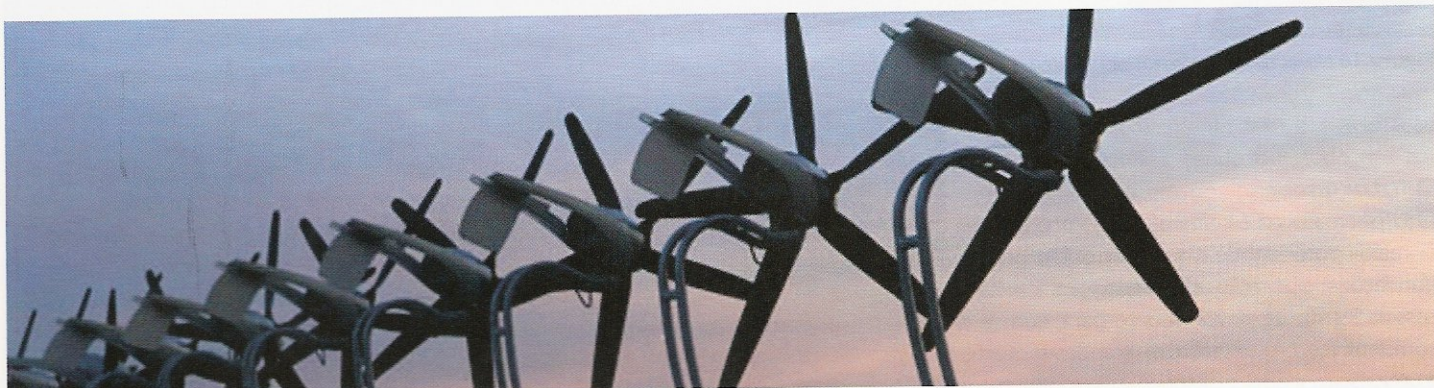


aproveitamento de energia eólica em ambiente urbano e construído



Ana Estanqueiro e Teresa Simões
LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia
ana.estanqueiro@ineti.pt . teresa.simoes@ineti.pt

1. Introdução

Na última década assistiu-se em Portugal a um desenvolvimento das energias renováveis, em particular da Energia Eólica. No final de 2009, encontrava-se instalada e em operação uma capacidade eólica superior a 3.500 MW, colocando Portugal entre os primeiros dez países do mundo neste sector e ultrapassando mesmo países pioneiros, como a Dinamarca e Espanha, respectivamente em potência instalada e na percentagem da energia eléctrica consumida com origem no vento.

A inovação no sector eólico em Portugal, se bem que ainda apresente algum potencial para as grandes turbinas em terra, configura-se actualmente noutras duas frentes, quiçá com caminhos mais longos a trilhar: as micro-turbinas eólicas e sua contribuição para o sector da geração doméstica; e os parques eólicos *offshore* - estes com enorme potencial na costa Portuguesa, especialmente nas soluções tecnológicas flutuantes.

Na senda das iniciativas inovadoras de Portugal na área das energias renováveis, também na área da micro-geração fomos dos primeiros países a publicar legislação e regimes tari-

fários aplicáveis não só a micro-geração fotovoltaica, mas também à micro-geração eólica. A publicação do DL 363/07 em 2007 permitiu enquadrar legal, tarifária e tecnicamente os sistemas de microgeração a partir de diversas fontes de energia renováveis e mesmo de fontes convencionais. Esta acção constituiu um passo importante para o desenvolvimento do sector da microgeração em Portugal. Para contribuir para as necessidades dos investidores e promotores desta nova área de mercado, o LNEG iniciou uma nova área de investigação e desenvolvimento tecnológico. O projecto TURBan, na qual desenvolveu dois protótipos de pequenas turbinas eólicas domésticas e uma nova área de investigação relacionada com a identificação do potencial eólico em áreas urbanas e/ou construídas.

