefecimento produzido pode, portanto, estender-se através de uma camada mais espessa de ar. O nível de inversão fica, assim, situado a um nível mais elevado. Por outro lado, quando o vento é mais forte, a turbulência gerada pode ser ainda maior. A mistura das camadas obriga o ar mais frio a estender-se através de uma camada muito mais espessa. Como resultado deste facto, a diminuição de temperatura é pequena e, assim, não se verifica a ocorrência de inversão [FPC, 2010].

Segundo Simiu e Scanlan [1996], em períodos diurnos instáveis e condições de convecção, a CLA estende-se normalmente até ao ponto de inversão à superfície. Acima do nível de inversão, a temperatura aumenta e a humidade específica diminui rapidamente com a altura, enquanto que abaixo desse nível, ambas permanecem relativamente uniformes através da camada de mistura. Assim, a altura do nível de inversão à superfície é, para todos os efeitos, considerada igual à altura da CLA instável ou convectiva. Esta altura é tipicamente 1 quilómetro ou cerca de 10% da altura da troposfera, como ilustrado na Figura 10, mas poderá variar entre os 200 metros e 5 quilómetros. Segundo Plate [1992] assume-se, na área da eólica, espessuras da CLA que oscilam entre 600 metros e 1 quilómetro.

¹ Por vezes pode ocorrer uma inversão a partir do nível do solo, conhecida por inversão à superfície. Em outras situações pode ocorrer uma inversão numa camada a certa altitude designada por inversão em altitude. No caso da inversão à superfície, a base encontra-se ao nível do solo (Fonte: FPC, 2010)

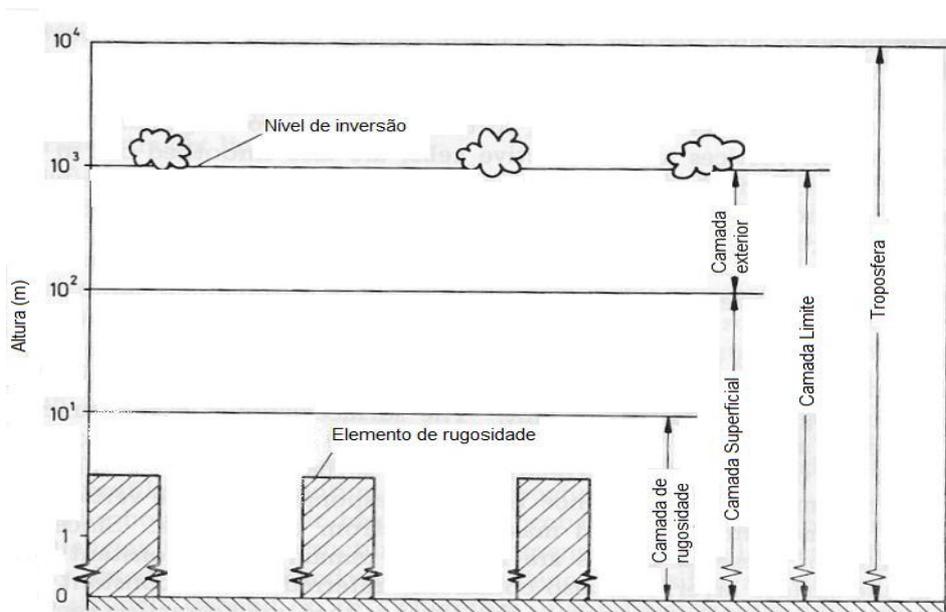


Fig. 10 – Esquema ilustrativo das camadas identificadas na Troposfera
 [Fonte: adaptado de Plate, 1982]

Na CLA é possível definir duas sub-camadas distintas, a sub-camada logarítmica, ou zona da parede, na qual as tensões de corte são aproximadamente constantes e iguais às tensões de corte no solo, e a sub-camada exterior, na qual as tensões de corte evoluem do valor constante assumido na sub-camada logarítmica até à sua anulação no topo da CLA. A sub-camada logarítmica define-se segundo a *Lei Logarítmica* e é expressa pela seguinte equação:

$$u(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \frac{z}{z_0} \quad (4.4)$$

onde $k \cong 0,4$, o qual é geralmente o valor assumido para a constante de Von Kármán, z representa a altura acima do solo, z_0 é o comprimento da rugosidade e $u(z)$ é a velocidade média do vento. Investigações micrometeorológicas estabeleceram que a altura z_1 à qual a equação anterior se pode assumir como válida, é definida pela relação:

$$z_1 = b \frac{u_*}{f} \quad (4.5)$$

onde b é uma constante, com valores que variam entre 0,015 – 0,03 e f representa o parâmetro de Coriolis [Simiu e Scanlan, 1996].

É na zona da sub-camada logarítmica que se situa o domínio dos aproveitamentos de energia do vento, revestindo-se o seu estudo, por esta razão, de primordial importância.

Para superfícies com elevada rugosidade, como por exemplo florestas ou áreas urbanas, o ponto de partida mais apropriado para determinar a altura da CLA não é, normalmente, o nível do solo, mas um ponto deslocado em altura por uma distância igual a d_0 , denominado por *zero-plane displacement*¹ [Simiu e Scanlan, 1996].

Quando este ponto é introduzido na equação da *Lei Logarítmica*, através de uma alteração ao valor z , anteriormente designado como altura acima do solo, e que passa a ser definido por:

$$z = z_g - d_0 \quad (4.6)$$

onde z_g é a altura acima do solo. O valor de z refere-se, assim, à altura efectiva. Os parâmetros de fluxo z_0 e d_0 são determinados empiricamente e são função da natureza, altura e distribuição dos elementos de rugosidade. O comprimento de rugosidade z_0 é a medida da dimensão dos turbilhões ao nível do solo e, segundo o referido pelos autores Simiu e Scanlan [1996], sugere-se que valores razoáveis para o d_0 nas cidades pode ser obtidos através da seguinte equação:

$$d_0 = \bar{H} - \frac{z_0}{k} \quad (4.7)$$

onde \bar{H} é o nível do topo do telhado. Por sua vez, os valores típicos de z_0 para inúmeros tipos de terrenos, e seus correspondentes valores do coeficiente de retardamento da superfície são possíveis observar na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de atrito do solo, para vários tipos de superfície
[Fonte: Simiu e Scanlan, 1996]

Tipo de superfície	z_0 (cm)
Areia	0,01 – 0,1
Neve	0,1 – 0,6
Relva	0,1 - 1
Erva baixa	1 - 4
Terreno lavrado	2 - 3
Erva alta	4 - 10
Arbustos	10 - 30
Terreno arborizado*	90 - 100
Subúrbios	20 - 40
Centros de povoações	80 - 120
Centros de grandes cidades	200 - 300

* Altura média das árvores 15 m; uma árvore por 10 m².

¹ *Zero-plane displacement* – cota à qual a velocidade equivalente de atrito é nula.

Segundo os mesmos autores, a primeira representação do perfil vertical da velocidade média do vento em terreno horizontal e homogêneo foi obtida com base na *Lei das Potências*, proposta em 1916 e expressa por:

$$u(z_{g1}) = u(z_{g2}) \left(\frac{z_{g1}}{z_{g2}} \right)^\alpha \quad (4.8)$$

onde α é um expoente que depende da rugosidade do terreno e z_{g1} e z_{g2} correspondem a altura acima do solo. Actualmente, a *Lei Logarítmica* é defendida pelos meteorologistas como uma representação preferencial para perfis de ventos fortes na atmosfera mais baixa enquanto que a *Lei das Potências* deve ser usada apenas como primeira aproximação¹.

Na sub-camada exterior, o perfil de velocidades afasta-se do descrito pela *Lei Logarítmica*. Este afastamento é controlado pelo escoamento exterior na zona de atmosfera livre que transfere energia para a zona de fronteira com o solo através da sub-camada logarítmica [Simões, 2004].

4.2.2. Efeitos condicionantes ao recurso eólico

A influência das características da superfície terrestre na produção energética de uma turbina eólica é, de tal forma importante que a viabilidade económica de um projecto depende em grande parte da selecção do local apropriado.

A classificação mais básica de superfícies divide-se em terrenos planos e terrenos não planos ou complexos. Terrenos planos são superfícies com pequenas irregularidades tais como as florestas, zonas agrícolas, entre outros. Os terrenos complexos têm elevações ou depressões de grande escala, como é o caso das colinas de declive acentuado, vales ou montanhas. Contudo esta não é uma classificação tão linear como aparenta dado que, para se considerar uma superfície como plana existem algumas condicionantes a verificar (ver Figura 11):

- A diferença das elevações entre o local da turbina eólica e as superfícies circundantes não é superior a cerca de 60 metros num círculo de diâmetro igual a 11,5 quilómetros em torno da turbina;
- Não deve existir nenhuma colina com uma razão altura/largura maior que 1/50 a uma distância, quer a montante quer a jusante, de 4 quilómetros;
- A diferença de elevação entre a zona inferior do rotor e a menor elevação do terreno é maior que três vezes a diferença de elevação máxima - h - em 4 quilómetros a montante [Manwell *et al*, 2002]

¹ Embora a sua utilização seja alargada no domínio da caracterização do recurso energético em grandes parques eólicos.

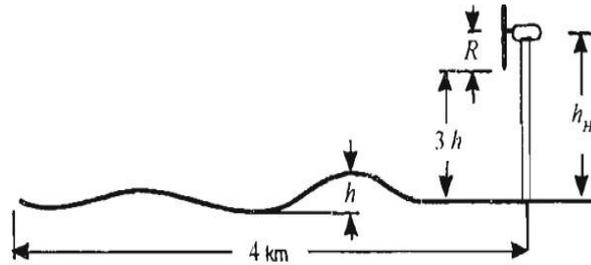


Fig. 11 – Condicionantes para determinação de terreno plano
[Fonte: Wegley *et al*, 1980 in Manwell *et al*, 2002]

Um terreno “não plano” ou complexo consiste num terreno que possui uma ampla variedade de características, sendo que geralmente se utilizam sub-classificações: A - elevações ou depressões isoladas ou B - terreno montanhoso. O escoamento neste tipo de terreno não é simples pois as elevações e depressões ocorrem de forma aleatória, em pequenas ou largas escalas [Manwell *et al*, 2002].

Outro efeito com influência nas características do vento é a existência de obstáculos. Os obstáculos – edifícios, árvores, formações rochosas – podem ser de origem antropogénica ou natural e têm uma influência significativa na diminuição da velocidade e direcção do vento sendo fontes de turbulência na sua vizinhança.

O escoamento sobre superfícies com obstáculos tem especial importância devido às alterações que os mesmos introduzem no escoamento e, conseqüentemente, no impacto que têm no potencial eólico disponível. Os efeitos da presença de obstáculos antropogénicos são muitas vezes estudados numa abordagem simplista, considerando apenas um bloco de forma rectangular e um fluxo bidimensional. Este fluxo bidimensional caracteriza-se pela subdivisão do escoamento em duas correntes: uma superior que acaba por elevar e contornar o obstáculo e outra inferior que sofre um aumento na turbulência gerando vários turbilhões, de diferentes intensidades e sentidos originando uma zona turbulenta, como ilustrado na Figura 12.



Fig. 12 – Ilustração do escoamento sobre um obstáculo, por exemplo um edifício
[Fonte: Manwell *et al*, 2002]

O resultado da quantificação física de um obstáculo antropogénico como elemento perturbador do escoamento, é passível de observação na Figura 143. Verifica-se que, em termos percentuais, a influência do obstáculo induz uma diminuição da velocidade do vento e do potencial eólico e, conseqüentemente, de um aumento da turbulência. De referir que as estimativas na Figura 13 aplicam-se a um nível semelhante

à altura de um edifício – hs – acima do nível médio do solo e que a perda energética torna-se menor a jusante do edifício após uma distância igual a $15hs$.

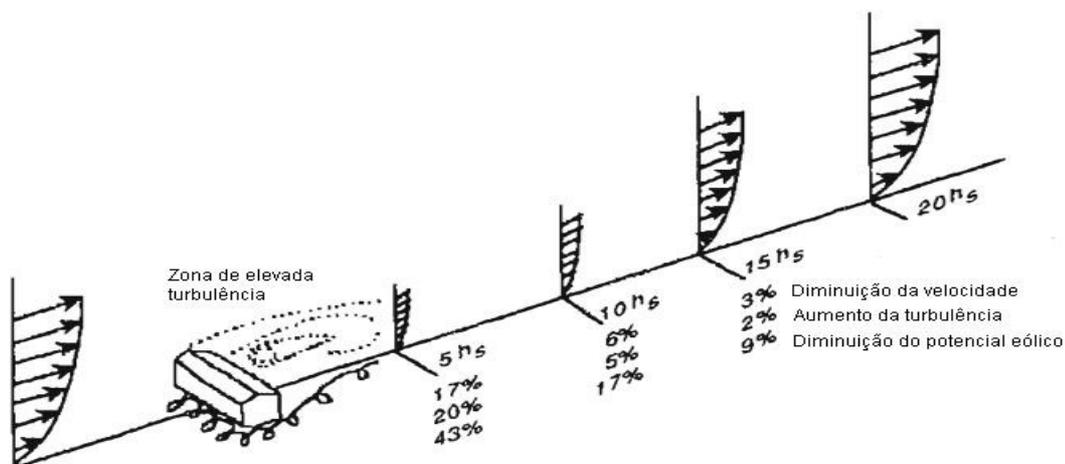


Fig. 13 – Efeitos na velocidade do vento, potencial eólico e turbulência a jusante de um edifício
[Fonte: Wegley *et al*, 1980 in Manwell *et al*, 2002]

É importante considerar ainda o chamado efeito de esteira. Uma turbina eólica produz energia mecânica a partir da energia cinética que retira ao vento incidente. Por sua vez, vento que “sai” da turbina tem um conteúdo energético muito inferior ao do vento que “entrou” na turbina, contudo, traseira da turbina forma-se uma esteira de vento turbulento e com velocidade reduzida relativamente ao vento incidente.

4.2.3. Difusão da turbulência perto de edifícios

Muitas das simulações que são realizadas com o intuito de perceber o padrão do escoamento atmosférico, perto e em torno de estruturas, são baseadas em observações laboratoriais em túnel de vento (ou directamente no exterior) com o auxílio de geradores de fumo, por exemplo.

Com o contínuo crescimento da altura dos edifícios, é importante perceber as alterações que estes impõem ao escoamento natural dos fluidos, não só no contexto de aproveitamento energético do vento mas também devido à dispersão de poluentes em núcleos industriais. Existem factores com particular importância, que permitem conhecer o escoamento sobre edifícios, já estudados e assumidos como condições, citadas por Plate [1982]:

- (1) O fluxo sobre um edifício origina uma zona de pressão positiva na zona a barlavento e uma zona de pressão negativa no topo, zonas laterais e na zona a sotavento. Embora a magnitude da pressão se altere dentro destas zonas com a velocidade do vento para uma determinada orientação, as suas magnitudes relativas não são afectadas [Akins *et al*, 1976, after Plate, 1982].
- (2) As zonas de pressão induzem linhas de correntes, fluxos secundários, separação do escoamento e, conseqüentemente, adicionam turbulência (ver Figura 14). Como o vento apresenta regime turbulento, as regiões de contorno da separação não são constantes, nem em tamanho nem na sua forma [Clarke, 1969, after Plate, 1982].

- (3) Quando a direcção do vento é perpendicular à fachada de um edifício de forma cúbica situado a barlavento, a altura da zona de depressão, ou zona de turbilhões, será cerca de 1,5 vezes a altura do edifício e o seu comprimento corresponderá a cerca de 2,5 – 3 vezes a altura da fachada localizada a barlavento. Se o edifício possuir uma largura superior à altura, a interferência ao escoamento aumenta através de um aumento da altura da zona de depressão assim como o seu comprimento, que passa a cerca de 12 vezes a altura do edifício [Hosker, 1979, after Plate, 1982].
- (4) Até recentemente a zona de depressão era considerada como uma zona de recirculação circunscrita pela linha de corrente mais próxima, ou seja, a linha associada à separação das correntes. Para edifícios com largura finita é actualmente aceite que essa linha de corrente não é “de separação”, mas sim uma linha de corrente de sentido ascendente que permite uma transferência de fluxo entre as duas correntes separadas pelo edifício [Hunt *et al*, 1978, after Plate, 1982].
- (5) Quando o vento se aproxima de um edifício, de forma cúbica, com determinado ângulo relativamente à fachada ($\approx 45^\circ$), dois vórtices intensos em contra-rotação são induzidos pelas arestas do topo do edifício. Estas arestas tendem a reduzir a altura de depressão associada ao edifício, e a aumentar o vento de esteira central à medida que a elevada velocidade do fluxo se desloca no sentido descendente. Estes vórtices podem persistir, em comprimento, até cerca de 80 vezes a altura do edifício [Hansen & Cermak, 1975, after Plate, 1982].
- (6) Para um edifício isolado, uma aproximação do comportamento do vento em seu redor poder-se-á assemelhar à forma de uma “ferradura” moldada pelos vórtices formados, os quais envolvem a base do edifício. A rugosidade da superfície ou pequenas estruturas vizinhas geralmente interrompem o escoamento dos vórtices gerados, e como tal frequentemente estes vórtices não persistem para além da zona de depressão [Hatcher *et al*, 1977, after Plate, 1982].
- (7) Os efeitos resultantes da separação de linhas de correntes e alguns fluxos secundários impostos pelos edifícios, vão introduzir *deficits* de velocidade e excesso de turbulência na região de esteira, que persiste de 5 a 30 vezes a altura do edifício, segundo a direcção do vento.

