

Desafios e tendências na avaliação do recurso eólico

Luís Frölen Ribeiro^{a,b} e Filipe Marques^{a,b}

^aInstituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia - Apartado134, 5301-857Bragança, Portugal, Email: frolen@ipb.pt

^bCE^sA – Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – Rua Dr. Roberto Frias s/n 4200-465 Porto, Portugal

Resumo

Com o desenvolvimento de aerogeradores cada vez maiores aumenta a necessidade em caracterizar os campos médio e turbulento do escoamento cada vez mais afastados do solo (mais de 100 m). Tal começa a exigir uma alteração da metodologia de caracterização do recurso eólico até então aplicada, nomeadamente através do recurso a anemómetros (de copos ou sónicos) instalados em torres, por técnicas remotas de avaliação do recurso. Comparam-se as vantagens e inconvenientes da adopção dos anemómetros de copos e sónicos contra técnicas remotas como os SODARs e LIDARs. Estes últimos começam a ser identificados pela indústria eólica como uma nova e possível tecnologia no apoio sistemático à caracterização do recurso eólico, já havendo resultados de campanhas de medição em terrenos planos. A situação em terreno complexo é mais delicada uma vez que o escoamento horizontal poderá não ser linear na área medida pelo LIDAR, sendo essa uma futura linha de investigação. Apresenta-se um local a 1200 m de altitude na Serra da Nogueira, Portugal, para elaboração da confrontação de medições convencionais entre anemómetros de copos e sónicos instalados em torre contra medições efectuadas com LIDARs.

Abstract

As the wind turbine size increases, also the need to characterize the mean and turbulent flow further away from the ground also increases (over 100 m a.g.l.). Thus, wind resource assessment methodology used so far, lying in tower based cup and sonic anemometers are being shifted towards remote sensing techniques. Here we compare advantages and disadvantages of cup and sonic anemometer techniques against remote sensing techniques such as SODAR and LIDAR. The latest technique has been identified by wind industry as a new, and possible, systematic technique in the support of wind resource assessment studies, being the first comparative flat terrain results published. The complex or mountainous terrain case is quite more complicated because there is no guarantee that the horizontal flow is homogenous, being that our future research goal. A complex terrain site has been identified at 1200 m at Serra da Nogueira in Portugal for a instrument comparison of cup and sonic anemometers against LIDAR measurements.

1. Introdução

A energia disponível no vento varia com o cubo da velocidade, equação (1). Assim, quer-se que as medições do recurso eólico sejam efectuadas com bastante acuidade e elevada resolução temporal (no limite da constante de distância do anemómetro de copos) para que os momentos estatísticos dos campos médio e turbulento do escoamento sejam correctamente determinados. A incerteza experimental não deverá admitir erros superiores a 10 cms⁻¹ enquanto o limite da constante de distância do anemómetro de copos impõe amostragens tradicionalmente entre 0,33 a 0,50 Hz.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

Os mais variados intervenientes envolvidos na indústria eólica: fabricantes de aerogeradores, agentes financiadores, empresas de consultoria e donos do empreendimento, entre outros, pretendem mitigar a incerteza na produtividade da conversão eólico/eléctrico. Assim, as normas, bem como a prática, determinam que as medições sejam efectuadas à altura do eixo do rotor da futura máquina a instalar.

Nos primeiros anos de desenvolvimento da energia eólica, década de 80, os aerogeradores não ultrapassavam os 20 a 30 m de altura, com uma potência nominal máxima de 30 kW. Actualmente, os aerogeradores assumem dimensões inimagináveis para os pioneiros desta indústria. Na segunda metade da década de 2000, os parques eólicos em Portugal já recebiam equipamentos com uma potência 100 vezes superior, 3000 kW, com o eixo do rotor instalado a 90-100 m de altura do solo. A prática da medição à altura do rotor tornou-se cada vez mais difícil e economicamente dispendiosa. Novos desafios são colocados com o surgimento dos aerogeradores Multi-MegaWatt onde a necessidade em medir o escoamento a uma altura do solo superior a 100 m começa a por em causa a o uso exclusivo das técnicas experimentais aceites até a data. Veja-se o caso da Enercon E-126 de 6 a 7,5 MW de potência nominal, com diâmetro de rotor de 126 m instalado a 135 m de altura, Figura 1. Em terreno montanhoso e complexo, medições pontuais para determinação do recurso eólico, visando a instalação deste tipo de aerogerador, são claramente insuficientes, quer pela não determinação do perfil vertical da velocidade do vento, quer pela não caracterização de uma vasta área varrida por um rotor de 126 m. Corre-se o risco de não identificar eventos turbulentos induzidos pela orografia limitativos da operação e funcionamento dos aerogeradores.