Na realidade, e ao contrário do que na generalidade se pensa, a energia eólica urbana tem elevado potencial de exploração num cenário de consumo energético sustentável, quer ao nível da instalação de turbinas de pequena capacidade para o sector doméstico – turbinas de eixo horizontal e eixo vertical nos topos e/ou áreas envolventes a edifícios e vivendas – quer ao nível da sua integração em edifícios, desde que a con-

cepção dos mesmos seja efectuada de forma a prever este tipo de aproveitamento energético. Importa salientar que o aproveitamento de energia eólica em ambiente urbano é inteiramente compatível com outras tecnologias de microgeração de electricidade; como sistemas fotovoltaicos ou de microgeração a gás - pelo que a sensibilização para configurações de microgeração de tipo misto (também denominado híbrido) deve ser impulsionada junto dos consumidores, em especial em zonas urbanas caracterizadas por elevados regimes de vento.

Estudos recentes indicam a necessidade de caracterizar com detalhe o recurso eólico em ambiente urbano, e apontam para a instalação de micro-turbinas com estruturas de suporte mais elevadas do que o praticado nos últimos anos, por forma a garantirem um aproveitamento eficiente da energia do vento fora das zonas de perturbação muito elevada e introduzida pelos edifícios [1].

Como todas as outras tecnologias de conversão de energia primária em energia eléctrica, também o recurso a pequenas turbinas eólicas acarreta impactos ambientais. Dado que estes equipamentos se instalam

normalmente, em ambiente urbano e construído, o impacto sobre o ecossistema natural é reduzido, sendo usualmente apontados como efeitos perturbadores ou nocivos ao Homem destas aplicações – pelos potenciais investidores e entidades autárquicas responsáveis por licenciamentos urbanos, o impacto visual dos sistemas de microgeração eólica e as eventuais emissões de ruído.

2. As Micro-Turbinas Eólicas

2.1. Tecnologia eólica para microgeração

Existem várias definições e classificações de pequenas turbinas eólicas ("small wind turbines" na denominação anglo-saxónica) sendo a única universalmente aceite que são turbinas eólicas cuja área de captação da energia incidente do vento é inferior a 200 m² de acordo com a norma IEC 61400-2 [2]. No entanto, é normal que estas pequenas turbinas sejam objecto de sub-classificação e categorização adicionais quanto à dimensão e orientação do rotor. No que respeita à dimensão deste, utiliza-se a denominação de "micro" turbinas eólicas, quando a sua utilização é doméstica (e a potência raramente excede 5 kW) e de mini turbinas eólicas para potências de uma a algumas dezenas de kW. Na Tabela I apresenta-se a sub-classificação das SWT quanto à dimensão do rotor proposta na norma IEC 61400-2 e a sub-classificação quanto à potência nominal comumente aceite no sector.

Sub-classe	Diâmetro do rotor [m]	Classificações normativas (Área varrida, A [m ²])	Classificações comuns (Potência nominal, Pu [kW])	Aplicações
Micro turbina	$D < 1.6$ m	$A < 2$ m ²	< 5 kW	Domésticas
Mini turbina	$1.6 < D < 5$ m	$2 < A < 78.5$ m ²	$5 < P_u < 50$ kW	Urbanizações e pequenas empresas
Pequena turbina	$5 < D < 16$ m	$78.5 < A < 200$ m ²	$50 < P_u < 500$ kW	Grandes urbanizações e PMEs de consumo significativo (e.g. agropecuárias e outras).

Tabela I Sub-classificação de pequenas turbinas eólicas

Quanto à utilização da energia eléctrica, e sua integração (ou não) numa rede pré-existente, as pequenas turbinas eólicas dizem-se "interligadas" à rede eléctrica quando dispõem de um sistema que lhes permite entregar energia à rede de distribuição e, funcionando em "regime isolado" da rede, quando operam sem o apoio desta, necessitando normalmente de um sistema de armazenamento de energia eléctrica.

Existem algumas características que estabelecem diferenças importantes entre as pequenas turbinas eólicas e as grandes máquinas multi-MW. Sendo que, ambas as classes recorrem essencialmente às forças de sustentação exercidas nas pás, independentemente da orientação do seu eixo de rotação, verifica-se que, no segmento das pequenas turbinas eólicas, e ao contrário do verificado no sector das turbinas multi-MW, poucos fabricantes apresentam máquinas com indicadores técnicos de elevada eficiência.