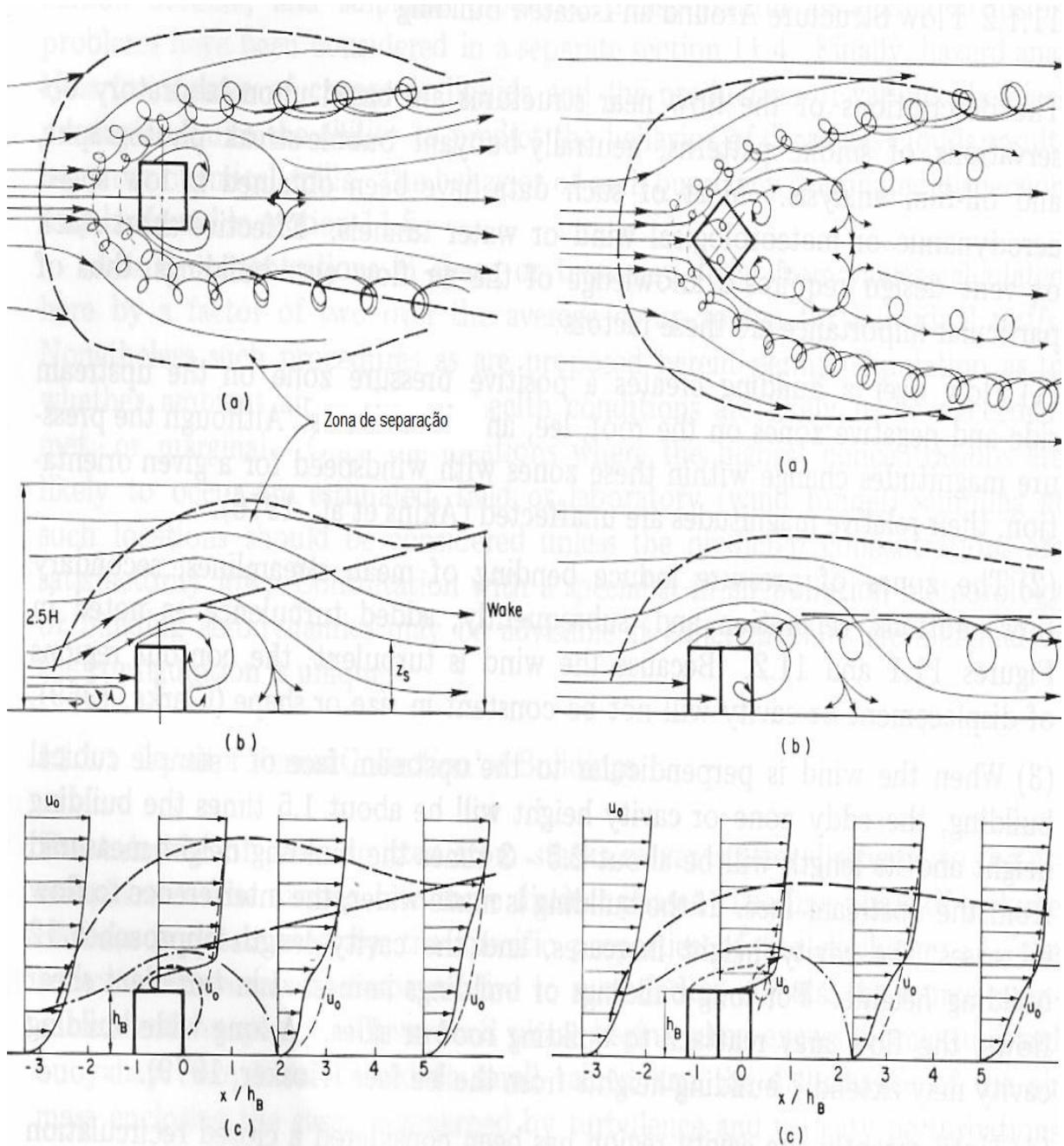


Fig.14 – Esquema ilustrativo da turbulência introduzida pelo edifício, orientado perpendicularmente e orientado a 45°: (a) visualização aérea (b) visualização lateral (c) perfil de velocidade do vento [Fonte: Plate, 1982]

5. Aproveitamento do Recurso Eólico em Ambiente Urbano

5.1. Aproveitamento de recurso energético do vento através de micro-turbinas eólicas

A tecnologia de turbinas eólicas de elevada potência e dimensões encontra-se já dominada e apresenta elevada maturidade sendo que a sua instalação em centrais eólicas *on-shore* constitui a forma de aproveitamento de energia renovável que maior crescimento tem tido nas últimas décadas. Como tal, os desafios tecnológicos no domínio dos aproveitamentos da energia do vento centram-se, actualmente, nas aplicações à escala da microgeração, estas com marcada diminuição do tamanho e potência dos dispositivos de conversão.

A aplicação de micro-turbinas eólicas em ambientes urbanos é uma área ainda recente e com poucas instalações em funcionamento, mas o seu interesse começa agora a crescer rapidamente com a intensa necessidade de desenvolver edifícios e áreas urbanas energeticamente sustentáveis e com os crescentes incentivos na área da microgeração.

As tecnologias de microgeração eólica actualmente existentes consistem em micro-turbinas eólicas de eixo horizontal ou vertical (ver Figura 15), sendo as mais disseminadas as que apresentam o eixo de rotação horizontal. As micro-turbinas de eixo vertical são uma solução tecnológica menos madura que é utilizada, de um modo geral, apenas em ambiente densamente urbano, pois apresentam maior resistência aos ventos urbanos.



Fig. 15 – Exemplos de micro-turbinas eólicas: (a) eixo horizontal (b) eixo vertical
[Fonte: CWEA, 2006]

Numa turbina de eixo horizontal, o rotor necessita de ser posicionado na direcção do vento predominante, sendo mais sensível às alterações na direcção do vento e à turbulência tendo como consequência uma redução da sua performance devido à necessidade de um reposicionamento cada vez que a direcção do vento dominante se altera. As de eixo vertical, são tipicamente mais conhecidas para aplicações urbanas,

pois não necessitam de ser posicionadas na direcção do vento dominante. Contudo, a sua eficiência para a produção eléctrica é menor quando comparada com as micro-turbinas eólicas de eixo horizontal.

As turbinas de eixo horizontal orientam-se na direcção dominante do vento através de sistemas auxiliares de posicionamento quando a posição do rotor¹ face à estrutura de suporte localiza-se em frente à torre (*upwind*) ou atrás da torre (*downwind*) (ver Figura 16), tirando o melhor rendimento das duas tecnologias para ventos de direcção constantes. Em situação de *upwind* o vento incidente não é perturbado pela torre enquanto que, por sua vez, em *downwind* é permitido o auto alinhamento do rotor na direcção do vento, contudo esta opção tem vindo a ser progressivamente abandonada, pois o escoamento é perturbado pela torre antes de incidir no rotor [Castro, 2003].

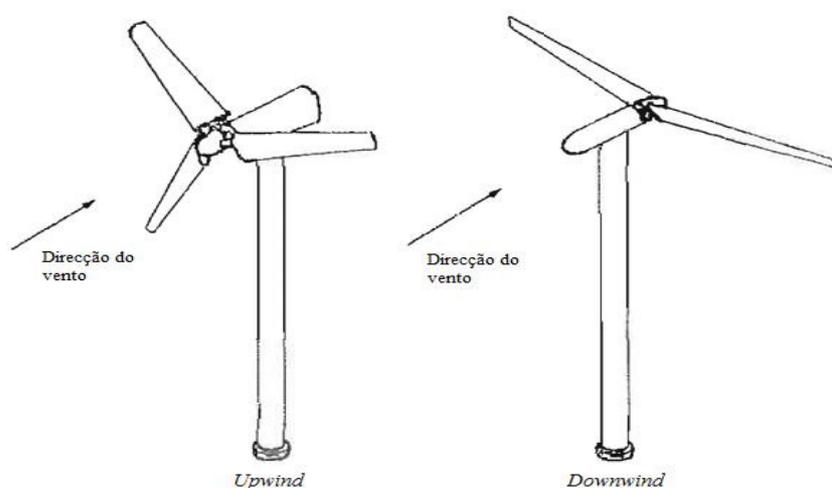


Fig. 16 – Turbinas de eixo horizontal com orientação do rotor, a *upwind* e a *downwind*
[Fonte: adaptado de Manwell *et al*, 2002]

Quando o vento é inconstante (como são tipicamente os ventos urbanos), sem uma direcção estável, a turbina reduz fortemente o seu rendimento, pois tem de se estar sempre a orientar na direcção dominante do vento, sendo igualmente sujeita a uma solicitação mecânica superior. Já as turbinas de eixo vertical são mais adequadas para ventos sem direcção bem definida visto que apresentam insensibilidade à direcção do vento dispensando um mecanismo de orientação direccional, embora nunca atinja um rendimento tão elevado como a de eixo horizontal.

Actualmente a energia produzida através destas micro-turbinas poderá ter diversas aplicações, como seja para produção local, para alimentação de cargas isoladas ou para alimentar baterias, pilhas de combustível ou outros sistemas de armazenamento de energia. Embora não exista uma definição específica sobre o que são as micro-turbinas eólicas muitos concordam como classificação apropriada que, turbinas até 1 kW tipicamente instaladas em torres de 10-20 metros sem sistemas de orientação sofisticados são

¹ Rotor – consiste na cabeça e pás da turbina eólica. Maioria das turbinas possui um rotor *upwind* com três pás

consideradas como “minis” ou “micro”, turbinas com potência variável entre 1 e 30 kW instaladas em torres de 24-43 metros denominam-se como “pequenas” e turbinas eólicas de 30 a 300 kW tipicamente instaladas de 24-50 metros são consideradas as “médias” [CWEA, 2006]. Toda esta classe de turbinas é comumente designada na literatura anglo-saxónica por SWT - *small wind turbines*.

As actuais SWT tiveram a sua origem com a génese da tecnologia eólica, já que as primeiras turbinas construídas na Dinamarca há mais de um século (e.g. turbinas Gedser) e as primeiras turbinas produzidas industrialmente (e.g. turbina Jacobs) enquadravam-se nesta classificação actual [Wind Energy Guide Tour, 2009].

As SWT caíram em desuso na Europa, onde nas últimas décadas se assistiu, quase exclusivamente à instalação de máquinas de dimensão crescente e, quase sempre, superior a 500 kW. Já nos Estados Unidos da América, pioneiros no desenvolvimento e produção em massa deste tipo de turbinas em meados do séc. XX (tendo surgido antes da electrificação rural como carregadores de baterias) verificou-se uma manutenção do interesse por estas tecnologias de menor dimensão, que se encontram em operação ao longo do continente americano em ranchos e quintas, muitas vezes em aplicações isoladas da rede.

Uma micro-turbina eólica poder-se-á considerar tecnologicamente avançada mas é muito simples a nível mecânico consistindo em apenas duas ou três pás¹, um gerador solidário com o eixo de rotação e um leme de orientação. O gerador converte a energia mecânica disponível em energia eléctrica e poderá ser síncrono ou assíncrono. O gerador assíncrono, também denominado de gerador de indução, é a opção mais utilizada pelos fabricantes quando a velocidade de rotação é praticamente constante, devido à sua simplicidade, robustez, e, conseqüentemente, ao seu baixo preço. O gerador síncrono está indicado para turbinas com velocidade de rotação variável e permite uma performance superior a baixas velocidades do vento. O leme de orientação permite que o rotor fique alinhado com a direcção do vento, de modo a extrair a máxima energia possível. A tecnologia actual avançou de tal forma nos últimos anos que possibilita a existência de micro-turbinas mais silenciosas, mais fiáveis e esteticamente mais agradáveis.

As micro-turbinas pelas suas dimensões e características possuem uma adaptabilidade mais flexível a determinados locais ou necessidades de produção eléctrica. Contudo esses novos locais poderão ser locais fortemente influenciados por turbulência pelo que é essencial uma correcta avaliação do local quer em termos de disponibilidade de recurso eólico, quer em termos de obstáculos.

Existem ainda, várias barreiras para uma larga procura e comercialização das micro-turbinas eólicas no futuro. Embora cada vez mais a sociedade procure um crescimento sustentável com a integração de

¹ Existem ainda micro-turbinas eólicas de uma pá apenas, no entanto são menos comuns.

energias limpas no seu dia-a-dia, as micro-turbinas eólicas representam ainda elevado peso económico para a maioria da população. O custo dos sistemas eólicos poderá no entanto diminuir no futuro, através de um aumento da procura e consequentemente da diminuição dos custos de produção. Os, já existentes, incentivos para a aquisição deste tipo de sistemas contribuem também para uma redução do esforço financeiro dos investidores domésticos na instalação destes equipamentos.

É relevante melhorar a fiabilidade e durabilidade das micro-turbinas assim como reduzir as necessidades de manutenção das mesmas, dado que a turbulência resultante da presença de obstáculos vai influenciar fortemente o desgaste mecânico dos sistemas eólicos.

5.2. A energia eólica em ambiente urbano

Os efeitos que as estruturas fixas provocam no comportamento dos ventos tem vindo a tornar-se uma questão relevante, nos últimos anos. O crescimento e densificação da malha urbana, assim como as novas arquitecturas dos edifícios, impõem importantes alterações ao movimento das massas de ar. Estas alterações são cada vez mais estudadas não apenas numa perspectiva da energia eólica mas principalmente na perspectiva da dispersão de poluentes em meios urbanos.

Hang *et al* [2009], estudaram vários modelos idealizados de malhas urbanas, com diferentes formas e densidades de edifícios, com o objectivo de perceber qual a relação entre a morfologia urbana e as condições de vento no seu interior, na dispersão da poluição urbana e melhorar a qualidade do ar nas ambientes urbanos. Os investigadores concluíram que a morfologia da cidade conjuntamente com o vento incidente gera diferentes padrões de escoamento em torno da malha urbana.

Os edifícios são responsáveis por um diverso número de efeitos no clima em geral, sendo que os principais são os efeitos radiativos, térmicos e aerodinâmicos. Os efeitos radiativos estão associados a sombreamentos impostos pelos edifícios pois na proximidade destes a temperatura do solo e do ar são normalmente mais elevadas devido às perdas de calor resultante dos edifícios e também a zonas de abrigo de ventilação natural.

A maior influência verifica-se, contudo, nos efeitos de escoamento de ar na vizinhança de um edifício. O fluxo de ar em torno de um edifício nunca é uniforme nem constante, pois depende das características do vento incidente e da morfologia do edifício, quer em tamanho quer em forma (arquitectura). Quando o vento atravessa um edifício e/ou outros obstáculos num ambiente urbano, o escoamento é distorcido produzindo turbulência. Exemplos deste tipo de perturbações ao escoamento são ilustradas nas Figura 17 e Figura 18.