Figura 1. Enercon E-126 – Potência nominal entre 6 a 7,5MW. O eixo do rotor encontra-se a 135 m de altura para um diâmetro de rotor de 126 m. O campo de futebol é apresentado à escala.

Neste artigo abordamos as técnicas de medição em terreno complexo para avaliação do recurso eólico, bem como novos caminhos de investigação que se apresentam na determinação dos campos médios e turbulentos do escoamento em terreno complexo tendo em vista a instalação de aerogeradores Multi-Megawatt em terreno complexo.

2. Técnicas de Medição

2.1 Anemómetros de copos

Os anemómetros de copos são os instrumentos de eleição na medição do campo médio da velocidade, e na energia eólica não são uma excepção. Apresentam uma série de vantagens que vão desde custo, precisão e reduzida sensibilidade à precipitação. No entanto, são instrumentos de elevada não linearidade, respondendo mais rapidamente ao aumento da velocidade que à sua diminuição (Wyngaard, 1981). Quanto mais turbulento for o escoamento, mais acentuado é este comportamento, levando o anemómetro de copos a sobrestimar o campo médio de velocidades. Ribeiro (2005) registou num parque eólico, em terreno complexo e com valores de intensidade de turbulência superiores a 30%, uma sobrestimativa na componente horizontal do escoamento de 9,4% quando comparados com um anemómetro sónico. Outra limitação é a sensibilidade dos anemómetros de copos às componentes não horizontais do escoamento. Variações de $\pm 4\%$ foram identificadas em escoamentos com inclinações entre -10 e 12° (Papadopoulos *et al.*, 2001).

Os anemómetros de copos estão longe de ter os seus dias contados no universo da energia eólica. Instituições nacionais e entidades certificadoras estabeleceram metodologias e determinaram critérios de desempenho dos anemómetros que aumentam a credibilidade de todo processo de estimativa do campo médio e turbulento do escoamento. Os anemómetros de copos continuam a ser os instrumentos de referência na determinação do campo médio de velocidades. Calibrações padronizadas são garantidas por uma rede de instituições certificadoras dentro da MEASNET (www.measnet.com), criada para aumentar a confiança dos intervenientes desta indústria.

2.2 Anemómetros ultra-sónicos

Os anemómetros/termómetros ultra-sónicos, que por simplicidade são denominados anemómetros sónicos, medem o campo de velocidades e a temperatura num determinado volume de controlo. Este volume de controlo é determinado pelos pares de transdutores (Figura 2). Para um anemómetro que mede as 3 componentes do campo médio da velocidade, o volume de controlo é determinado pelos 3 pares de transdutores que enviam e recebem reciprocamente o pulso de ultra-sons. Assim, conhecendo as propriedades termodinâmicas do ar para uma situação de escoamento nulo, e determinada a velocidade do som bem como a distância entre transdutores, saberemos, através do atraso ou adiantamento do pulso de som, qual a componente do vento no caminho do par acústico.



Figura 2. Anemómetro sónico METEK modelo USA-1 de configuração simétrica e não ortogonal.

A equação 2 mostra a velocidade como distância sobre o tempo: sendo d a distância entre transdutores e o tempo a diferença de recíprocos – t_1 o tempo que o pulso demora entre a saída do transdutor 1 até o transdutor 2 e t_2 o inverso. Este processo é repetido para os

restantes pares sendo possível determinar as componentes longitudinal, transversal e vertical do campo de velocidades (Oncley, 1999).

$$V_d = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) [\text{ms}^{-1}] \quad (2)$$

Por sua vez as medições da temperatura se aproximam da medição directa da temperatura virtual (Kaimal & Finnigan, 1994), sendo, contudo, de importância reduzida nos estudos do recurso eólico.