Alguns factores têm contribuído para este cenário: o primeiro e, possivelmente, o mais relevante, é que, ao contrário das grandes turbinas eólicas, no segmento das micro-turbinas poucos ou nenhuns programas de I&D que co-financiem o desenvolvimento destes produtos

no espaço Europeu, têm existido. Nos USA, embora o panorama seja idêntico, tem-se, contudo, verificado um interesse mais continuado neste sector eólico.

Por outro lado, um projecto aerodinamicamente optimizado de um micro-rotor eólico apresenta dificuldades acrescidas, em vista do reduzido número de Reynolds a que estes rotores funcionam - facto que é reforçado pela diminuta dimensão das mini e micro-turbinas.

Quanto à orientação do rotor eólico, e à imagem do que se passa nas grandes turbinas, as micro-turbinas classificam-se como tendo eixos de rotação horizontais (HAWT – *horizontal axis wind turbines*) e verticais (VAWT – *vertical axis wind turbines*). Além da evidente perpendicularidade da orientação dos eixos de rotação, a diferença fundamental entre estas duas classes de turbina consiste na possibilidade de optimização do posicionamento do perfil aerodinâmico da pá face ao escoamento incidente (de facto, face à força resultante do escoamento incidente e da velocidade tangencial de rotação) numa turbina de eixo horizontal, devidamente orientada à direcção dominante do vento. Tal é efectuado à custa da variação do ângulo de posicionamento das pás (dito ângulo de passo) sendo possível construir uma estratégia de controlo que mantenha as pás no ângulo óptimo de funcionamento ao longo da banda de variação da velocidade do vento.

Pelo contrário, em turbinas de eixo vertical, os perfis aerodinâmicos que constituem as pás dos rotores modernos apresentam um funcionamento cíclico e à medida que as pás rodam em torno do eixo, as forças motrizes (essencialmente de sustentação) variam entre um valor máximo e um valor mínimo, passando por zero. É pois, comum, dizer que este tipo de turbinas "está sempre orientado à direcção dominante do vento", pese embora talvez fosse mais correcto referir que, de facto, dada a posição dos seus perfis e o alinhamento do eixo de rotação, estas turbinas nunca se encontram orientadas à direcção dominante do vento... Como é de esperar, tal facto condiciona o desempenho máximo destas turbinas. Este é medido em termos do coeficiente de potência, o qual é calculado pela razão entre a potência útil e a potência incidente do es-

De acordo com a norma IEC 61400-2, o limite superior de potência para esta sub-classe é de, aproximadamente, 200 kW.

APROVEITAMENTO DE ENERGIA EÓLICA EM AMBIENTE URBANO E CONSTRUÍDO

coamento não perturbado verifica-se, assim que, a eficiência máxima de uma VAWT é cerca de 80% da eficiência máxima de uma HAWT. Como se pode observar na Figura 1, a eficiência máxima de uma turbina de eixo horizontal (independentemente do número de pás) é sempre consideravelmente superior à de uma turbina de eixo vertical, mesmo das mais sofisticadas, como é o caso da turbina Darrieus – os normalmente denominados “batedores de ovos”...

O projecto de uma turbina eólica, independentemente da sua potência, é normalmente efectuado de forma adimensional. O parâmetro fundamental de projecto do rotor é a chamada “velocidade específica na ponta da pá”, representada por λ , a qual consiste na razão entre a velocidade do escoamento não perturbado e a velocidade tangencial, devida à rotação, sentida na extremidade desta. As turbinas eólicas modernas apresentam valores de λ próximos de 7.

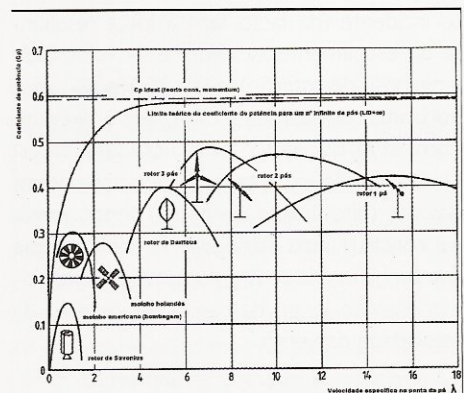


Figura 1 Coeficiente de potência de rotores eólicos em função de λ para várias tecnologias [Adaptado de 3].