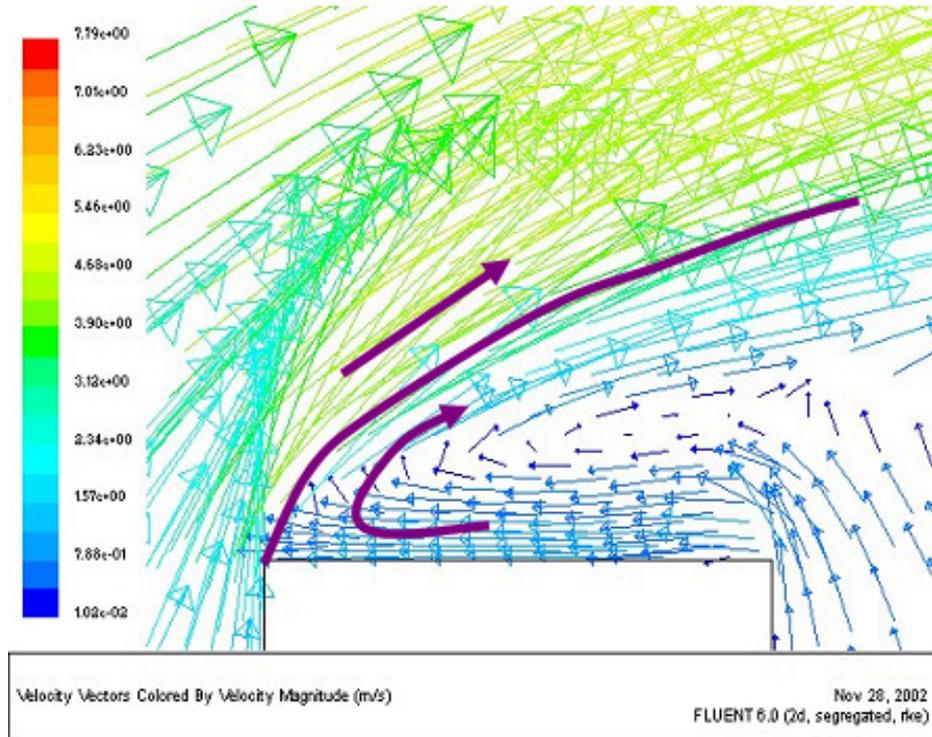


Fig. 17 – Escoamento do vento em torno de um edifício
[Fonte: CWEA, 2006]

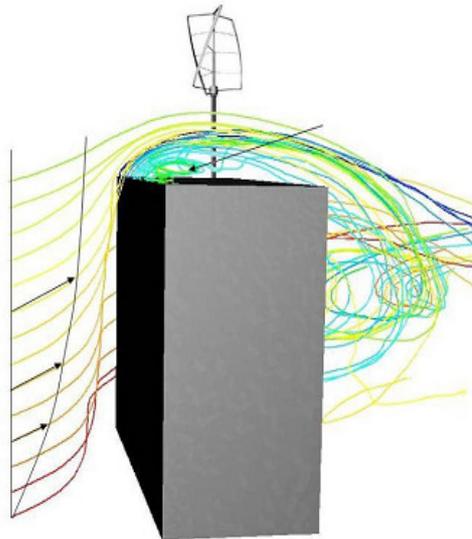


Fig. 18 – Esquema ilustrativo de uma micro-turbina no topo de um edifício urbano
[Fonte: CWEA, 2006]

Na Figura 17 é possível visualizar lateralmente o topo de um edifício de forma rectangular, onde a intensidade do vento é identificada pela dimensão das setas, ou seja, quanto maior a seta maior será a velocidade. As setas com a cor azul-escuro representam os ventos mais fracos enquanto que as setas com a cor amarela identificam os ventos mais fortes e com uma direcção relativamente constante. Na Figura 18 demonstra-se a altura relativa a que uma turbina deve ser colocada de forma a evitar a maior turbulência imposta pelo edifício, altura essa que deverá ser superior à zona dos turbilhões.

Em 2009, Lu e Ip com base em três cenários distintos simularam os efeitos na velocidade do vento e na turbulência. Um dos cenários simulados baseava-se em dois edifícios idênticos com as dimensões 25m x 25m x 70m a uma distância de 15 metros entre eles. O resultado das simulações para o referido cenário encontra-se ilustrado nas seguintes figuras, Figura 19 e Figura 20.

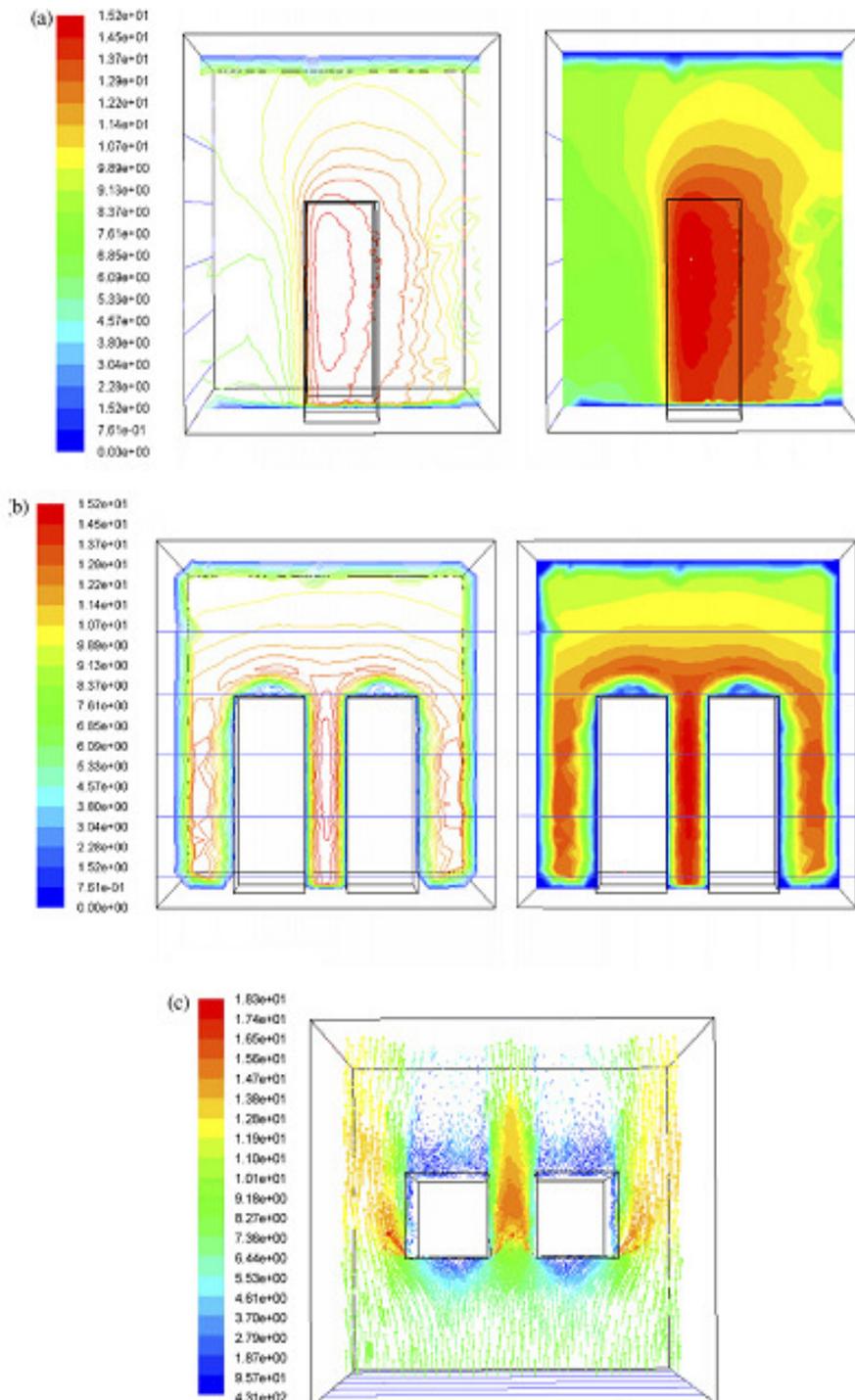


Fig. 19 – Simulação da velocidade do vento (m/s): (a) vista lateral; (b) vista frontal; (c) vista de cima [Fonte: Lu e Ip, 2009]

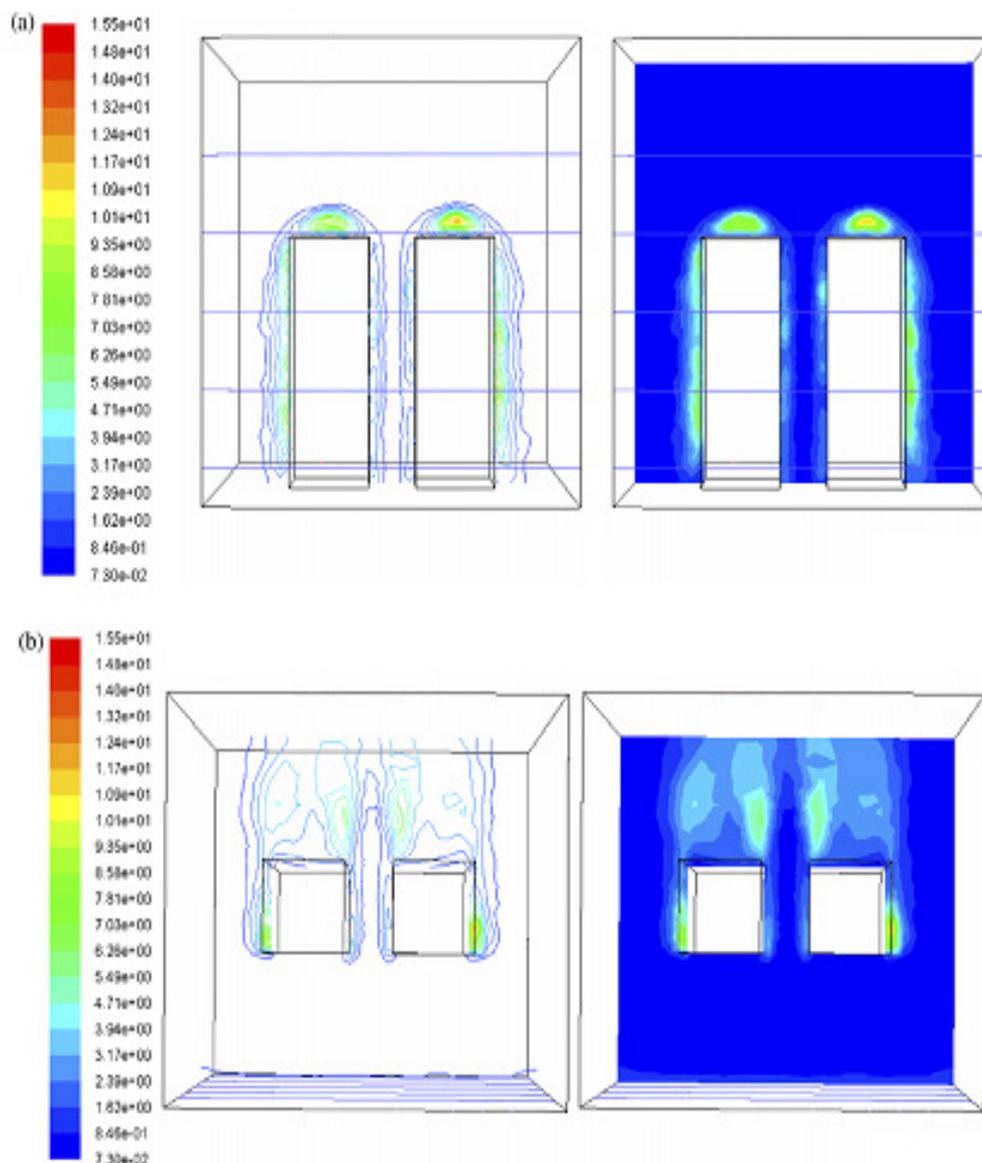


Fig. 20 – Simulação da turbulência (m^2/s^2): (a) vista frontal; (b) vista de cima
[Fonte: Lu e Ip, 2009]

Lu e Ip [2009] concluíram que quer o efeito concentrador quer a altura dos edifícios, poderá otimizar a utilização da energia eólica em meios urbanos. Segundo os resultados obtidos, os investigadores defendem que a energia eólica será uma opção para edifícios altos, dado que é possível um aumento de 1,5–2 vezes na velocidade do vento o que poderá conduzir a uma produção energética 3-8 vezes superior, sob as condições utilizadas para as simulações.

No entanto, quando se pretende instalar uma micro-turbina eólica em ambiente urbano, existem alguns requisitos que devem ser cumpridos, à partida, para que seja possível obter o máximo proveito do sistema. As micro-turbinas devem ser, preferencialmente, colocadas em edifícios com um telhado ou terraço plano

e a escolha do modelo a instalar deve merecer alguma atenção para que possua as características que melhor se adaptam ao edifício ou ao local.

Dever-se-á investigar se tanto o edifício como a sua envolvente são adequados para a implantação de um sistema eólico. Dever-se-á ainda ter algum cuidado com os aspectos estéticos do edifício, pois uma turbina deve ser integrada com alguma preocupação estética para que se possa considerar como parte integrante quer do edifício quer da zona envolvente.

Devido à forte influência dos edifícios vizinhos, é importante colocar a micro-turbina eólica no ponto mais alto possível, pois a velocidade do vento aumenta com a altura e apenas um ligeiro aumento na velocidade do vento representa um significativo aumento no potencial de geração de energia de uma turbina, como se pode observar na Figura 21.

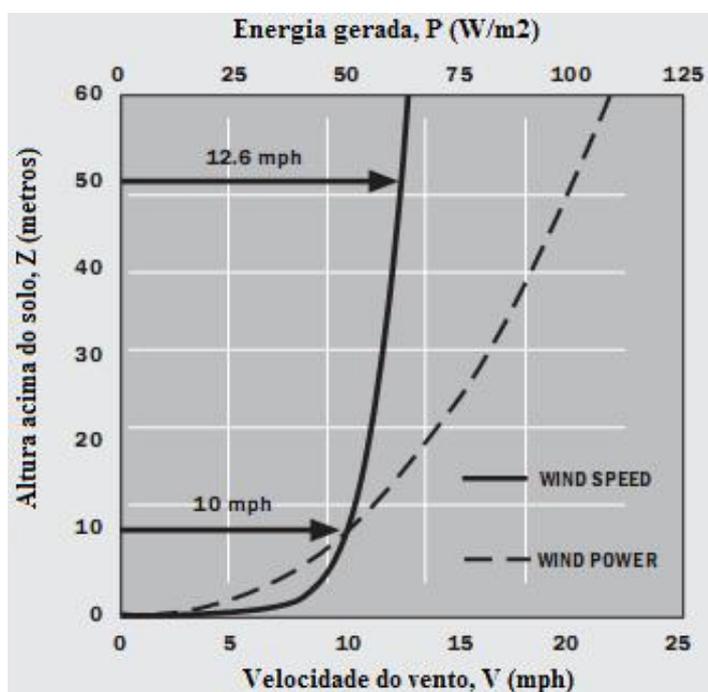


Fig. 21– Perfil típico da velocidade do vento em função da altura acima do solo, com a energia gerada pelo vento em cada unidade de área

[Fonte: adaptado de Asmus et al, 2003]

De referir ainda que é importante garantir que existe uma distância suficiente dos outros edifícios para que haja suficiente recurso energético. Dependendo de apenas alguns metros de distância aos obstáculos ou alguns metros de diferença em altura, a produção energética poderá ser maior ou menor. Em geral, quanto mais alta estiver a turbina melhor será o seu desempenho.

Segundo a Canadian Wind Energy Association (CWEA), existem algumas regras que devem ser seguidas relativamente á escolha do local de implantação de uma micro-turbina, para que se possa ter um projecto bem sucedido:

1. A média anual da velocidade do vento no local deve ser, pelo menos, 5,5 m/s;
2. A cota da torre, cobertura ou telhado deve ser, aproximadamente, 50% mais elevado do que os obstáculos envolventes;
3. As turbinas devem ser posicionadas perto do centro do telhado;
4. As turbinas devem ser posicionadas no lado da direcção do vento predominante;
5. O ponto mais baixo do rotor tem de se localizar acima do telhado e a uma altura correspondente, pelo menos, a 30% da altura do edifício;
6. Se possível, assegurar que a orientação do edifício é no sentido da direcção do vento predominante, de acordo com a rosa-dos-ventos do local;
7. Assegurar que a cobertura/telhado pode resistir às forças estáticas e dinâmicas produzidas pelas turbinas eólicas no local de fixação/amarração;
8. Assegurar que a energia produzida corresponde às necessidades energéticas do local;
9. Assegurar a viabilidade do projecto antes da colocação das turbinas;
10. Minimizar os efeitos de sombra, de ruído e de vibração resultantes das turbinas;
11. Assegurar a aceitação das turbinas pela comunidade vizinha.

Existem ainda outros pontos a considerar relativamente ao local onde se pretende colocar o sistema eólico, tais como, a existência de um acesso à turbina, a passagem do cabo que faz a ligação entre a turbina e o quadro de distribuição eléctrica, uma divisão para equipamento adicional (inversores, aparelhos de monitorização) e a ligação à rede eléctrica.

6. Metodologia de Avaliação do Potencial Eólico

Para garantir uma produção energética significativa é fundamental assegurar que o local de implantação do sistema eólico dispõe de recurso eólico suficiente e que garanta o retorno do investimento a efectuar. É imprescindível uma caracterização do local, o mais abrangente possível, com o intuito de clarificar qual a localização adequada à instalação de uma micro-turbina eólica, principalmente numa malha urbana.

Os investimentos em energia eólica devem, numa fase prévia, responder a duas questões fundamentais: onde instalar a turbina eólica e como avaliar o potencial eólico disponível. Para a escolha da localização é importante a existência de uma caracterização energética do escoamento atmosférico no local, o que nem sempre é fácil tecnicamente ou economicamente viável.

Idealmente, a quantificação do recurso eólico num determinado local deve ter como ponto de partida a realização de uma campanha experimental, ou seja, medições realizadas em vários pontos da zona envolvente e ao longo de um número significativo de anos. Na prática, a falta de tempo e de recursos económicos reduz esta campanha a um único registo medido ao longo de pelo menos um ano de dados consecutivos [Castro, 2003]. O período mínimo de tempo “exigido” deve-se à variabilidade sazonal do vento. O facto de o comportamento do vento também ser variável anualmente é também o motivo para a realização de campanhas mais longas.