As maiores vantagens dos anemómetros sónicos residem na determinação de 3 componentes da velocidade do escoamento, sendo o instrumento de eleição na determinação da turbulência das escalas que não podem ser captadas pelos anemómetros de copos. A sua taxa de amostragem pode chegar, consoante o modelo, aos 50 Hz. Outra grande vantagem dos anemómetros sónicos é a sua calibração. Por não ter partes móveis, a calibração é absoluta, depende apenas da manutenção da distância entre transdutores.

Alguns cuidados tem que existir em compensar o efeito das distorções dos transdutores no escoamento na calibração. Devido à configurações geométricas distintas entre fabricantes, cada instrumento necessita de calibração individual. Alguma atenção tem que ser focada no ângulo de incidência do escoamento (azimute e inclinação) uma vez que, para a mesma inclinação, Ribeiro (2005) verificou desvios de $\pm 12\%$ consoante o azimute.

A sua utilização em energia eólica tem-se confinado a empreendimentos em terrenos complexos e montanhosos, onde o intuito é verificar se as componentes verticais ou eventos coerentes podem vir a condicionar o desempenho dos aerogeradores (Ribeiro, 2005; Ribeiro & Palma, 2007). As medições do campo turbulento de velocidades com anemómetros sónicos correspondem a parte de uma metodologia mais vasta desenvolvida pelo CESA – Centro de Estudos de Energia Eólica e Escoamentos Atmosféricos – no complemento da informação de simulações sobre vastas áreas de terreno elaboradas com o programa de modelação de escoamentos sobre terreno complexo VENTOS® (Palma *et al.*, 2008).

A indústria eólica começa a integrar anemómetros sónicos no topo da *nacelle* dos aerogeradores para monitorizar o seu funcionamento. O seu uso na indústria eólica não se compara com o da micrometeorologia, onde são usados intensivamente em combinação com outros sensores de resposta rápida na determinação de fluxos de quantidade de movimento, calor ou concentrações (Mauder *et al.*, 2007). No entanto, devido à sua sensibilidade à chuva, estes instrumentos não são usados na determinação da potência eólica de um determinado local, recaindo a opção aos anemómetros de copos.

2.3 SODAR

O SODAR é o acrónimo de *SOund Detection And Ranging* e também é um instrumento de medição do perfil da velocidade da atmosfera. Do solo, emite para a atmosfera um curto impulso de som ascendente a uma determinada frequência. A alteração da frequência por efeito Doppler no sinal recebido é proporcional à componente da velocidade do vento no alinhamento da direcção de emissão. Combinando três ou cinco desses impulsos, normalmente um na vertical e dois ou quatro inclinados com a vertical, calculam-se os campos médio e turbulento do escoamento.

Apesar de um SODAR ser capaz de medir os perfis da velocidade nas alturas das áreas varridas pelo rotor dos aerogeradores, sua utilização em energia eólica ainda tem sido residual, estando longe de se constituir uma técnica universalmente aceite. Muitas são as razões que podem apontar para sua atractividade ser reduzida: preço, volume, incerteza nas medições ou simplesmente desconhecimento da técnica experimental. Relativamente às possíveis razões, quer o preço e volume poderão ser os que mais facilmente superados. O aluguer de um SODAR pode ser facilmente incorporado no valor de execução de um projecto eólico. O seu volume condiciona exclusivamente os meios de colocação do equipamento no sítio, que eventualmente, no caso de ser terreno montanhoso ou complexo é mais trabalhoso instalar.

Limitações no domínio da técnica e falta de garantias quando à qualidade das medições são provavelmente os maiores obstáculos à sua aplicação intensiva em energia eólica. Sua sensibilidade às condições atmosféricas, dificuldade no pós-processamento dos dados para obtenção dos perfis de velocidade bem como resolução experimental não inferior a $\pm 1 \text{ ms}^{-1}$ (EPA, 2000) impõe constrangimentos no uso desta tecnologia para fins de determinação do recurso e/ou potencial eólico.