É nas aplicações eólicas em ambiente densamente construído, isto é no meio de grandes cidades e aglomerados populacionais, que as turbinas eólicas de eixo vertical – esquecidas durante quase trinta anos pelos fabricantes e investigadores do sector eólico – encontraram uma nova e moderna aplicação. Tal deve-se à sua “constante orientação” ao vento, ou, mais precisamente, à sua especificidade de funcionamento sub-óptimo, independentemente da direcção do vento.

Esta “vantagem” das VAWT recentemente descoberta deve-se às características do escoamento atmosférico em ambiente urbano,

as quais passam por uma turbulência muito elevada e marcada tridimensionalidade do escoamento devido à presença e perturbação introduzida pelos edifícios. Devido à marcada tridimensionalidade do escoamento, a turbulência verifica-se, não só nas variações da velocidade média horizontal e na direcção dominante, mas igualmente numa elevada variabilidade direccional dessa direcção, a qual, nas situações mais críticas, nem se consegue definir.

É nestas circunstâncias extremas - e adversas para a operação de turbinas de eixo horizontal – que as VAWTs re-encontraram um sector de aplicação de excelência, assistindo-se actualmente ao desenvolvimento de vários conceitos e projectos deste tipo de turbinas.

Na Figura 2 pode ver-se a imagem de uma moderna e apelativa microturbina turbina eólica de eixo horizontal, o modelo Airdolphyn do fabricante Zephyr Corporation.

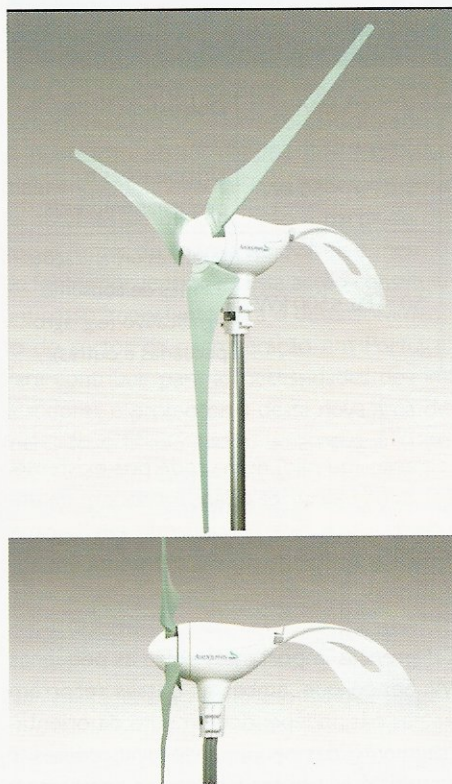


Figura 2 Modelo Airdolphyn de 4 kW (Zephyr Co, Japão, cortesia Prof. Hikaru Matsumiya).

Qualquer que seja a dimensão de uma turbina eólica de eixo horizontal, para funcionar de modo eficiente, o seu rotor deve estar

orientado perpendicularmente à direcção dominante do vento. Ao contrário das grandes turbinas que recorrem a sistemas mecano-eléctricos para conseguirem este alinhamento (“yawing”), as micro-turbinas eólicas de eixo horizontal podem recorrer a mecanismos de alinhamento aerodinâmicos, os vulgares “lemes”, como representado na turbina da Fig. 2.

Existe, contudo, uma configuração de HAWT que não carece de sistema de orientação, a qual se obtém quando o seu rotor é posicionado a jusante da torre, relativamente ao sentido do vento. Estas turbinas, ditas “downwind” (por oposição às turbinas “upwind” cujo rotor está a montante da torre), são auto-orientáveis à direcção perpendicular ao vento. Na Fig. 3 representa-se um modelo Airstream 3.7, do fabricante americano Southwest Windpower, como representante desta tipologia de micro-turbinas.