A medição do vento é realizada com instrumentação específica: anemómetros e sensores de direcção. O anemómetro é o instrumento para medir a velocidade do vento. Os resultados das medições da velocidade média e da direcção do vento podem ser registados em tabelas ou gráficos de frequências.

Segundo Estanqueiro e Guerreiro [2002], a caracterização energética do escoamento atmosférico em cada local é feita, normalmente, através dos seguintes parâmetros:

- velocidade média do vento;
- perfis diários da velocidade do vento;
- fluxo de potência incidente;
- parâmetros da distribuição de Weibull (A, k);
- atlas de ventos locais;
- outros.

A estimativa de produção de energia com um aerogerador é obtida através de utilização do programa WAsP – *Wind Atlas Analysis and Application Program*. Para a estimativa de produção de energia o modelo baseia-se no método clássico de avaliação do potencial eólico com a distribuição de Weibull. A partir de um ficheiro de entrada com as medições da campanha experimental, obtém-se um atlas de vento que contém informação sobre a velocidade média do vento local, as distribuições por sectores e global da ocorrência de velocidade, dos parâmetros da distribuição de Weibull e do fluxo de potência incidente. Esta informação, conjuntamente com as características de uma turbina, permite estimar a energia passível de ser produzida por uma turbina no local.

Em ambiente urbano ou edificado, os obstáculos assumem um factor determinante no regime de ventos do local, dado que são os grandes responsáveis pelas alterações na direcção do vento e pela turbulência imposta. Em suma, no contexto urbano, o local de implantação da turbina torna-se especialmente importante, pois os padrões de vento comportam-se de forma diferencial em torno de edifícios ou de áreas com elevada densidade urbana (ver Figura 22).

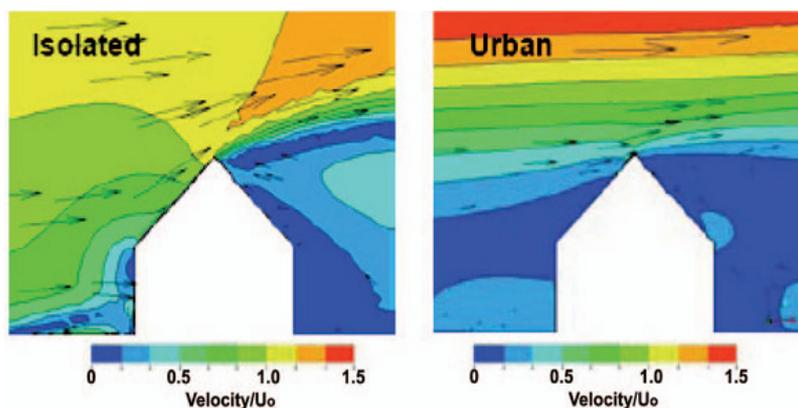


Fig. 22 – Comparação da disponibilidade de recurso eólico entre um edifício isolado ou um edifício localizado em ambiente urbano
[Fonte: Watson, S.J. in AWEA, 2008]

As condicionantes conhecidas e que devem ser levadas em linha de conta quando se pretende instalar uma micro-turbina eólica é que estas devem estar localizadas suficientemente acima do solo ou das coberturas dos edifícios, por forma a evitar a operação dos rotores nas zonas mais perturbadas pela existência de obstáculos.

Numa malha urbana e para uma correcta medição do vento, existem três factores-chave a analisar aquando da campanha experimental:

- Topografia – normalmente os pontos às cotas mais altas da área urbana estão associados a uma melhor disponibilidade de recurso eólico.
- Obstáculos – recomenda-se a instalação da turbina eólica a uma altura mínima acima de qualquer barreira física ao vento, num raio estipulado caso a caso, para evitar a turbulência.

- Ventos predominantes – o sistema eólico deve estar orientado por forma a que os ventos predominantes incidam sem a presença de barreiras a montante dessa orientação.

6.1. Pressupostos e objectivos da metodologia a desenvolver

A proposta do trabalho a desenvolver apontava para a criação de um site na Internet, no qual o futuro microprodutor poderia efectuar, sem apoio de técnicos especializados, a introdução de informação necessária à avaliação do potencial eólico disponível no local de instalação da micro-turbina. Essa informação consistiria essencialmente em:

- a. Localização GPS (Sistema de Posicionamento Global)
- b. Cota da cobertura/telhado
- c. Fotografia panorâmica da envolvente
- d. Caracterização da envolvente
- e. Identificação do Norte Geográfico na envolvente

Após a introdução da informação descrita e acedendo a um modelo de informação geográfica de classificação do local, o qual posteriormente consultaria a rede de estações do INETI para identificação de dados de vento na proximidade de local (por exemplo, Eolos – Base de Dados do Potencial Energético do Vento em Portugal) ou, na sua ausência, recorreria ao Atlas do Potencial Eólico de Portugal Continental e, com base no método a desenvolver no âmbito deste trabalho, indicaria ao investidor a estimativa de produção com uma turbina-tipo seleccionada, bem como a possível viabilidade económica da instalação, para o local proposto.

Sendo que o *webdesign* e a avaliação económica estão fora do âmbito desta dissertação, o trabalho desenvolvido centrou-se numa metodologia que permitisse – com base em dados experimentais de vento ou estatísticas obtidas à custa de Atlas nacionais ou regionais – calcular estimativas, ainda que muito aproximadas, da produção de sistemas eólicos em ambiente urbano.

A metodologia de avaliação do potencial eólico (ver Figura 23) para meio urbano desenvolvida com este trabalho assentou em dois pontos essenciais:

1. Na necessidade de uma metodologia que permitisse uma avaliação do potencial eólico, o mais próximo possível do local de instalação da micro-turbina e que, ao mesmo tempo, conseguisse transmitir uma aproximação realista da viabilidade técnica da instalação de uma micro-turbina eólica considerando a envolvente urbanizada.
2. A obtenção de uma metodologia que permitisse estabelecer uma análise e interpretação simples, expedita e de baixo custo para os potenciais futuros microprodutores, sem a intervenção de especialistas na matéria, por forma a obter um resultado imediato sobre a viabilidade da instalação de micro-turbinas eólicas, num determinado local.

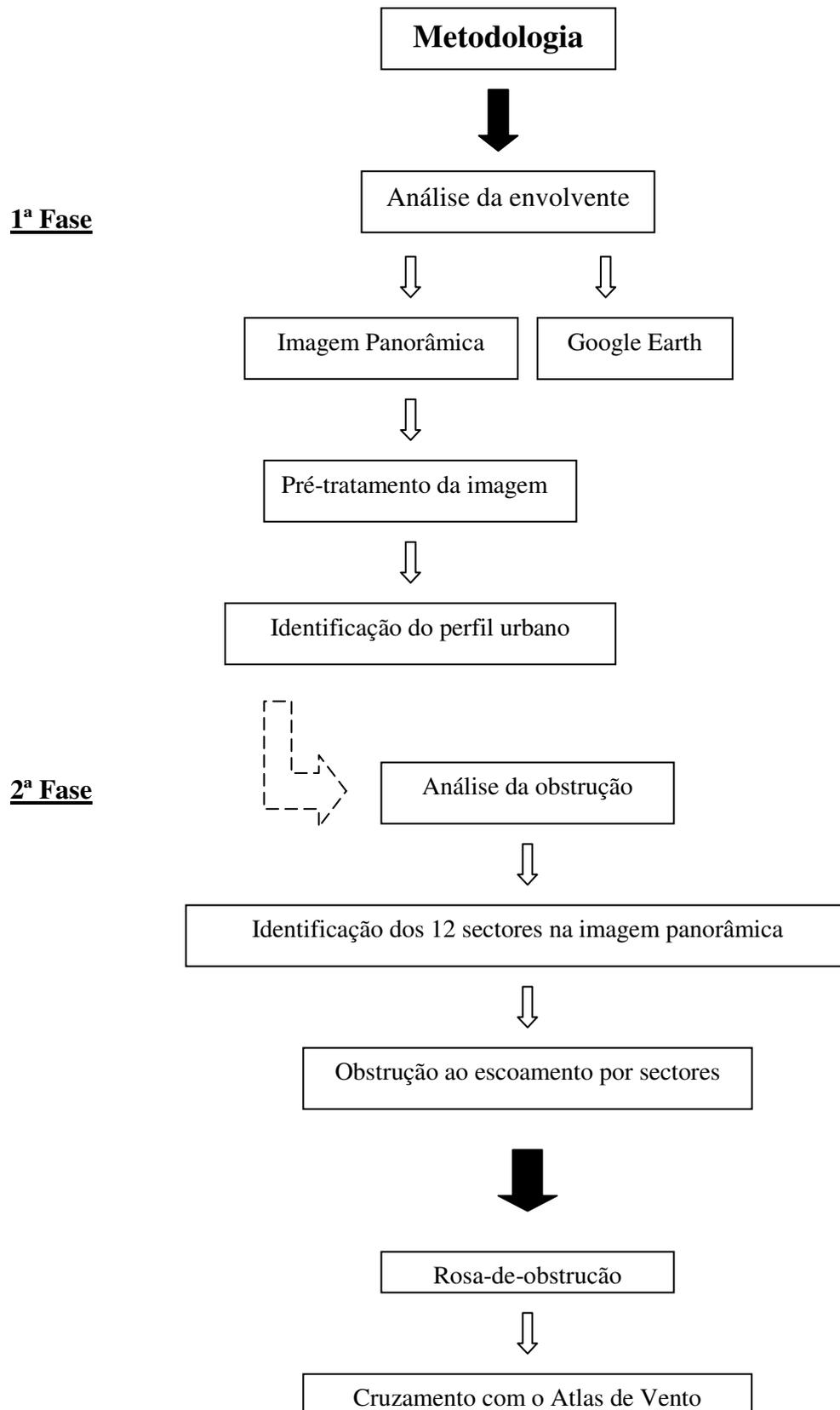


Fig 23 – Fluxograma da metodologia desenvolvida

A metodologia é composta por duas fases, uma primeira onde se pretende analisar a envolvente do local onde se pretende instalar a micro-turbina eólica com base em uma imagem panorâmica construída a partir de fotografias digitais. Desta primeira fase resulta uma identificação do perfil urbano envolvente, no qual os obstáculos estarão identificados pela cor preta enquanto que o céu estará representado a cor branca.

Na fase seguinte, pretende-se efectuar um cruzamento entre a análise do espaço físico do local com a informação disponibilizada sobre o recurso eólico nesse local, como por exemplo através do Atlas do Vento. O objectivo é perceber qual a obstrução existente ao escoamento atmosférico, imposta pelo perfil urbano envolvente.

Como resultado final pretende-se obter uma “rosa-de-obstrução”, com a identificação da redução percentual do recurso eólico, em cada um dos 12 sectores. Estipulou-se, para o desenvolvimento do trabalho, que para uma obstrução:

- > 50% - o recurso eólico deixa de estar disponível para produção energética;
- < 50 % - existe uma redução na ordem de grandeza da obstrução.

6.2. Modelos computacionais a utilizar

WASP - Wind Atlas Analysis and Application Program

Este programa, desenvolvido na Dinamarca, é uma ferramenta utilizada na indústria eólica para mapeamento do escoamento atmosférico do recurso eólico e estimativas da produção energética de turbinas eólicas ou parques eólicos.

As estimativas energéticas do escoamento atmosférico são obtidas em função de uma distribuição de probabilidade do vento – distribuição de Weibull – ajustada aos dados de vento monitorizados. A partir do ficheiro de entrada com os dados de vento é feita uma estimativa das características do regime de ventos corrigindo os dados dos efeitos da orografia, rugosidade e obstáculos no local através de submodelos que consideram as características do terreno que rodeia o mastro anemométrico e do terreno que caracteriza o local de interesse. Esta estimativa é feita para a altura do vento do gradiente. Por fim obtém-se um atlas de vento com a informação sobre a velocidade média do vento no local, as distribuições por sectores e global da ocorrência de velocidade, dos parâmetros da distribuição de Weibull e do fluxo de potência incidente [Estanqueiro e Guerreiro, 2002].

O modelo WASP contém modelos que se adaptam de forma aceitável ao tipo de terreno característico de Portugal, desde que sejam tomadas algumas precauções na sua aplicação. Salva-se a necessidade de, para determinadas características morfo-geológicas do terreno circundante, existir a necessidade da extensão das campanhas experimentais e de complementar os dados de vento com dados tridimensionais, ou mesmo a modelação física do terreno [Estanqueiro e Guerreiro, 2002].

MATLAB

O MATLAB é uma *package* destinada ao estudo de problemas científicos e de engenharia, ou, de uma forma mais geral, ao estudo de quaisquer problemas em que haja um trabalho computacional significativo a realizar que possa (ou deva) utilizar matrizes. É um programa produzido pela companhia americana The Math Works, Inc e o seu nome deriva do inglês “*matrix laboratory*”.

Este programa trabalha com matrizes quadradas ou rectangulares, com elementos reais ou complexos e derivou dos projectos LINPACK e EISPACK que são considerados como a origem do melhor *software* numérico disponível para computação com matrizes. Para além da manipulação fácil de matrizes, a *package* permite o acesso a um número crescente de rotinas incorporadas, potencialidades gráficas a 2 e 3 dimensões e a possibilidade de configurar o programa às necessidades de cada utilizador.

Integra uma análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente que se pretende fácil de utilizar e onde os problemas e soluções são expressos somente como são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional.

O MATLAB possui um conjunto de funções para manipulação e visualização de imagens a cores. As imagens são representadas sob a forma de matrizes. As imagens são representadas sob a forma de matrizes. No caso de imagens só com níveis de cinzento, estas podem ser armazenadas numa matriz bidimensional em que cada elemento representa o nível de cinzento.

Google Earth

O Google Earth [2010] é um software desenvolvido e distribuído pela empresa americana Google com o objectivo de apresentar um modelo tridimensional do globo terrestre, construído a partir de fotografias de satélite ou imagens aéreas e um sistema de informação geográfica (GIS) tridimensional.

Microsoft Paint

O programa Microsoft Paint [2010] é um *software* utilizado para a criação de desenhos simples a partir de ferramentas básicas mas também pode ser aplicado para a edição de imagens. O programa está incluído, como um acessório, no sistema operacional Windows, da Microsoft. É um programa muito utilizado para a criação de “*Pixel art*”, ou seja, a arte de criar uma imagem pixel-a-pixel (ou imagem *raster*), já que possui boas e práticas ferramentas para edição em pequena escala.

Autostich

Este é um programa para a obtenção de imagens panorâmicas tendo como ponto de partida várias fotografias digitais obtidas com uma câmara digital vulgar. É um programa desenvolvido por Matthew

Brown [Autostitch, 2009] e dispõe de uma versão gratuita e demonstrativa que pode ser descarregada pela internet.

6.3. Análise da envolvente

Uma imagem digital pode ser expressa pela função $f(x, y)$ que representa uma intensidade de luz no espaço bidimensional. Existem dois tipos fundamentais de imagem digital, a imagem *raster* e a imagem vectorial. A primeira, é a representação bidimensional de uma imagem como um conjunto finito de pontos definidos por valores numéricos, formando uma matriz matemática ou malha de pontos, onde cada ponto é um pixel, ou seja, *picture element*.

Cada ponto de uma imagem é decomposto numa gama tripla de cores no modelo conhecido como RGB (Red-Green-Blue), onde se estabelece para cada uma dessas cores um valor entre o máximo possível de reprodução daquela cor e o mínimo, ou seja, a ausência total dela.

A soma dos três valores resulta num ponto colorido da imagem final. Na escala de cinzentos a função f é discretizada em termos de intensidade de luz, onde o valor máximo (255) corresponde ao branco e o valor mínimo (0) corresponde ao preto.

Uma particularidade da imagem *raster* é que, ao se aumentar as dimensões da imagem os pixels distribuem-se por uma área maior e como tal tornam a imagem mais indefinida, perdendo definição. Assim a qualidade de uma imagem digital depende de dois aspectos, a quantidade de pixel por polegada (*dots per inch* - DPIs), ou seja, a resolução da imagem, e ainda do número de pixel na horizontal e na vertical (tamanho da imagem). Tipicamente, as imagens *raster* são imagens fotográficas enquanto que as imagens vectoriais são desenhos técnicos de engenharia.

O primeiro passo para a metodologia de análise da envolvente, consistirá na reprodução digital da zona urbana existente na vizinhança do local de implantação do sistema eólico. Essa reprodução digital terá por base as seguintes considerações:

- uma fotografia panorâmica que deverá ser obtida num dia de céu limpo, numa hora perto do meio-dia, pois é quando o Sol está mais elevado e não afecta tanto a luminosidade da fotografia.
 - Dever-se-á captar as fotografias suficientes que permitam uma construção da imagem panorâmica com qualidade suficiente para análise, ou seja, que se obtenha uma faixa com largura suficiente para captar o nível do topo do telhado/terraço e a linha de horizonte do céu, sempre que possível.
- a captação das fotografias deve incluir um factor de escala que permita obter valores de distância horizontal e vertical dos obstáculos existentes na envolvente.

