

Resumo

O objectivo desta tese é o estudo e aplicação de anemómetros sónicos no âmbito da energia eólica para caracterização dos campos médio e turbulento do escoamento sobre terreno complexo. São explorados os resultados de medições com anemómetros sónicos em quatro situações distintas: terreno plano com elevada rugosidade e evapo-transpiração; túnel aerodinâmico; e duas situações de terreno complexo na Ilha da Madeira, terreno costeiro e montanhoso.

A variabilidade das medições dos dois primeiros momentos estatísticos é explorada no caso do terreno plano onde instrumentos de 3 fabricantes, NUW do NCAR, modelo CSAT-3 da Campbell Scientific Inc., e modelo HS da Gill Solent Instruments, num escoamento com gradientes térmicos e evapo-transpiração elevados. Verificou-se dos primeiros momentos estatísticos da velocidade e temperatura uma correlação entre instrumentos de 0.99 e dos segundos momentos correlações que variavam de 92 a 99%, em concordância com resultados obtidos sobre outro tipo de terreno. O instrumento cujo desempenho se pode classificar como superior foi o Campbell (modelo CSI-3). No entanto, para efeitos de estudos do recurso eólico e turbulência atmosférica para fins energéticos as diferenças entre instrumentos são desprezáveis.

Quantificou-se em túnel aerodinâmico a distorção (*transducer shadow effect*) de um anemómetro sónico Metek (modelo USA-1) para velocidades entre os 4 e 16 ms^{-1} , todas as direcções e inclinação com o escoamento a variar entre $\pm 25^\circ$. Os resultados indicaram a existência de zonas de desaceleração e aceleração do escoamento a variar de -12 a +5%. As distorções foram corrigidas para um máximo de $\pm 0.1\%$ depois de aplicada uma matriz de correcção que contabilizava a direcção e ângulo do escoamento. As medições de temperatura não eram afectadas.

Medições com dois anemómetros, copos e sónico (NRG modelo 40 e Metek modelo USA-1), foram efectuadas no cimo de uma turbina eólica, em terreno complexo, para investigar as possíveis causas do seu mau funcionamento. Dado o carácter transiente do campo médio de velocidades recorreu-se a técnicas espectrais, transformadas de ôndula e análise de quadrante para análise das medições, que foram confrontados favoravelmente com resultados de simulações computacionais que indicavam a presença de vórtices com periodicidade de 2.5-min na vizinhança da turbina. As medições confirmaram a existência de vórtices com

uma diferença em periodicidade de 14% relativamente às simulações indicando também a existência de estruturas coerentes como *sweeps* e *ejections* com componentes verticais a exceder os 20 ms^{-1} . As medições da velocidade média com anemómetros de copos foram superiores em 3.2% e as médias temporais de 10 minutos são reveladas como uma limitação da metodologia actual para avaliação do recurso eólico.

Os mesmos anemómetros foram usados no segundo caso de escoamentos sobre terreno complexo, agora a 40 m do solo no planalto do Paul da Serra, Ilha da Madeira, a 1500 m de altitude. Mostrou-se que as componentes verticais eram reduzidas apesar da torre de medição estar a poucos metros de uma encosta. Comparações entre anemómetros mostraram que a velocidade média medida pelo sónico era inferior em 1% relativamente ao anemómetro de copos e que a intensidade de turbulência medida pelo sónico era superior em 11%. A análise da turbulência indicou que o escoamento tinha características de um escoamento sobre terreno plano, com it , $\sigma(v)/\sigma(u)$ e $\sigma(w)/\sigma(u)$ respectivamente com 8, 91 e 60%. Análise aos dados de outras estações do Paúl, afastadas de 2 a 5 km, indicaram efeitos induzidos pelo terreno que desviavam o escoamento quer para ventos de nordeste como de sudoeste (115 a 72°). Verificou-se que os níveis de turbulência neste local não comprometem o funcionamento de aerogeradores.

Abstract

The objective of this thesis was the study and application of sonic anemometers in turbulent flows over complex terrain for wind energy purposes. The results from sonic anemometer measurements under 4 different situations were explored: flat terrain with large evapotranspiration, wind tunnel, and two complex terrain sites at Madeira Island, coastal and mountain.

For the flat terrain case we compared the variability of 1st and 2nd statistical moments of sonic anemometers from 3 manufacturers: NUW from NCAR, model CSAT-3 from Campbell Scientific Inc., and model HS from Gill Solent Instruments, in a flow with large evapotranspiration and temperature gradients. Mean correlations for wind velocity and temperature 1st moments were 99% while 2nd moments correlations varied from 92 to 99% in agreement with results on different terrains. The instrument whose performance could be classified as superior was Campbell (model CSI-3). However, for the purpose of wind resource assessment studies instrument differences are negligible.

The transducer shadow effect of a Metek (model USA-1) sonic anemometer was quantified in wind tunnel for velocities from 4 to 16 ms^{-1} , all azimuth angles and flow inclination of $\pm 25^\circ$. The results showed deceleration and acceleration areas from -12 to +5%. Instruments deviations were reduced to a maximum of $\pm 0.1\%$ after applying a correction matrix for a given direction and inclination of the flow. Temperature measurements were not affected.

Cup and sonic anemometer measurements (NRG model 40 and Metek USA-1) were made on a wind turbine nacelle, in complex terrain, to investigate the possible reasons for its performance below expected. Due to large transient characteristics of the mean flow, we recur to spectral, wavelet and quadrant analyses of the measurements, that were favorably confronted against computer simulations that indicated the existence of vortices with periodicity of 2.5-min in the vicinity of the turbine. The measurements validated a periodicity difference of 14% in the results and showed also the existence of coherent events such as sweeps and ejections with vertical components in excess of 20 ms^{-1} . Cup anemometer mean velocity measurements were 3.2% higher against sonic and limitations of the standard wind resource assessment based on 10 minute averaging intervals were revealed due to low resolution.

The same anemometers were used in the second complex terrain case, now at 40 m above ground level on the Paul da Serra plateau, Madeira Island, at 1500 m altitude. It was showed that vertical components were reduced in spite of the tower location, few meters from a cliff. Cup anemometer mean velocity was 1% higher against sonic while turbulence intensity was 11% higher for sonic against cup anemometer. The analysis of turbulence showed that the flow was close to a flat terrain case, with it , $\sigma(v)/\sigma(u)$ and $\sigma(w)/\sigma(u)$ respectively 8, 91 and 60%. Data analysis from other stations of Paúl located from 2 to 5 km apart showed that terrain induced effects shifted the flow in one station for northeast and southwest winds (115 a 72°). Turbulent intensity at all 4 stations on the plateau was within wind turbine design values.