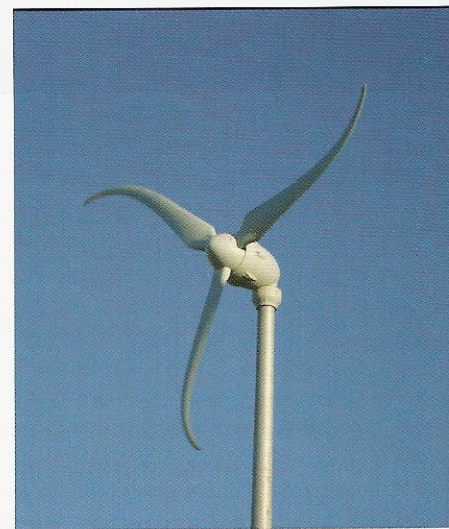


Figura 3 Turbinas Airstream de 2.4 kW instalada na Costa do Estoril.

A Figura 4 representa uma outra turbina recente de grande sucesso, o modelo de eixo vertical QR5 da empresa Quiet Revolution projectado e construído no Reino Unido.

2.2. Contribuição tecnológica nacional no sector da micro-geração eólica

Há muitos anos que o núcleo de Energia Eólica do LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia (à data INETI ou LNETI...) acalentava o sonho de construir turbinas



Figura 4 Modelo QR5 - 4.5 kW. Quiet Revolution. Turbina instalada num edifício em Bristol, Reino Unido. (source: www.quietrevolution.co.uk).

eólicas. Nos tempos da instalação da primeira turbina eólica em Portugal, efectuada pelo LNETI em 1984, na Instalação Piloto em Lourel, Sintra, alterou-se e optimizou-se o projecto de uma turbina Aeroman de 20 kW, serrando-se veios de transmissão, acrescentando componentes e chegou-se a construir um moíno americano, numa tentativa de concretizar tais aspirações. Pese embora a tecnologia das grandes turbinas tivesse evoluído a um ritmo alucinante, sendo naturalmente difícil para o indústria nacional acompanhar (do exterior) tal evolução, restava um nicho tecnológico, relativamente inexplorado, e cuja carência de sofisticação tecnológica convidava ao investimento em I&D nacional. Assim nasceu o projecto TURBan – Projecto e Construção de Turbinas Eólicas de Pequena Dimensão, Baixo Custo e Elevada Eficiência para Ambientes Urbanos e Construídos. No âmbito deste projecto, com a duração de 18 meses e um orçamento de 890 000 Euro, cofinanciado pelo Programa DEMTEC em 75% (gerido pela Agência de Inovação) e pelo LNETI pelos restantes 25%, projectaram-se e construíram-se em Portugal dois protótipos de micro-turbinas eólicas; um de eixo horizontal vocacionado para ambiente esparsamente construído e outro de eixo vertical, dedicado ao ambiente urbano.

O projecto contou entre os seus parceiros com entidades como o IDEMEC (IST/UTL), a Universidade do Minho e o INOV (INESC) e a empresa Iberomoldes, sendo de destacar o papel de uma PME da área da construção em fibra, a empresa “Réplica Fiel”, que produziu as pás e demais elementos em fibra das turbinas de eixo horizontal.

Na Fig. 5 representa-se o modelo TURBan H2.5 de 2.5 kW. Esta turbina tem pás construídas em fibra de vidro reforçada, cobertura da nacelle no mesmo material (ou em plástico) e está equipada com um gerador síncrono de magnetos permanentes. Os indicadores de eficiências são comparáveis aos das turbinas multi-MW [4], pelo que a sua concepção e construção cumpriu todos os objectivos a que o projecto DEMTEC se propunha, sendo além disso muito silenciosa. Deste modelo encontram-se em funcionamento desde Novembro de 2008, um primeiro protótipo nos jardins da Residência Oficial do Sr. Primeiro Ministro em S. Bento; e um segundo em Arruda, numa agro-pecuária. Ambos têm tido um funcionamento de acordo com expectável, embora os testes em curso em Arruda tenham sofrido atrasos devido a dificuldades surgidas com o ajuste dos parâmetros do sistema de controlo à elevada velocidade do vento no local.

Na Figura 6 apresenta-se o protótipo da turbina de eixo vertical TURBan V2.0, instalada no Edifício Solar XXI no Campos do LNEG no Lumiar. Esta turbina atingiu um nível de sofisticação de projecto inferior à das suas congéneres TURBan de eixo horizontal, encontrando-se actualmente ainda em testes para optimização do funcionamento.