- a identificação do Norte Geográfico no horizonte da fotografia deverá ser feito com base num ponto visual de referência.
- a construção de uma imagem panorâmica, a qual foi realizada com a ajuda do programa Autostitch mas poderá ser feita com a ajuda de um qualquer programa de tratamento de imagem (por exemplo, Adobe Photoshop ou GIMPS).
- é ainda importante uniformizar os tons de azul do céu pois as diferentes luminosidades existentes podem induzir erros aquando do processamento da imagem, e ainda delimitar o perfil urbano a preto, com a ajuda do Microsoft Paint.

O factor de escala e a utilização do Google Earth têm como objectivo a identificação dos obstáculos com dimensão relevante para obstruírem o escoamento atmosférico. Dado o interesse em analisar apenas a perfil urbano com incidência ao nível da altura do rotor da micro-turbina eólica, considera-se 10 metros como a altura mínima do torre na qual deverá estar colocada a turbina.

Após o processamento da imagem tem-se o *input* para o algoritmo do MATLAB (ver Anexos) o qual transforma a imagem segundo o ilustrado na Figura 24:

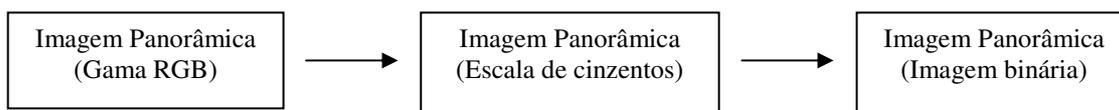


Fig. 24 – Processamento da imagem panorâmica pelo algoritmo MATLAB

Uma imagem binária é uma imagem digital na qual existem apenas dois valores possíveis para cada pixel, o valor 0 como preto e o valor 1 como branco. O algoritmo impõe uma reclassificação dos pixéis, segundo um valor de referência de pixel que identifica o céu. Em grosso modo, toda a imagem panorâmica será reclassificada com base na comparação de cada um dos pixéis com o “pixel céu”. Caso o pixel comparado apresente semelhanças ao “pixel céu” o mesmo terá o valor 255 e a cor branca. Todos os pixéis diferentes do “pixel céu” serão reclassificados como obstáculo e consequentemente identificados com o valor 0, que corresponderá ao preto.

6.4. Análise da obstrução

Nesta metodologia o que se pretende é analisar a panorâmica do perfil urbano, por sectores. No final pretende-se obter uma rosa-de-obstrução com os valores percentuais da redução imposta à velocidade do escoamento atmosférico pelas obstruções.

Ao *output* resultante da análise da envolvente impõem-se uma dimensão de forma a facilitar a divisão pelos doze sectores. A dimensão a impor será de 1200 x 200 pixéis, ficando a imagem panorâmica com um total de 20.000 pixéis.

Tabela 4 – Identificação dos sectores correspondentes a cada intervalo de pixéis definidos para a imagem panorâmica

Sectores	Intervalos de pixéis
0°	1 - 100
30°	101 - 200
60°	201 - 300
90°	301 - 400
120°	401 - 500
150°	501 - 600
180°	601 - 700
210°	701 - 800
240°	801 - 900
270°	901 - 1000
300°	1001 - 1100
330°	1101 - 1200

É nesta fase que se identifica o Norte Geográfico através do ponto visual na imagem panorâmica. A partir do Norte Geográfico (0°) dá-se início à separação sectorial e a consequente contabilização da percentagem de obstrução. Esta percentagem por sector obtém-se através da razão entre pixéis pretos e o total de pixéis do sector, de acordo com a seguinte expressão:

$$Obstrução(\%) = \frac{Px_{pretos}}{Px_{total}} \quad (6.1)$$

Tal como o algoritmo para a análise da envolvente também o algoritmo da análise da obstrução encontra-se disponível em Anexo.

7. Aplicação da metodologia em ambiente urbano

7.1. Considerações gerais para análise dos casos de estudo

O escoamento atmosférico, na presença de obstáculos, sofre um efeito de turbulência na zona circundante aos obstáculos. Esta turbulência influencia de forma significativa a velocidade e direcção do vento e como tal introduz um impacto no potencial eólico disponível, num determinado local. Quando se pretende um aproveitamento energético do recurso eólico é determinante analisar a turbulência imposta pelos obstáculos no escoamento atmosférico.

Tal como referido anteriormente, o resultado da quantificação física de um obstáculo como elemento perturbador do escoamento poderá ser expresso em termos percentuais [Manwel et al, 2002]. Em ambiente urbano e de acordo com a bibliografia, considerando um nível semelhante à altura de um edifício acima do nível médio do solo – hs –, a perda energética torna-se menor a jusante do edifício após uma distância igual a $15hs$.

Para a definição da zona de turbilhões resultante da presença de um edifício assumiu-se como condição que, quando a direcção do vento é perpendicular à fachada de um edifício, a altura da zona de turbilhões será cerca de 1,5 vezes a altura do edifício e o seu comprimento corresponderá a cerca de 3 vezes a altura da fachada localizada a barlavento [Hosker, 1979 *after* Plate, 1982]. A zona de turbilhões é obtida com base em hs e é caracterizada pela altura – H_{turb} – e pelo respectivo comprimento – L_{turb} .

Para efeitos de análise dos casos de estudo neste trabalho consideraram-se as seguintes premissas:

1. A altura do pé direito por piso – h_{piso} –, num prédio, é 2,8 metros.
2. O mastro para instalação da micro-turbina eólica tem uma altura – h_{mastro} – de 10 metros.
3. Para quantificação do efeito dos obstáculos, em ambiente urbano,

$$hs = (N^{\circ}_{pisos} \times h_{piso}) - (h_{mastro} + N^{\circ}_{pisos} \times h_{piso}) \quad (7.1)$$

4. Quando o comprimento da zona de turbilhões for negativo, ou seja,

$$L_{turb} = 3 \times hs < 0, \quad (7.2)$$

considera-se que o obstáculo não tem influência no escoamento.

Para a caracterização do escoamento atmosféricos utilizaram-se séries de dados obtidas através do Atlas do Potencial Eólico de Portugal, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). As séries de dados foram obtidas para uma altura de 80 metros acima do nível médio do solo e, no âmbito deste trabalho, posteriormente transpostas para a altura de estudo.

Uma análise como a que se pretende, não poderia assentar simplesmente no estudo dos ventos dominantes e da percentagem de obstrução, imposta pelo ambiente urbano. O ponto-chave directamente associado à viabilidade de um projecto de instalação de uma micro-turbina eólica, é o fluxo de potência incidente do recurso eólico disponível, na totalidade dos sectores. Este factor, normalmente expresso como um fluxo de potência em função da área varrida pelas pás da micro-turbina (W/m^2), ou seja, para além da velocidade média do vento depende ainda do tipo de turbina a instalar. Este será assim um ponto indispensável para uma melhor percepção da viabilidade de um sistema eólico em meio urbano e como tal é importante obter o fluxo de potência sem a influência da obstrução e posteriormente, considerando a influência da obstrução.

O fluxo de potência do vento disponível num intervalo de tempo T é dado pela seguinte equação:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (7.3)$$

onde ρ representa a densidade do ar, com o valor $1,225 \text{ kg/m}^3$ e u é a velocidade média do vento.

No LNEG foi desenvolvida a primeira micro-turbina eólica portuguesa para ambientes urbanos e para uso doméstico, denominada T.Urban. Esta micro-turbina possui uma potência nominal de 2,5 kW e as suas características técnicas encontram-se na Tabela 5.

Tabela 5 – Características da micro-turbina eólica T.Urban
(Fonte: adaptado de EMINENT2, 2009)

Potencia Nominal	2,5kW
Diâmetro do rotor	2,3 metros
Velocidade de vento “cut-in”	3,5 m/s
Velocidade de vento “cut-out”	25 m/s

7.2. Caso de Estudo 1: Edifício habitacional com 2 pisos

7.2.1. Caracterização física

O primeiro caso de estudo, que daqui em diante será denominado Faro1, é uma cobertura plana de um edifício habitacional com dois pisos localizado no centro da cidade de Faro e com as coordenadas GPS $37^\circ 0' 53,20'' \text{ N}$ e $7^\circ 55' 48,49'' \text{ W}$. Na sua envolvente foram identificados quais os edifícios vizinhos com maior potencial de obstrução ao escoamento atmosférico, tendo-se considerado cinco como os pontos críticos (ver Figura 26):

- i. Edifício com quatro pisos, identificado com o número 1
- ii. Edifício com seis pisos, identificado com o número 2
- iii. Edifício com cinco pisos, identificado com o número 3

- iv. Edifício com sete pisos, identificado com o número 4
- v. Edifício com cinco pisos, identificado com o número 5.

De acordo com as premissas referidas anteriormente, a envolvente foi analisada através do cálculo do h_s para cada ponto crítico e posterior cálculo da respectiva zona de turbilhões. Na Figura 25 foi ainda caracterizada a zona de turbilhões, dos dois pontos considerados como mais relevantes para a obstrução ao escoamento, através de um círculo no qual o raio corresponde a L_{turb} . O círculo vermelho identifica a localização do edifício habitacional em estudo.

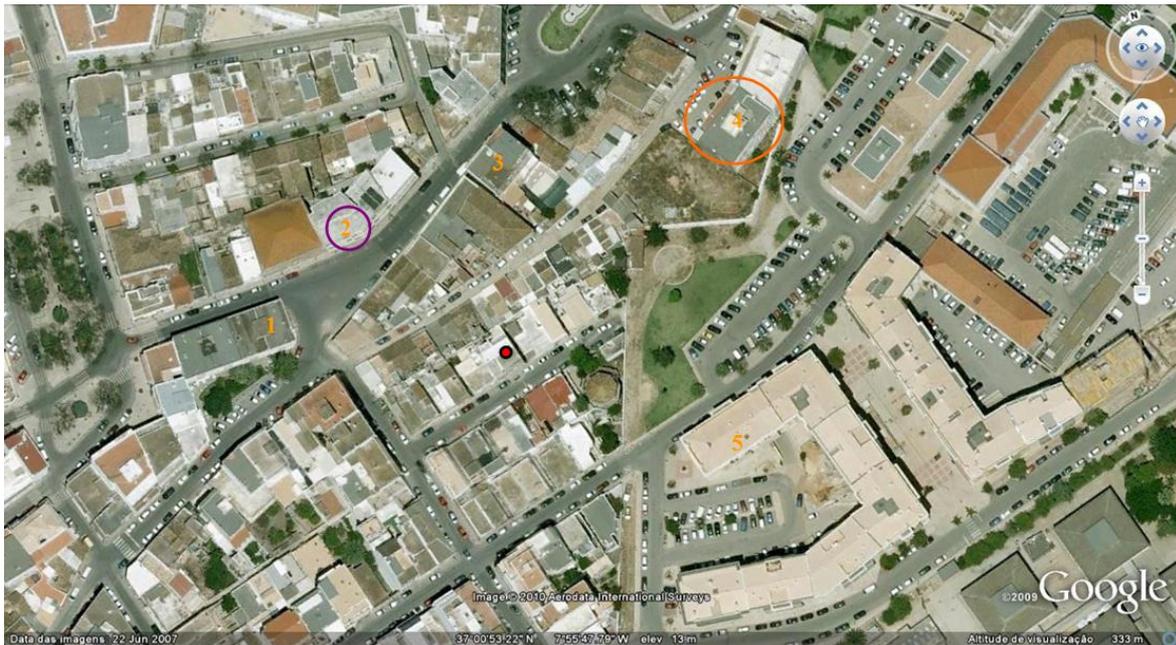


Fig. 25 – Análise da envolvente da localização Faro1

7.2.2. Aplicação da metodologia

Na Figura 26 encontra-se a montagem da imagem panorâmica obtida através de várias fotografias digitais e do programa Autostich.

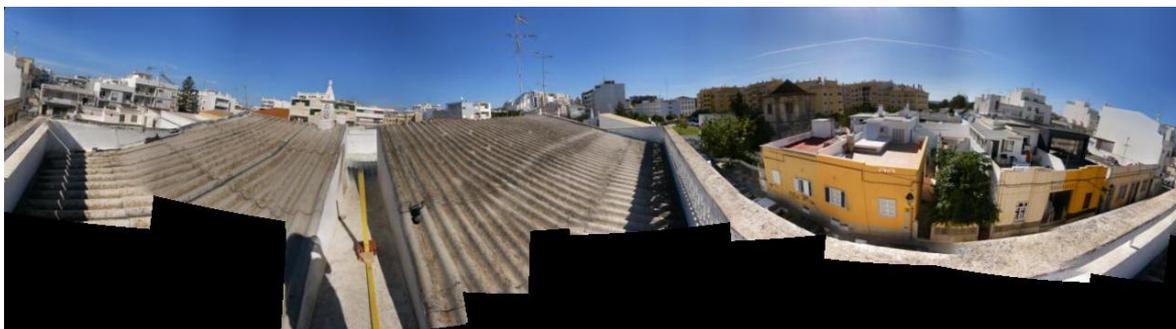


Fig. 26 – Imagem panorâmica (Faro1) montada a partir de diversas imagens digitais.

Seguidamente, a imagem panorâmica foi recortada pela altura aproxima de 15 metros (ver Figura 27), correspondente à altura do edifício mais a altura do mastro de micro-turbina eólica. No Microsoft Paint, uniformizou-se o tom do céu e delimitou-se a preto o perfil urbano, como demonstrado na Figura 28.



Fig. 27 – Imagem panorâmica recortada, para Faro1.



Fig. 28 – Imagem panorâmica, de Faro1, após pré-tratamento no programa Microsoft Paint

No final da primeira fase da metodologia, obteve-se a Figura 29.



Fig. 29 – *Output* da 1ª fase da metodologia

Ao avançar para a segunda fase da metodologia foi necessário identificar o ponto do Norte Geográfico para que se desse início à divisão pelos 12 sectores. O Norte Geográfico é identificado ao clicar no pixel que corresponde ao ponto visual de referência para este ponto e como tal, será uma aproximação. Na Figura 30 tem-se o Norte Geográfico para o caso de estudo em análise.



Fig. 30 – Identificação do Norte Geográfico, no Faro1

Após a aplicação da metodologia de obstrução, os valores percentuais obtidos para os doze sectores encontram-se na Tabela 6, enquanto que a rosa-de-obstrução construída observa-se na Figura 31.

Tabela 6 – Valores percentuais de obstrução por sector, para Faro1

Sectores (°)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Obstrução (%)	3,5	17,2	16,9	3,4	3,3	0	11,3	14,9	3,9	0,1	0,9	9,1

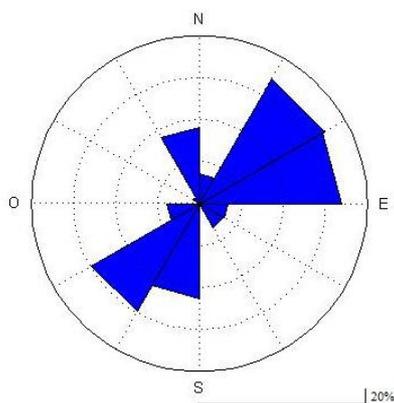


Fig. 31– Rosa-de-obstrução obtida pela metodologia, para Faro1

7.3. Caso de Estudo 2: Edifício de serviços com 5 pisos

7.3.1. Caracterização física

O segundo caso de estudo, que será denominado Faro2, localiza-se também na cidade de Faro e tem como localização GPS as coordenadas $37^{\circ} 1' 18,58''$ N e $7^{\circ} 55' 38,38''$ W. Situa-se numa zona mais recente, onde os edifícios na envolvente já possuem mais pisos. Como pontos críticos foram identificadas duas situações (ver Figura 32), as quais foram analisadas tal como anteriormente:

- i. Edifício com doze pisos, identificado com o número 1
- ii. Edifício com nove pisos, identificado com o número 2



Fig. 32 – Análise da envolvente da localização Faro2

7.3.2. Aplicação da metodologia

Tal como no caso de estudo anterior, seguiram-se os mesmos procedimentos, pelo que na Figura 33 tem-se a imagem panorâmica obtidas para o local, que posteriormente foi recortada e pré-processada no Microsoft Paint (ver Figura 34 e Figura 35).



Fig 33 - Imagem panorâmica de Faro2 montada a partir de diversas imagens digitais.



Fig. 34 – Imagem panorâmica recortada, para Faro2



Fig. 35 – Imagem panorâmica processada, para Faro2

No final desta fase da metodologia, o *output* da imagem panorâmica encontra-se na Figura 36.



Fig. 36 – *Output* da 1ª fase da metodologia, para Faro2

Novamente, para Faro2, assinala-se o Norte Geográfico tendo por referência um ponto visual, como observado na Figura 37.