A emissão de sinais acústicos limitam também a sua utilização a dois níveis: quer o ruído provocado pelo SODAR condiciona sua utilização em zonas habitacionais; quer o ruído provocado por camiões e aviões perturba as medições. Um exemplo foi a necessidade de proteger o SODAR durante a o Programa EBEX01 do ruído de camiões de uma estrada próxima (Oncley *et al.*, 2007).

2.4 LIDAR

O LIDAR (Light Detection And Ranging) é um equipamento para medição da velocidade do vento que cujo processo se baseia no efeito Doppler da luz de partículas em suspensão na atmosfera. Um feixe de laser é emitido de um ponto fixo na superfície para um volume de controlo na atmosfera. A alteração da frequência do luz emitida, provocada pelas partículas em suspensão, é parcialmente reflectida de volta para superfície terrestre sendo captada por um detector, Figura (3).

A medição num Lidar é conseguida através da potência do sinal recebido (P_s) e pode ser traduzido pela seguinte expressão:

$$P_s = \eta_{ox} \eta_{Tx} E_x T^2 \left(\frac{c\beta}{2} \right) \left(\frac{Ar}{R^2} \right) \quad [W] \quad (4)$$

Trata-se da dependência do desempenho e geometria do equipamento em conjunto com a quantidade de sinal reflectido de volta ao equipamento (β), desde uma certa distância (R) para um factor de transmissão (T) que traduz a quantidade de radiação (luz) perdida no caminho até e desde essa distância. O desempenho e geometria podem ser ajustadas pelo utilizador e são caracterizadas por perdas ópticas (η_{ox}) e de truncagem (η_{Tx}), pela energia do laser (E_x) bem como pela área do receptor (Ar).

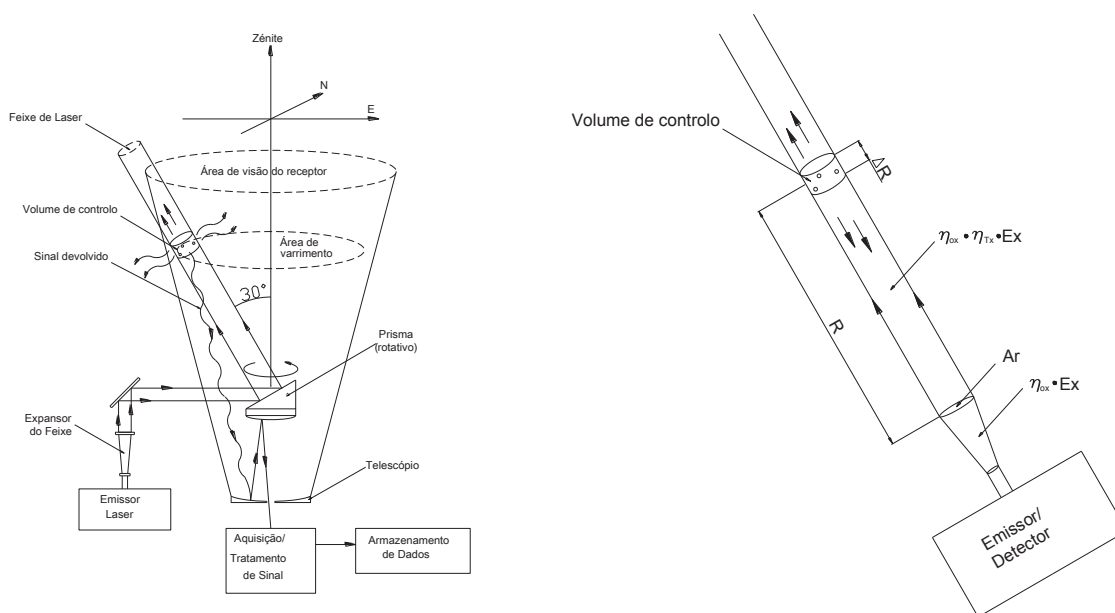


Figura 3. Ilustração da geometria de um Lidar com indicação do cone de medição (Weitkamp, 2005)