Figura 5 Protótipo TURBan H2.5 de 2.5 kW.



Figura 6 Protótipo TURBan V2.0 de 2.0 kW.

3. O Potencial Eólico em Ambiente Urbano

O potencial eólico em zonas urbanas é de caracterização difícil devido à presença dos obstáculos e estruturas naturalmente existentes nas cidades [5]. A sua presença causa efeitos de separação do escoamento, redução da velocidade do vento e turbulência elevada nas zonas acima e em redor dos edifícios (Fig. 7). Esta dificuldade é reforçada pelos elevados custos das campanhas experimentais de medição do vento, as quais, sendo utilizadas universalmente para a caracterização do desempenho das grandes turbinas, se vêm inviabilizadas por motivos económicos no caso de micro-turbinas eólicas, facto que constitui uma importante barreira ao desenvolvimento de aproveitamentos urbanos da energia eólica.

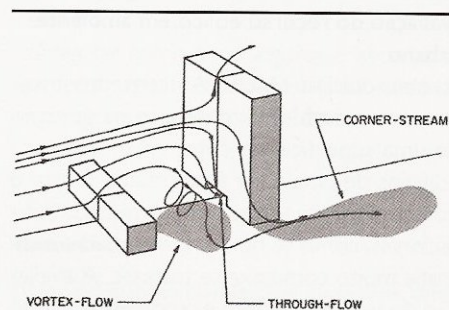


Figura 7 Vórtices em forma de ferradura envolvendo um edifício de forma cúbica [6].

A dificuldade em recorrer à caracterização experimental do vento, leva a que se recorra a outras alternativas, pese embora com imprecisão acrescida. Entre as fontes possíveis de informação encontram-se as bases de dados de vento ou os Atlas do Potencial Eólico [7].

Nestes casos, a caracterização do recurso é normalmente efectuada por aplicação de modelos de microescala (e.g. WASP) em conjunto com resultados de modelos de mesoescala, metodologia que, utilizando modelos que não são adaptados a ambientes urbanos, podem apresentar validade pontual. O recurso a modelos CFD (*computational fluid dynamic*) constitui actualmente o estado da arte na modelação do comportamento do vento em redor nas cidades, ou de edifícios. No entanto, a aplicação destes modelos implica elevado custo computacional, sobretudo

do quando se pretende modelar uma cidade inteira, devido à complexidade da geometria exigida (elevado número de pontos que constituem a malha do domínio a simular) e exigindo o recurso a computadores com elevada capacidade de cálculo para a obtenção de resultados de qualidade e fidedignos.

É neste contexto de carência de alternativas funcionais para a avaliação do potencial eólico em ambiente urbano, simultaneamente de fácil aplicação, precisão aceitável e reduzido custo, que o LNEG se encontra actualmente a desenvolver uma metodologia inovadora, que poderá no futuro ser de grande aplicabilidade no sector das micro-turbinas eólicas.

3.1. W.URBan – uma metodologia para avaliação do recurso eólico em ambiente urbano

A metodologia W.URBan, em desenvolvimento pelo LNEG, baseia-se na geração de uma superfície de cotas envolvente aos edifícios de uma dada área urbana, a qual é posteriormente tratada em termos computacionais, como se de um terreno com orografia muito complexa se tratasse. A avaliação do potencial eólico e o correspondente mapeamento são então efectuados por aplicação de um modelo computacional linear (e.g. modelo WASP), sendo desta forma possível reduzir custos computacionais e simplificar o mapeamento da malha urbana.

Tornando-se necessário estruturar uma metodologia que possa ser reproduzida a outras cidades, a metodologia carece ainda de calibração e validação, procedimento actualmente em curso para zonas da cidade de Torres Vedras. Para este efeito, o recurso a modelos CFD existentes - quer desenvolvidos para aplicação em terrenos complexos, quer para sólidos representativos dos edifícios - afigura-se como a solução mais interessante para proceder a uma primeira validação da metodologia.

Numa primeira fase de verificação de resultados, seleccionaram-se dois modelos tridimensionais CFD: o modelo UrbanWind (geometria natural dos edifícios – sólidos) e o modelo WindSim (superfície de cotas so-

bre área de edifícios).