Fig. 37 – Identificação do Norte Geográfico, para Faro2

Na Tabela 7 e na Figura 38, encontra-se caracterizada a obstrução ao escoamento presente em cada sector.

Tabela 7 – Valores percentuais de obstrução por sector, para Faro2

Sectores (°)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Obstrução (%)	16,0	22,2	15,7	12,9	7,7	22,8	21,2	11,5	18,6	14,8	7,6	17,7

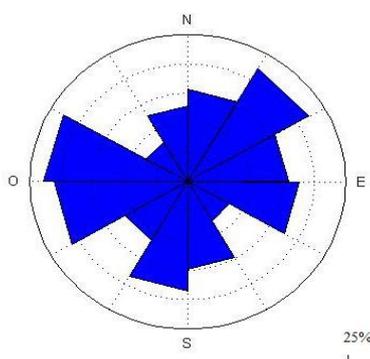


Fig. 38– Rosa-de-obstrução obtida pela metodologia, para Faro2

7.4. Discussão dos resultados

De acordo com o referido anteriormente se a obstrução no total dos sectores fosse superior a 50%, o recurso eólico deixa de estar disponível para produção energética. Através da Equação 6.1 e com base nas percentagens de obstrução por sector, foi obtida a percentagem de obstrução total, a qual foi de 7% para Faro1 e de 16% para Faro2. Desta forma pode-se considerar que ambas as localizações apresentam disponibilidade de recurso eólico para uma futura produção energética, embora o edifício de serviços localizado em Faro 2 apresenta mais obstrução ao escoamento atmosférico na sua envolvente.

Os dados do Atlas do Potencial Eólico de Portugal foram introduzidos no modelo WAsP com vista à obtenção da estimativa do recurso eólico. Devido à proximidade dos dois casos de estudo a informação do modelo é igual para ambas as localizações. Os valores estimados pelo WAsP relativamente à velocidade média, à frequência de ocorrência e ao fluxo de potência encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores médios obtidos através do WAsP

Sectores	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	Total
u (m/s)	5,17	5,28	6,25	6,22	4,87	4,33	5,12	6,58	6,78	6,46	4,88	5,08	5,73
P (W/m²)	133	157	223	283	179	212	337	371	513	293	120	122	224
F (%)	11	11	13	12	4	1	2	3	8	10	13	12	100

A rosa-dos-ventos obtida pelo modelo encontra-se na Figura 39.

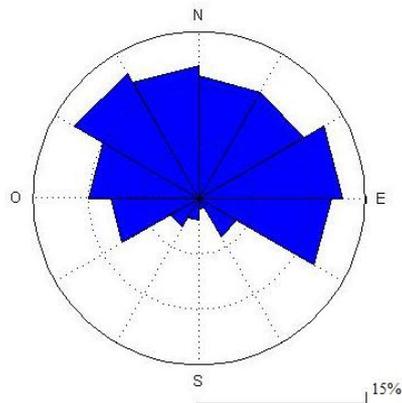


Fig. 39 – Rosa-dos-ventos obtida pelo modelo WASP

No Figura 40, pretende-se analisar em conjunto as rosas-de-obstrução obtidas e a rosa-dos-ventos para a localização considerada. É claramente visível que Faro 2 apresenta maior obstrução nos sectores a Norte, sectores esses que são também os que apresentam os ventos mais frequentes. Também se pode verificar que a intensidade das obstruções é mais significativa, em percentagem, no caso de estudo Faro 2 quando comparado com Faro 1.

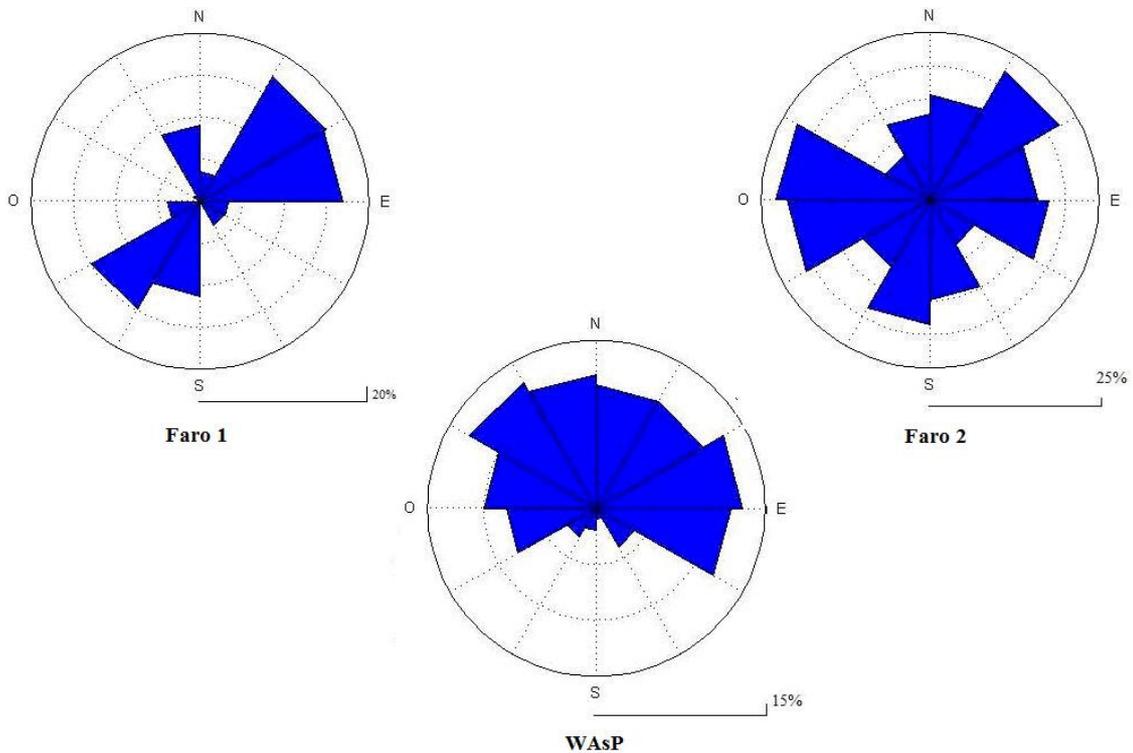


Fig. 40 – Rosa-dos-ventos obtida pelo WASP

A distribuição de *Weibull* obtida possui um factor de forma - k - de 1,97 e um factor de escala – A – igual a 6,5 m/s. O factor de forma é uma medida da qualidade do vento de um local. Quanto maior o seu valor mais a distribuição de frequências está “concentrada” em torno da velocidade com maior frequência de ocorrência. A densidade de probabilidade de ocorrência obtida para a localização em estudo encontra-se na Figura 41.

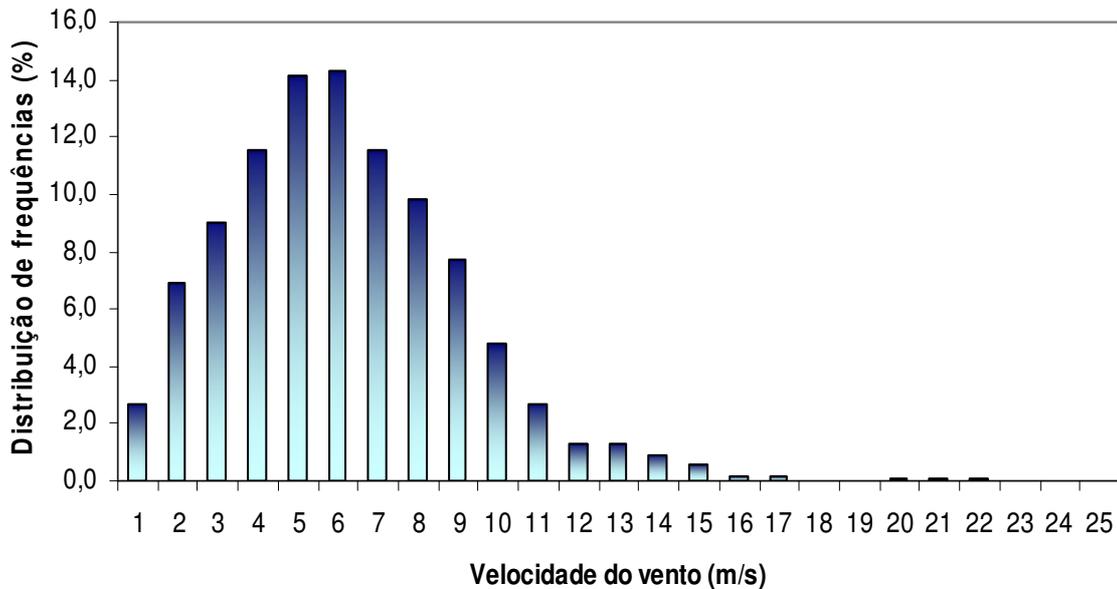


Fig. 41– Densidade de probabilidade de *Weibull* ($k=1,97$ e $A= 6,5\text{m/s}$)

Para a análise das obstruções, as velocidades médias consideradas foram as calculadas através da distribuição de *Weibull* e os valores obtidos são ligeiramente superiores às velocidades médias da Tabela 8. A percentagem de obstrução incide sobre o valor médio da velocidade do vento, por cada sector. Calculou-se ainda o fluxo de potência com base na Equação 7.3 para duas as situações possíveis, sem obstrução e com obstrução. Os resultados obtidos, por sector, e para cada um dos casos de estudo encontram-se na Tabela 9 e na Tabela 10.

Tabela 9 – Fluxo de potência incidente, em W/m^2 , com e sem obstrução, para Faro1

Sectores	Obstrução (%)	Velocidade média (m/s)		Fluxo de potência (W/m^2)	
		S/ Obstrução	C/ Obstrução	S/ Obstrução	C/ Obstrução
0	3,5	5,65	5,45	110,35	99,16
30	17,2	5,69	4,71	112,53	63,88
60	16,9	6,52	5,42	169,76	97,42
90	3,4	6,85	6,62	196,95	177,54
120	3,3	5,54	5,36	104,20	94,22
150	0	5,13	5,13	82,54	82,54
180	11,3	5,92	5,25	127,14	88,72
210	14,9	7,15	6,08	223,60	137,80
240	3,9	7,51	7,22	259,84	230,61
270	0,1	6,99	6,98	209,09	208,47
300	0,9	5,43	5,38	97,90	95,28
330	9,1	5,55	5,04	104,42	78,43

Tabela 10 – Fluxo de potência incidente, em W/m^2 , com e sem obstrução, para Faro2

Sectores	Obstrução (%)	Velocidade média (m/s)		Fluxo de potência (W/m^2)	
		S/ Obstrução	C/ Obstrução	S/ Obstrução	C/ Obstrução
0	16,0	5,65	4,74	110,35	65,41
30	22,2	5,69	4,42	112,53	53,00
60	15,7	6,52	5,50	169,76	101,70
90	12,9	6,85	5,97	196,95	130,14
120	7,7	5,54	5,11	104,20	81,94
150	22,8	5,13	3,96	82,54	37,98
180	21,2	5,92	4,67	127,14	62,21
210	11,5	7,15	6,33	223,60	154,99
240	18,6	7,51	6,12	259,84	140,15
270	14,8	6,99	5,95	209,09	129,32
300	7,6	5,43	5,01	97,90	77,23
330	17,7	5,55	4,56	104,42	58,21

O fluxo de potência incidente calculado fornece a informação sobre o recurso eólico de um local independentemente das características das turbinas a instalar. De um modo geral, a partir das tabelas anteriores constata-se que a redução de fluxo de potência é bastante mais significativa do que a redução na velocidade média do escoamento. A potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento, quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, mas duplicando a área varrida pelas pás da turbina, o aumento é apenas de duas vezes. Por outro lado, se a velocidade do vento se reduz para metade, a potência reduz-se em 12,5%, ou seja, a redução é três vezes superior. Por esta razão é que a escolha da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas tem extrema importância.

Devido à variação cúbica da potência com a velocidade do vento, para velocidades abaixo de um determinado valor, normalmente 3-4 m/s não interessa extrair energia sendo esta denominada por *cut-in speed*. Pela mesma razão, para valores superiores à velocidade do vento nominal não é económico aumentar a potência, devido ao desgaste mecânico das turbinas. Assim as turbinas são reguladas para funcionar a potência constante, provocando-se, artificialmente, uma diminuição no rendimento da conversão. Quando a velocidade do vento se torna perigosamente elevada (superior a cerca de 25 – 30 m/s), a turbina é desligada por razões de segurança [Castro, 2003].

As três situações em estudo neste trabalho, sem a aplicação da metodologia e com a aplicação da metodologia em dois casos de estudo distintos foram analisadas relativamente à potência disponível no intervalo de velocidade do vento entre 0 m/s e 25 m/s. Na Figura 42 constata-se que a potência disponível é bastante significativamente inferior na localização Faro 2 quando comparada com a potência disponível sem a aplicação da metodologia, ou seja, sem se considerar a presença da obstrução.

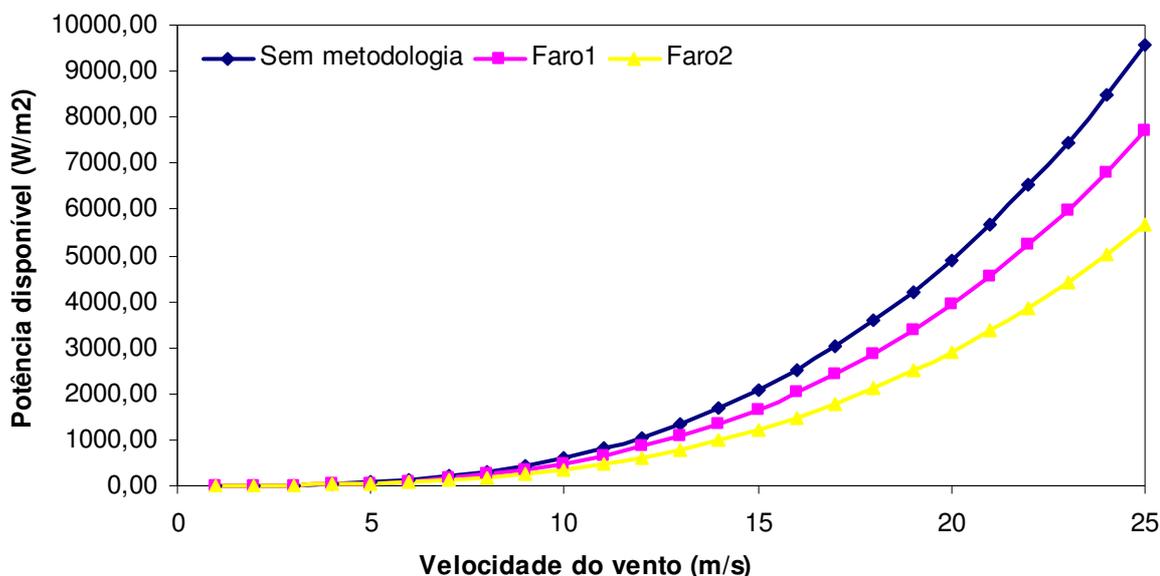


Fig. 42– Potência disponível para as três situações em análise

Com base na bibliografia consultada, defende-se que para que um projecto de instalação de uma micro-turbina eólica seja bem sucedido a média anual da velocidade do vento no local deverá ser, pelo menos, 5,5 m/s. Contudo nem sempre esta condição deve ser assumida como verdadeira dado que a viabilidade de um projecto eólico depende ainda do custo do sistema e da tarifa à qual é remunerada a energia eléctrica produzida.

Como tal, uma análise desta natureza, não poderá assentar simplesmente na predominância de ventos conjuntamente com a percentagem de obstrução. É ainda pertinente analisar a energia média anual disponível em cada caso. Na Figura 43 é possível verificar a potência eléctrica produzida pela turbina

T.Urban para as velocidades médias de vento. Por sua vez, na Figura 44 tem-se a energia média anual disponível, simulando a aplicação da T.Urban que possui um diâmetro do rotor igual a 2,3 metros e uma potência nominal de 2,5 kW.