São denominados de Wind Lidar ou Coerent Laser Radar (CLR) ou ainda Coerent Doppler Lidar (CDL). Existem vários tipos de LIDARs quais podem ser distinguidos: pelo processo físico, pela plataforma onde se encontra instalado, zona atmosférica de detecção, tipo de sinal, constituintes a detectar, entre outros critérios. Podemos distinguir dois tipos diferentes dentro dos CLR recentemente usados na energia eólica: feixe laser contínuo (ZephIR da QinetiQ) ou pulsado (WindCube).

No caso do ZephIR, o feixe de laser é emitido através de um prisma que roda continuamente e provoca a reflexão do feixe num ângulo de 30° com a vertical e perfaz uma volta completa a cada segundo. Em testes efectuados foi possível medir a 5 alturas distintas, cada uma a cada 3 s. No caso do WindCube, consegue-se recolher simultaneamente resultados de diferentes alturas (até 10) por ser um sistema pulsado (Courtney *et al.*, 2008). O seu prisma de reflexão é fixo mas também apresenta um ângulo de 30°. A diferença fundamental consiste no envio de um conjunto de pulsos (5000 a 10000) numa dada direcção cujos sinais reflectidos de voltasão tratados e armazenados. Roda-se o prisma 90° para um novo azimute e repete-se o processo. Uma volta completa demora aproximadamente 6 segundos (Mikkelsen, 2009).

As limitações de ambos os instrumentos residem no facto de assumirem um escoamento horizontal homogéneo. Esta premissa, apesar de válida em terreno plano, poderá não ser verdadeira em terreno complexo. Neste caso, para o WindCube, uma eventual solução é a troca do prisma por outro de 15° o que reduzirá o erro devido à complexidade do escoamento. A consequência é a redução da resolução na velocidade horizontal (Mikkelsen, 2009).

Os primeiros resultados de testes comparativos destes dois modelos em terreno plano tem sido promissores uma vez que a resolução pretendida da componente média da velocidade, inferior a 1 cm s^{-1} , tem sido alcançada quando comparados contra anemómetros de copos. Ambos os modelos mostraram-se bastante precisos havendo um ligeiro desvio sistemático de 7.3% do ZephIR para alturas de 48 m. Ambos instrumentos apresentam correlações elevadas para médias horárias da velocidade do escoamento, 0,95 do ZephIR contra 0,99 do WindCube. Para médias sobre períodos mais curtos, i.e. 10-minutos, os dados do WindCube mantém uma correlação elevada contra as medições de referência com R^2 a variar de 0,95 a 100 m do solo para 0,99 a 200 m do solo. Os valores de R^2 para o ZephIR são ligeiramente inferiores, mantendo-se na ordem de 0,94 para as alturas mais elevadas.

3. Conclusões e trabalhos futuros

A existência de medições adequadas, à altura do eixo do rotor e a com garantias que sejam representativas da sua área varrida, continuam a ser essenciais para a redução do risco financeiro de um projecto eólico. Contudo, ainda não foi alcançado o consenso sobre que tecnologia seria a mais adequada: SODAR ou LIDAR, apesar deste último estar a colher cada vez mais adeptos.

O recurso à instalação de torres meteorológicas instrumentadas, quer com anemómetros de copos, quer com anemómetros ultrasónicos, com mais de 100 m, é complexo e principalmente muito moroso. A configuração de equipamento algum domínio da instrumentação: vários sensores com taxas de amostragem distintas são integrados e sincronizados com um mesmo relógio armazenando tudo num mesmo sistema. Esta metodologia é o padrão porque permite, ainda, caracterizar o escoamento à altura do eixo do rotor. Com o aumento esperado da dimensão dos aerogeradores, começa-se a atingir um claro limite de aplicabilidade.