3.2. Modelos para avaliação do potencial eólico

O modelo de microescala WASP é, provavelmente o mais conhecido e utilizado entre as entidades que se dedicam ao estudo do potencial eólico. Este é um modelo de escoamento potencial muito simples, que não tem a capacidade de modelar o comportamento do vento em zonas com orografias complexas ou em meios potencialmente muito turbulentos como são as áreas urbanas. No entanto, e apesar de todas as limitações deste modelo, para mapeamentos preliminares do escoamento atmosférico - em que é aceitável uma menor precisão - a sua utilização pode ser preciosa, principalmente quando a redução de custos computacionais constitui um factor importante.

Os modelos WindSim [9] e UrbaWind [10] resolvem ambos as equações médias de Navier-Stokes recorrendo à decomposição de Reynolds (RANS) para um fluido incompressível [11]. A decomposição de Reynolds define qual a variável do escoamento que pode ser separada na componente média (componente média no tempo) e na componente flutuação.

Ambos os modelos CFD utilizados recorrem a uma modelação de turbulência k-epsilon como fecho das equações. No caso do modelo WindSim, este apresenta como opção, o modelo k-epsilon modificado, de forma a adaptar a turbulência às características de uma camada limite de atmosfera neutra.

4. Caso de estudo

Para testar a metodologia desenvolvida, seleccionou-se uma área da cidade de Torres Vedras e procedeu-se ao mapeamento do potencial eólico com recurso à metodologia W.URBAN e a dois dos modelos anteriormente apresentados.

Em qualquer dos casos utilizou-se uma série de dados de velocidade e direcção do vento, obtida a partir do Atlas do Potencial Eólico de Portugal continental, para um ponto próximo da área em estudo. Para reproduzir a complexidade da área urbana, utilizou-se

um mapa de orografia da cidade em análise e área envolvente, com espaçamento entre curvas de nível de 10m, no qual se introduziu uma superfície gerada com base na geometria dos edifícios e respectivas cotas de telhado, esta com espaçamento entre curvas de nível igual a 1m.

As figuras 9 representam a área em análise e malha urbana gerada com recurso a geometria e a altura dos edifícios, por aplicação da metodologia W.URban e do modelo WASP.

Os resultados obtidos por ambos os modelos são muito próximos, muito embora a aplicação do modelo WindSim, apresente valores ligeiramente mais conservativos da velocidade do vento.

A mesma área de edifícios, foi igualmente testada com o modelo UrbaWind, tendo-se recorrido à representação dos edifícios na sua geometria natural, isto é, tratando-os como sólidos. Os resultados obtidos por aplicação deste último modelo revelam-se igualmente próximos dos obtidos pelos dois modelos anteriores, muito embora a geometria dos edifícios e a natureza deste modelo, represente de forma mais fiel a turbulência deste tipo de ambientes que é atenuada, nos dois casos anteriores, pela introdução da superfície de cotas.

A fase de validação e calibração desta metodologia continua a ser desenvolvida, estando actualmente a decorrer simulações com a aplicação do modelo UrbaWind em outras zonas da cidade. Os resultados obtidos, permitirão identificar as zonas onde a metodologia W.URban sobrestima a velocidade do vento. Deste modo será possível estabelecer factores de calibração que possibilitarão representar espacialmente de forma precisa, mas simples, o recurso energético do vento na área em análise.

5. Síntese

O sector da micro-geração eólica pode ter uma contribuição importante na produção distribuída doméstica em Portugal, quer numa vertente puramente energética, quer numa vertente numa tecnológica, com o potencial envolvimento de empresas nacionais na industrialização, optimização e produção