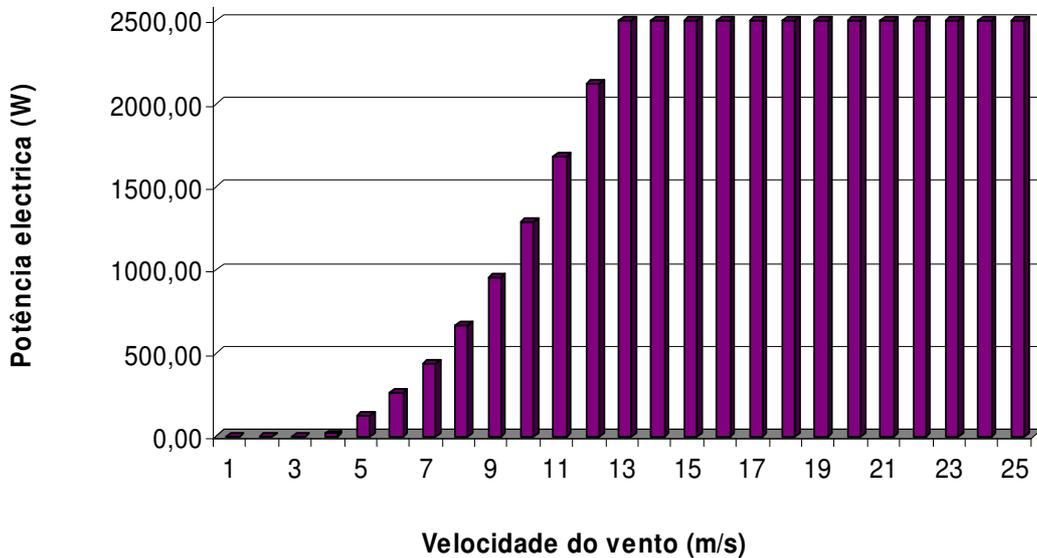


Fig. 43– Potência eléctrica produzida por velocidade média do vento, para a T.Urban

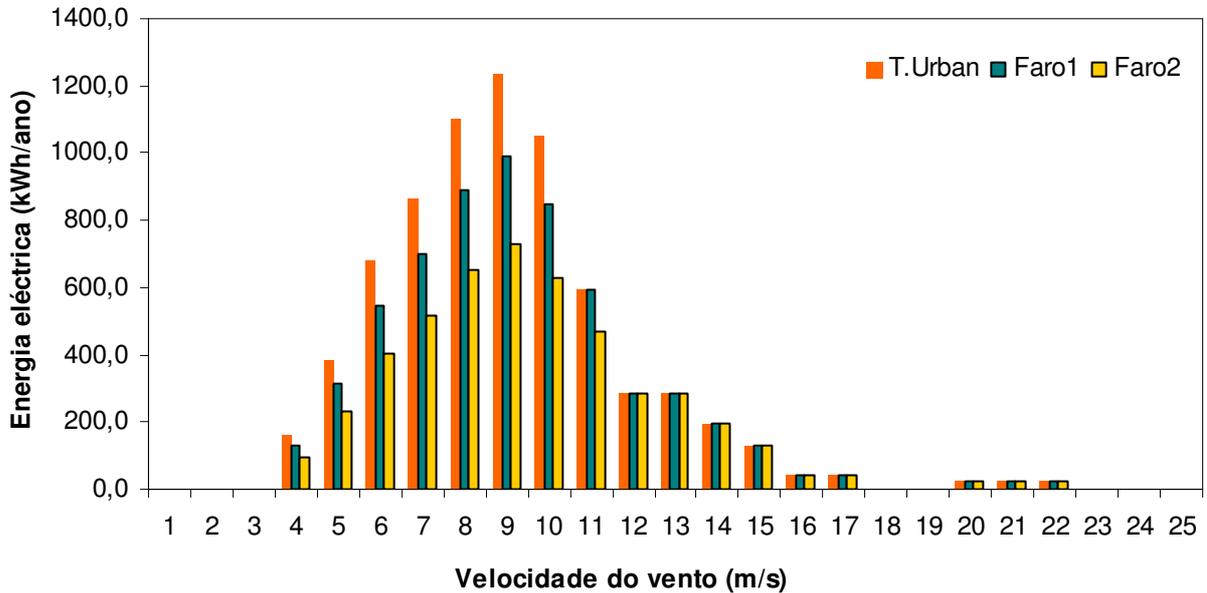


Fig. 44– Distribuição da energia produzida por velocidade média do vento, para as três situações

A soma, de todas as velocidades médias do vento, permite obter o valor esperado para a energia eléctrica produzida anualmente. Ao se dividir a energia eléctrica anual pela potência nominal da turbina obtém-se o número de horas equivalentes à potência nominal (NEP), ou seja, o número de horas durante o ano que

a turbina deverá funcionar à sua potência nominal. Bons locais para instalação de turbinas eólicas deverão ter um NEP superior a 2 500 horas.

Para as três situações em análise a energia média anual corresponde a 7 130 kWh quando se simula a T.Urban sem a introdução da metodologia de análise das obstruções. Este valor traduz-se numa utilização anual da potência instalada de 2 852 horas. Por sua vez, para Faro 1 a energia média anual obtida foi de 6 060 kWh o que resulta num valor de NEP igual a 2 424 horas, enquanto que para Faro 2 o valor de NEP referente à energia média anual de 4 775 kWh foi de 1 910 horas.

Caso se pretenda ser rigoroso e considerar os bons locais para instalação de turbinas eólicas apenas aqueles com NEP superior a 2 500 horas ter-se-ia de descartar a possibilidade da instalação da T.Urban nas duas situações estudadas. Contudo a tarifa bonificada à qual é vendida a energia eléctrica produzida, dentro do enquadramento legislativo em vigor, poderá tornar estas situações atractivas para um futuro investimento em microgeração eólica. Embora o número de horas de utilização anual seja inferior a 2 500 horas, o retorno do investimento resultante da instalação da micro-turbina eólica poderá ser reduzido, pelo menos no caso de Faro 1.

Contudo, e embora com estimativas grosseiras das obstruções, esta metodologia poderá ser um ponto de partida para uma análise do potencial eólico, em meio urbano, mais expedita. A discrepância de energia média anual entre as análises com e sem a aplicação da metodologia tem alguma relevância e poderá vir a ser superior em situações mais complexas do ponto de vista da rugosidade ou dos obstáculos. Reforça-se a necessidade de um estudo *in situ* para instalações eólicas em meio urbano pois uma estimativa simplificada do potencial eólico disponível poderá induzir em erro e conduzir à instalação de um sistema eólico menos adequada.

Importa, todavia referir, que existem muitas outras variáveis com importância para uma identificação e caracterização do recurso eólico mais precisa, principalmente em ambiente urbano. A turbulência é um processo bastante complexo, principalmente numa malha densamente urbana onde podem ocorrer efeitos cumulativos de diversos focos de turbulência que existem em meio urbano. Neste trabalho a sua análise foi simplista com base em distâncias aos obstáculos e dimensões da zona de turbulência imposta por esses mesmos obstáculos.

No entanto, a metodologia desenvolvida neste trabalho apresenta a particularidade de centrar a sua atenção na análise das obstruções *in situ*, ao contrário de outros estudos elaborados por Alé *et al* [s.d.], CSE [2003] e Bahaj *et al* [2007] e já referidos anteriormente.

A análise da envolvente através de uma fotografia panorâmica deverá ser otimizada por forma a realizar uma análise com maior rigor. As imagens panorâmicas construídas apresentam uma deformação visual, que não permitiu utilizar o factor de escala captado na imagem da forma que se pretendia. Com a ajuda do factor de escala propunha-se saber qual a distância e a altura real dos obstáculos visíveis na envolvente. Com o intuito de contornar esta dificuldade foi utilizado, conjuntamente com a imagem panorâmica, o Google Earth para a caracterização dos obstáculos. O processamento da imagem através do Microsoft Paint deveria ser um processo otimizado pois a uniformização do céu na imagem, através de desenho pixel-a-pixel, torna-se um pouco demorado.

Em suma, a metodologia desenvolvida possui o seu valor e poderá ser exequível por um potencial microprodutor desde que o mesmo tenha algum cuidado no estudo da análise da envolvente. Este será o ponto mais sensível já que dele depende tudo o resto. A imagem panorâmica deve ser alvo de especial atenção pois a envolvente deverá ser fotografada de forma correcta, o que muitas vezes pode requerer várias idas ao local. É importante captar pontos comuns nas fotografias pois são estes os pontos que permitem a posterior montagem da imagem panorâmica correcta.

8. Conclusões

O recurso eólico em meio urbano está ainda longe de total compreensão. Os resultados numéricos obtidos anteriormente devem ser considerados como aproximações com um grau de imprecisão significativo, devido às inúmeras variáveis das quais dependem as fases da metodologia definida. Todavia é possível tirar algumas conclusões de âmbito geral.

A implementação de sistemas de microgeração traz vantagens em vários aspectos. Na óptica do produtor/consumidor é uma forma de ver reduzida a sua factura de electricidade ao mesmo tempo que lhe permite obter uma fonte de receita a médio – longo prazo, e assegurar-lhe uma maior segurança no fornecimento eléctrico. Para além disso não se pode descartar o ponto de vista ambiental e energético associado aos sistemas de microgeração. A redução da dependência energética nacional, das perdas associadas à transmissão e distribuição de electricidade e do desgaste de toda a rede eléctrica nacional são consequências de uma produção de energia descentralizada. A redução das emissões de gases nocivos para o ambiente é também cada vez mais importante, nos dias de hoje, e todas as medidas que contribuam para este fim devem ser valorizadas. A microgeração deve cada vez mais ser considerada como uma necessidade nos núcleos urbanos. Embora a penetração da energia solar apresente maior grau de fiabilidade, principalmente em Portugal, é possível considerar a microgeração eólica em ambiente urbano, principalmente em cidades pequenas onde os edifícios existentes por vezes não excedem a altura de cinco a seis pisos. É essencialmente nestes núcleos urbanos que a microgeração eólica poderá vir a ser considerada, quer para sistemas isolados quer para sistemas híbridos com a energia solar. Uma melhoria na previsão da produção energética resultante da microgeração eólica poderá contribuir para esta realidade.

Com este trabalho pretendeu-se desenvolver uma metodologia para identificação e caracterização do potencial eólico em ambiente urbano, por forma a poder prever, de forma mais realística, a influência dos obstáculos urbanos no escoamento atmosféricos e assim permitir uma maior penetração da energia eólica no mercado da microgeração, essencialmente em ambiente construído. Com base na análise da envolvente ao local de instalação do sistema eólico e com alguma informação necessária por parte do microprodutor, é possível obter uma metodologia expedita que forneça uma resposta quase imediata, sem ter de se recorrer a um estudo exaustivo do recurso eólico no local. Esse estudo exaustivo nem sempre é viável na perspectiva técnico-económica e não se torna interessante no enquadramento legislativo da microgeração em Portugal, onde a tarifa bonificada desce 5% em cada 10MW de potência instalada.

Conclui-se assim que, embora a metodologia desenvolvida careça de otimização, a mesma poderá ser considerada como um primeiro passo para a previsão da produção eólica de micro-turbinas instaladas em ambiente urbano. O ponto-chave é que o foco principal nesta metodologia é a análise da obstrução ao escoamento atmosférico existente no local. A imagem panorâmica traduz-se como um bom ponto de partida, no entanto, pode também ser o ponto mais sensível devido à deformação visual da perspectiva.

No futuro, com o intuito de otimizar o processo dever-se-á aplicar a metodologia em situações mais complexas, como por exemplo malhas urbanas mais densas com maior probabilidade de escoamentos atmosféricos turbulentos. Com vista a dar a melhor previsão ao microprodutor, a turbulência deverá ser estudada de forma mais abrangente, considerando efeitos cumulativos de vários obstáculos significativos. A penetração da microgeração eólica só será possível quando existirem ferramentas expeditas que permitam uma previsão realística da produtividade energética do sistema, pois o microprodutor tem de sentir que avança para um investimento seguro e com o menor risco associado.

9. Referências bibliográficas

- Ale, J. A. V., Wenzel, G. M., Lopes, H. F. M., s. d. Small wind system connected to grid in urban area. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul – PUCRS. Porto Alegre, Brasil.
- AWEA – American Wind Energy Association, 2008. In the Public Interest – How and Why to Permit for Small Wind Systems.
- Asmus, P., Fullerton, K., Peterson, S., Rhoads-Weaver, H., Shutak, A., Schawartz, S.S., 2003. Permitting Small Wind Turbines: A Handbook. Learning from the California Experience. Disponível na World Wide Web: www.consumerenergycenter.org/erprebate/forms
- Autostitch – Demo Version. Disponível na World Wide Web: www.autostitch.net . Acedido em Agosto de 2009
- Bahaj, A.S., Myers, James, P.A.B. 2007. Urban energy generation: Influence of micro-wind turbine output on electricity consumption in buildings. Energy and Buildings 39: 154-165
- Bouffard, F. & Kirschen, D. S. ,2008. Centralised and distributed electricity systems. Energy Policy 36: 4504-4508
- Burton, T., Sharpen, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., 2001. Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, England. ISBN 0-471-48997-2
- Castro, R. M. G., 2003. Introdução à Energia Eólica. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- CE – Comissão Europeia, 2003. New Era For Electricity In Europe – Distributed Generation: Key Issues, Challenges And Proposed Solutions. Energy Policy 37: 1145-1155
- CE – Comissão Europeia, 2006. Livro Verde – Estratégia europeia para uma energia sustentável, competitiva e segura. Bruxelas.
- CE – Comissão Europeia, 2007. Renewables make the difference. Belgium
- CE – Comissão Europeia, 2008. Europe’s energy position – present & future. Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities – 65pp. ISBN: 978-92-79-10036-9
- CSE – Centre for Sustainable Energy, 2003. Ealing Urban Wind Study. Disponível na World Wide Web: www.cse.org.uk/pdf/pub1027.pdf . Acedido em Março de 2010.
- CWEA - Canadian Wind Energy Association, 2006. Small Wind Siting and Zoning Study.
- Wind Energy Guide Tour - Danish Wind Industry Association, 2009. Disponível na World Wide Web: <http://guidedtour.windpower.org/en/tour/wres/index.htm>
- Decreto-Lei n.º 363/2007 de 2 de Novembro
- Decreto-Lei n.º 68/2002 de 25 de Março
- EMINENT2, 2009. T.Urban – Small Wind Turbine for Urban Environments. Lisboa, 3 de Março de 2009.
- Estanqueiro, A. & Guerreiro, P. , 2002. Metodologia de Avaliação Energética do Escoamento Atmosférico. INETI, Departamento de Energias Renováveis, Lisboa,

- EUROSTAT, 2009. Panorama of energy: Energy statistics to support EU policies and solutions. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. ISBN 1831-3256
- FPC – Federação Portuguesa de Columbofilia. Disponível na World Wide Web: www.fpcolumbofilia.pt . Acedido em Fevereiro de 2010.
- Google Earth. Disponível na World Wide Web em: <http://earth.google.com/intl/pt/> . Acedido em Fevereiro de 2010.
- Hang, J., Sandberg, M., Y. Li, 2009. Effect of urban morphology on wind condition in idealized city models. Atmospheric Environment 43: 869–878
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., Wiese, A., 2007. Renewable Energy – Technology, Economics and Environment. Springer, New York. ISBN 978-3-540-70947-3
- King, D. E. , 2006. Electric Power Micro-grids: Opportunities and Challenges for an Emerging Distributed Energy Architecture. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering and Public Policy. Carnegie Mellon University, Pennsylvania.
- Lu, L. e Ip, K. Y., 2009. Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 450-461.
- Plate, E. , 1982. Engineering meteorology: Fundamentals of Meteorology and their application to problems in environmental and civil engineering. Elsevier. ISBN: 0-444-41972-1
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L., 2002. Wind Energy Explained – Theory, Design and Application. John Wiley & Sons, England. ISBN 0-470-84612-7
- Matlab Summary and Tutorial. Disponível no World Wide web: www.math.ufl.edu/help/matlab-tutorial . Acedido em Outubro de 2009
- Microsoft Paint. Disponível na World Wide Web em: <http://windows.microsoft.com/en-US/windows-vista/Using-Paint> . Acedido em Fevereiro de 2010
- Miranda, P. M. A., 2001. Meteorologia e Ambiente. Universidade Aberta. ISBN: 972-674-328-1
- Renováveis na Hora, 2010. Guia para a certificação de uma unidade de microprodução. Disponível em www.renovaveisnahora.pt . Acedido em Fevereiro de 2010
- Simiu, E. e Scanlan, R. ,1996. Wind Effects On Structures: Fundamentals and Applications to Design. Third Edition, John Wiley and Sons.
- Simões, T. (2004) - “Base de dados do potencial energético do vento em Portugal – Metodologia e Desenvolvimento”. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Ciências e Engenharia da Terra. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- WADE – World Alliance Decentralized Energy, 2007. Security via Decentralized Energy. Disponível em: www.localpower.org .
- Wind Energy Guide Tour. Disponível em World Wide Web: <http://windeis.anl.gov/guide/index.cfm> . Acedido em Janeiro de 2010.
- Zerriffi, H. , 2004. “Electric Power Systems Under Stress: Na Evaluation of Centralized Versus Distributed System Architectures”. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering and Public Policy. Carnegie Mellon University, Pennsylvania.