Por sua vez, os resultados obtidos com LIDAR em terreno plano são animadores, mas é necessária cautela na sua utilização em terreno montanhoso ou complexo. Não temos registo de nenhuma campanha de medição com elaborada nestas condições. Estes autores estão a preparar uma campanha de medição com um LIDAR da ZephIR recentemente adquirido para explorar esta técnica experimental em terreno complexo. Pretende-se almejar

2 objectivos: o domínio da técnica experimental; caracterizar sua aplicabilidade em terrenos de orografia complexa ou montanhosa.

Tal como a experiência de Courtney *et al.*, 2008, pretende-se proceder à confrontação dos resultados do LIDAR com os resultados de uma torre meteorológica instrumentada, mas ao contrário dessa experiência, a torre instalada será menor (100 m de altura). A torre será instrumentada com 2 anemómetros sónicos colocados a 80 e 100 m e 4 anemómetros de copos instalados a 40, 60, 80 e 100 m do solo.

O processo de identificação dos locais passíveis de acolherem esta futura campanha de medições considerou não apenas os locais com orografia complexa e boa exposição como questões associadas à logística, nomeadamente acessos às redes viária, eléctrica e de comunicações. O local seleccionado encontra-se na Serra da Nogueira (41° 43' 33,82"; -6° 51' 29,15") a 1200 m de altitude, nos limites dos Concelhos de Bragança e Macedo de Cavaleiros. Dada a existência de uma casa florestal desocupada, pretende-se, após a sua recuperação, que este local venha a ser um futuro laboratório de instrumentação em terreno complexo para adequação de técnicas de medição à tecnologia eólica.

Referências bibliográficas

- Courtney, M.; Wagner, R.; Lindelöw, P., 2008. Commercial LIDAR profilers for wind energy. A comparative guide. Proc. of the 2008 European Wind Energy Conference, Brussels.
- EPA, 2000. Environmental Protection Agency - Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications EPA-454/R-99-005.
- Kaimal, J.C.; Finnigan, J.J., 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows – Their Structure and Measurement, Oxford University Press.
- Mauder, M.; Oncley, S.P.; Vogt, R.; Weidinger, T.; Ribeiro, L.M.F.; Bernhofer, C.; Foken, T.; Kohsiek, W.; DeBruin, H.A.R.; Liu, H., 2007. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of Eddy-Covariance Sensors and Post-Field Data Processing Methods. *Boundary-Layer Meteorology*, 123: 29-54.
- Mikkelsen, T., 2009. On mean wind and turbulence profile measurements from ground-based wind lidars: limitations in time and space resolution with continuous wave and pulsed lidar systems - a review, 2009 European Wind Energy Conference and Exhibition.
- Papadopoulos, K.H.; Stefanatos, N.C.; Paulsen, U.S.; Morfidakis, E., 2001. Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field. *Boundary-Layer Meteorology*, 101: 77-107.
- Palma, J.M.L.M.; Castro, F.A.; Ribeiro, L.F.; Rodrigues, A.H.; Pinto, A.P., 2008. Linear and nonlinear models in wind resource assessment and wind turbine micro-siting in complex terrain, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96: 2308-2326.
- Ribeiro, L.M.F., 2005. Sonic Anemometer and Atmospheric Flows over Complex Terrain, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Ribeiro, L.M.F.; Palma, J.M.L.M., 2007. Point (Sonic Anemometer) Measurements in a Gusty Wind over Complex Terrain. *Advances in Turbulence XI – Springer*.
- Oncley, S.P., 1999. The leading edge of turbulence instrumentation. In: *Air-Sea Exchange: Physics, Chemistry and Dynamics*, pp. 1-28. Kluwer Academic Press.
- Oncley, S.P.; Foken, T.; Vogt, R.; Kohsiek, W.; DeBruin, H.; Bernhofer, C.; Christen, A.; Gorsel, E.; Grantz, D.; Feigenwinter, C.; Lehner, I.; Liebenthal, C.; Liu, H.; Mauder, M.; Pitacco, A.; Ribeiro, L.M.F.; Weidinger, 2007. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorology*, 123: 1-28.
- Weitkamp, C., 2005. Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer.
- Wyngaard, J.C., 1981. Cup, propeller, vane and sonic anemometer in turbulent research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13: 399-423.