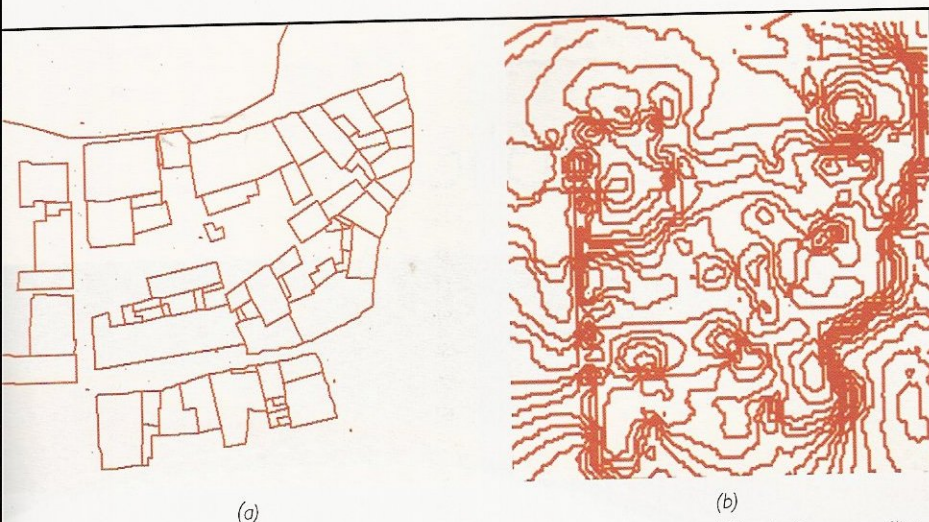


Figura 8 (a) área em análise e (b) malha urbana construída com base nas cotas dos edifícios da área em análise.



Figura 9 Velocidade do vento (a) 10 m (b) 16 m e (c) 20 m acima do solo obtida com base na superfície de cotas gerada acima dos edifícios – estimativa W.URBan.



Figura 10 Velocidade do vento (a) 10 m (b) 16 m e (c) 20 m acima do solo obtida com base na superfície de cotas gerada acima dos edifícios – estimativa WindSim.

das tecnologias e know-how já desenvolvidos pelo sistema científico nacional. Como qualquer sector inovador, também a penetração destas tecnologias no mercado não é isenta de desafios, apontando-se como a mais relevante a extrema dificuldade em caracterizar o recurso eólico em ambiente urbano, quando as normais metodologias de base experimental, utilizadas na avaliação energética de parques eólicos, se afiguram impraticáveis face à reduzida escala do investimento em micro-turbinas. O LNEG, tendo já contribuído no sector tecnológico, encontra-se actualmente a desenvolver metodologias de identificação do recurso eólico que, pese embora permitam aceder apenas a uma mera estimativa aproximada da produção de uma micro-turbina eólica em ambiente urbano, possam contribuir para que os investimentos nestas tecnologias renováveis do sector doméstico, se possam configurar como mais seguros e alicerçados em ferramentas técnico-científicas validadas, num futuro muito próximo. [lm](#)

Referências

- [1] Sinisa Stankovich, Neil Campbell, Alan Harries, Urban Wind Energy, Earthscan - BDSP Partnership Ltd, 2009, pp190.
- [2] IEC 61400-2, Ed2.0. Wind turbines - Part 2: Design requirements for small wind turbines. 2006, pp 90.
- [3] Wilson, R.E. and Lissaman, P.B.S. Applied Aerodynamics of Wind Power Machines, Oregon State University, RANN, 1974, pp 160..
- [4] Henriques, J.C.C., F. Marques da Silva, A.I. Estanqueiro, L.M.C. Gato. Design of a new urban wind turbine airfoil using a pressure-load inverse method. In Renewable Energy, Volume 34, Issue 12, December 2009, Pages 2728-2734.
- [5] Simões, T., P.Costa, A. Estanqueiro, A first methodology for wind energy resource assessment in urbanised areas in Portugal, 2009 European Wind Energy Conference, Marseille, March 2009.
- [6] Simiu, E. and R. H. Scanlan, Wind effects on structures, Wiley Interscience, second edition, 1986, pp589.
- [7] Paulo Costa, P. Miranda, A. Estanqueiro, Development and Validation of the Portuguese Wind Atlas, 2006 European Wind Energy Conference Proceedings, Athens.
- [8] Niels G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen, E.L. Petersen (Editors), Wind Atlas Analysis and Application Program (WASP), Vol. I: Getting Started, Risoe National Laboratory, 1983.
- [9] UrbaWind, version 1.5.0.0, copyright © Meteodyn 2008
- [10] Erich J. Plate, Engineering Meteorology, Elsevier Scientific Publishing Company, 1982, pp740.