10. Bibliografia

- Arifujjaman, Md., Iqbal, M. T., Quaicoe, J. E., 2008. Energy capture by a small wind-energy conversion system. *Applied Energy* 85: 41-51
- Smalwell, K. E., J. Sheridan, W. H. Melbourne, 2001. The effect of the turbulence on the performance of a small wind turbine. Melbourne Graduate Fluids Conference, Australia.
- AWEA – American Wind Energy Association. Disponível na World Wide Web: www.awea.org . Acedido em Junho de 2009.
- Bayod-Rújula AA., 2009. Future development of the electricity systems with distributed generation. *Energy*.
- Britter, R. E., Hanna, S. R. , 2003. Flow and dispersion in urban areas. *Fluid Mech* 2003.35: 469-96
- Bussel, G.J:W, Mertens, S.M., 2005. Small wind turbines for the built environment. EACWE4 – The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, Prague, 11-15 July
- Cossent, R.; Gómez, T.; Frías, P. , 2009. Towards a future with large penetration of distributed generation: Is the current regulation of electricity distribution ready? Regulatory recommendations under a European perspective
- Celik, A. N., Muneer, T, Clarke, P. 2007. An investigation into micro wind energy systems for their utilization in urban areas and their life cycle assessment. *Proc. IMech Vol. 221 Part A: J. Power and Energy*
- Costa, P.; Simões, T.; Estanqueiro, A. Maio de 2006. Avaliação do Potencial Eólico da Região do Algarve. Projecto ENERSUR
- Distin, M., 2006. A Study of the Wind Effects around the Queens Hotel Southsea. University of Portsmouth.
- Fernando, H. J. S., 2009. Fluid Dynamics of Urban Atmospheres in Complex Terrain. *Fluid Mech* 2010.42:365-389
- Gonzalez, R. C., Woods, R. E., Eddins, S. L. 2004. *Digital Image Processing Using MATLAB*. Pearson Education. ISBN 0130085197
- Heath, M. A. , Walshe, J.D., Watson, S. J. 2007. Estimating the Potential Yield of Small Building-mounted Wind Turbines. *Wind energy* 10: 271- 287
- Hunt, B. R., Lipsman, R. L., Rosenberg, J. M. 2001. *A Guide to MATLAB for Beginners and Experienced Users*. Cambridge University Press
- Karger, C. R. e Hennings, W., 2009. Sustainability evaluation of decentralized electricity generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 583-593.
- Malcon, A. H. e Walshe, J. D., 2007. Estimating the potential yield of small building-mounted wind turbines. *Wind Energy*, 2007.10:271-287
- Moran, J. M. ; Morgan, M. D., 1995. *Essentials of Weather*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. ISBN 0-02-383831-0

- Peacock, A.D., Jenkins, D. Ahadzi, M. Berry, A. Turan, S. 2008. Micro wind turbines in the UK domestic sector. *Energy and Buildings* 40: 1324-1333
- Ozgener, O., 2005. A small wind turbine system (SWTS) application and its performance analysis. *Energy Conversion and Management* 47 (2006) 1326-1337
- Research Reports International, 2005. *Distributed Generation: Technologies, Opportunities and Participants*.
- SmartGrids – European Technology Platform for the Electricity Networks of the future. Disponível na World Wide Web: www.smartgrids.eu . Acedido em Janeiro de 2010.
- WADE – World Alliance Decentralized Energy. Disponível em World Wide Web: www.localpower.org . Acedido em Março de 2009.

Anexo I – Avaliação energética do escoamento atmosférico

A partir de observações do vento, pode concluir-se que tanto a velocidade como a direcção sofrem grandes variações ao longo do tempo e do espaço. Para poder definir o vento medido de uma forma razoavelmente precisa é necessário definir um período de tempo T. Nas aplicações eólicas, e tendo em vista a caracterização energética de um local, existem escalas meteorológicas do escoamento atmosférico que devem ser caracterizadas, visto terem influência em condicionantes locais que envolvem fenómenos com dimensões que podem atingir as dezenas de milhar de quilómetros, tais como superfícies frontais, depressões ou anticiclones.

Em relação a fenómenos condicionantes do escoamento local e que influenciam as características aerológicas, há que considerar parâmetros tais como a orografia e a rugosidade do local. As classificações, em termos de escala de movimento, encontram-se definidas na Tabela I.

Tabela I – Escalas meteorológicas de movimento [Fonte: Adaptado de Estanqueiro e Guerreiro, 2002]

Escala	Espaço (km)	Tempo (horas)
Sinóptica ou Macroescala	500	> 48
Microescala	< 20	1
Mesoescala	Todas as escalas intermédias	Todas as escalas intermédias

Considerando o vento como uma sobreposição de diferentes escalas – as quais se assumem como independentes – é possível descrevê-lo à custa de um espectro de energia, sendo normalmente utilizado o espectro de Van der Hoven, observado na Figura A) [Estanqueiro e Guerreiro, 2002].

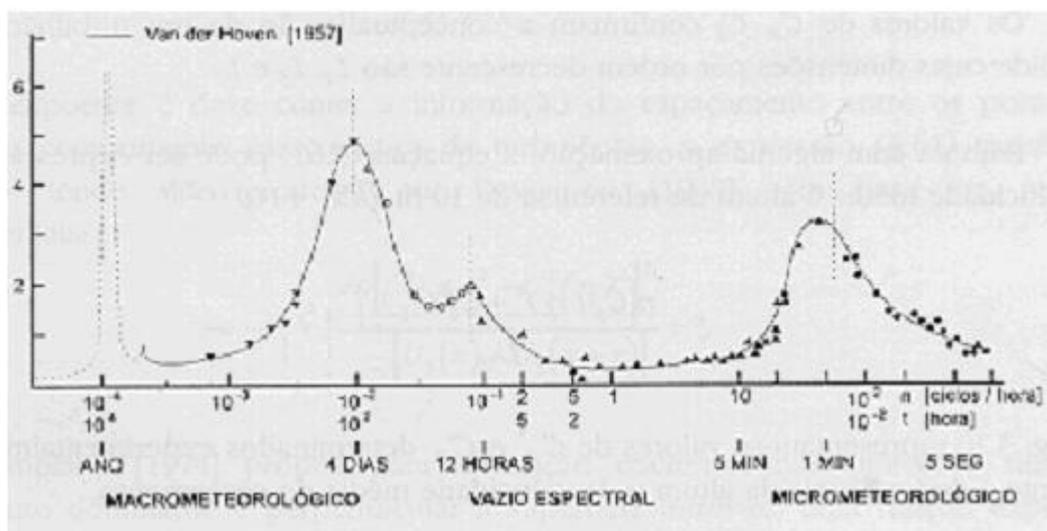


Fig. A) – Espectro de Van der Hoven (Fonte: Estanqueiro e Guerreiro, 2002)

A zona do espectro entre os dez minutos e as oito horas é a adequada ao período de cálculo da média da velocidade entre medições visando as aplicações eólicas. Esta representa a zona de vazio espectral (reduzido conteúdo energético uma vez que se verificam poucas variações da velocidade ao longo do tempo). Os valores médios calculados com base em períodos dentro do vazio espectral não sofrem, na maioria dos casos, grandes variações. O período de tempo utilizado para o cálculo do valor médio da velocidade horizontal é, normalmente, de uma hora ou dez minutos por forma a minimizar o desvio padrão do vento com o tempo. Quando as séries temporais registam valores médios de velocidade do vento de minutos com uma frequência de 1 Hz pode-se definir a velocidade média do vento através de:

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u(T) dt \quad (1)$$

onde \bar{u} representa o valor médio da velocidade e T o intervalo de tempo considerado. O fluxo de potência do vento disponível num intervalo de tempo T é dado pela equação:

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 \quad (2)$$

Alguns elementos a ter em conta no desempenho de um sistema de aproveitamento eólico e para a avaliação do potencial eólico de um local dependem da campanha experimental e do tratamento de dados onde se consideram, entre outros, os seguintes pontos:

- a velocidade média do vento e as suas variações diurnas e sazonais;
- a lei de distribuição da velocidade do vento e os seus valores extremos;
- a variação com a altitude da velocidade do vento;
- a lei de distribuição da direcção do vento;
- as variações diurnas e sazonais da massa volúmica do ar e a sua variação com a altitude [Estanqueiro e Guerreiro, 2002].

A caracterização do escoamento atmosférico utilizando a metodologia clássica é realizada através da determinação de uma função de distribuição da velocidade do vento e da estimativa da potência do escoamento incidente em cada local. Desta forma, o conhecimento de uma lei de distribuição do vento reveste-se de extrema importância para as aplicações eólicas. Uma das funções de distribuição normalmente utilizadas para este fim é a distribuição de Weibull. A lei de distribuição de Weibull exprime-se matematicamente através da expressão:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{A} \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{\bar{u}}{A} \right)^k \right) \quad (3)$$

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

distribuição de Weibull. Para $k = 1$, a distribuição de Weibull degenera na distribuição exponencial e para $k = 2$ na distribuição de Rayleigh. A distribuição acumulada de Weibull, $F(\bar{u})$, dá a probabilidade da velocidade do vento exceder o valor \bar{u} e é dada pela expressão:

$$F(\bar{u}) = \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{A}\right)^k\right) \quad (4)$$

O fluxo de potência disponível no vento, (W/m²) pode ser também determinado por:

$$E = \frac{1}{2} \rho A^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (5)$$

onde ρ representa o peso do ar (1,2 kg/ m³) para uma temperatura de 15 °C e pressão *standard* de 1013 mb, e Γ é a função gama dada por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \exp(-t)t^{x-1} dt \quad \text{com } x > 0 \quad (6)$$

As velocidades do vento às quais correspondem maiores valores densidade de potência são dadas por:

$$u_m = A\left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (7)$$

Os parâmetros da distribuição de Weibull podem determinar-se de várias formas. Uma vez conhecido o valor médio e o desvio padrão da velocidade podem determinar-se através das equações:

$$\frac{\bar{u}}{A} = \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (8)$$

$$\frac{\sigma}{\bar{u}} = \left[\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{1/2} \quad (9)$$

onde o desvio padrão pode ser dado por:

$$\sigma = \left(\overline{u^2} - \bar{u}^2\right)^{1/2} \quad (10)$$

Anexo II - Algoritmos MATLAB

1. Metodologia de análise de envolvente

```
% Remove old variable definitions
clear all
% Remove old graphics windows
close all

%Create a diary file
delete metodologia_imagem.txt
diary metodologia_imagem.txt
% Display the command lines in the command window
echo on

%Open the folder to access the input photos, convert to grayscale and resize
I = imread ('Imagem_Tratada2.jpg');
IG = rgb2gray(I);
IG2 = imresize(IG, [200 1200]);

%Convert the grayscale image to a binary image
level = graythresh(IG2);
BW = im2bw (IG2);
BW = bwareaopen(BW, 10);
BW2 = imresize(BW, [200 1200]);

%Get sky sample
aa = BW > (0.9*mean2(BW(1:50, :)));
%%%%%sky versus building
bwlaa = bwlabel(aa);
ceu = getOnlyObject(bwlaa,1,size(aa));
%%%%%detail optimization:
ceu=imdilate(ceu, strel('disk', 1));
ceu=imfill(ceu, 'holes');
%%%%%save result:
ceu = imresize(ceu, [200 1200]);
imwrite(ceu, 'imgfinal.jpg', 'jpg');

echo off
diary off
```

2. Metodologia de obstrução

```

% Remove old variable definitions
clear all

% Remove old graphics windows
close all

%Create a diary file
delete metodologia_obstrucao.txt
diary metodologia_obstrucao.txt

%Open the folder to acess the input photos, convert to grayscale and resize
I = imread ('imgfinal.jpg');

[row,col,dmax]=size(I);      % get size of image

image(I);                    % Display I as an image
daspect([1 1 1]);           % Set x:y aspect ratio to be 1:1

title('Urban profile')

[x,y] = ginput(1)

BvsT = zeros(1,12)

A = floor(x);                % convert value to integer
B = row;

for z = 0:11
    count = 0;
    ini = A + z*100
    for i = (A+z*100):(A+100+z*100);
        A1 = i;
        if (A1 > 1200)
            A1 = A1 - 1200;
        end
        for j = 1:row
            RGB = impixel(I,A1,j);
            if (RGB == [0,0,0])
                count = count + 1;
            end
        end
    end
    Z1 = z;
    end1 = count;
    BvsT(1,z+1) = count / (row*100)
end

echo off
diary off

```

3. Construção da rosa-de-obstrução com as percentagens obtidas

```

WVB = [16.9 17.2 3.5 9.1 0.9 0.1 3.9 14.9 11.3 0 3.3 3.4]
% make positions vector
vectpos = zeros(1,48);
piangle = zeros(1,48);
z = 1;
for i = 1:4:12*4
    vectpos(1, i) = 0;
    vectpos(1, i+1) = WVB(z);
    vectpos(1, i+2) = WVB(z);
    vectpos(1, i+3) = 0;

    piangle(1, i) = (z-1)*pi/6;           % missing rotate value to start at
    piangle(1, i+1) = (z-1)*pi/6;
    piangle(1, i+2) = z*pi/6;
    piangle(1, i+3) = z*pi/6;

    z = z + 1;
end

h = polar(piangle, vectpos)

%fill with color
[xout, yout] = pol2cart(piangle, vectpos);

dhandles=findobj(allchild(gca),'type','text'); % catch the labels
for K = 1:length(dhandles)
    deg = str2double( get(dhandles(K), 'String') );
    switch deg
        case 90
            set(dhandles(K), 'String', 'N')
        case 180
            set(dhandles(K), 'String', 'O')
        case 270
            set(dhandles(K), 'String', 'S')
        case 0
            set(dhandles(K), 'String', 'E')
        otherwise
            set(dhandles(K), 'String', ' ')
    end
end

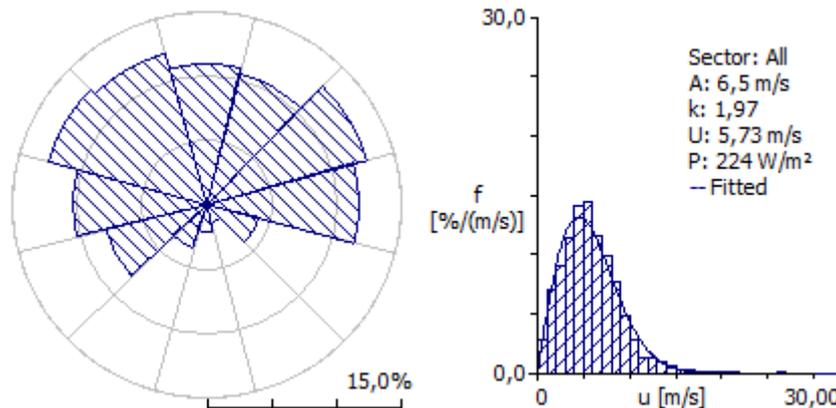
set(gca, 'nextplot', 'add');
fill(xout, yout, 'b');

```

Anexo III - Relatório do WASP, para os casos de estudo

Site description: 'Faro'; Position: 37,02°E 7,93°N; Anemometer height: 80,00 m a.g.l.

Parameter	Measured	Weibull fit	Discrepancy
Mean wind speed [m/s]	5,70	5,73	0,49%
Mean power density [W/m ²]	222,22	224	0,69%



	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	All
A	5,8	6,0	7,0	7,0	5,4	4,6	5,4	7,4	7,5	7,3	5,5	5,7	6,5
k	2,53	2,20	2,72	1,99	1,58	1,16	1,18	1,81	1,51	2,16	2,29	2,63	1,97
U	5,17	5,28	6,25	6,22	4,87	4,33	5,12	6,58	6,78	6,46	4,88	5,08	5,73
P	133	157	223	283	179	212	337	371	513	293	120	122	224
f	10,9	10,5	12,7	11,7	4,1	1,5	2,1	3,5	7,9	10,3	12,6	12,2	100

U	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	All
1,0	23	27	42	21	9	49	83	41	27	17	25	23	27
2,0	65	88	50	52	113	122	167	61	63	69	76	55	69
3,0	101	128	67	70	139	268	167	51	54	62	85	104	90
4,0	124	108	81	82	148	122	83	82	81	83	192	151	115
5,0	186	145	92	145	174	122	83	153	90	104	175	174	141
6,0	137	128	148	158	165	98	117	133	161	149	135	142	143
7,0	130	139	136	91	70	49	33	61	117	114	113	139	115
8,0	130	81	156	91	35	0	17	51	72	69	101	130	98
9,0	62	68	120	76	26	49	33	82	103	104	62	58	77
10,0	26	44	33	82	35	24	0	133	72	90	28	17	48
11,0	16	34	28	61	26	24	50	31	22	52	3	3	27
12,0	0	0	19	24	17	0	33	41	13	28	6	3	13
13,0	0	3	19	18	26	24	33	20	27	28	0	0	13
14,0	0	3	8	15	0	24	17	31	27	21	0	0	9
15,0	0	3	0	3	17	0	67	20	18	10	0	0	6
16,0	0	0	0	6	0	0	17	0	9	0	0	0	2
17,0	0	0	0	6	0	24	0	0	18	0	0	0	2
18,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20,0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	1
21,0	0	0	0	0	0	0	0	10	4	0	0	0	1
22,0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	1
23,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27,0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
28,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A and U are given in m/s, E in W/m² and the frequencies of occurrence in per mille and per cent (f).