

Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para obtenção do perfil vertical de temperatura em estudos sobre o Número de Richardson em torres anemométricas

Vanessa Almeida de Siqueira¹
Arcilan Trevenzoli Assireu²
José Carlos Mendonça³
Felipe Mendonça Pimenta⁴

¹ Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI
Rua Jarbas Guimarães, 234 - 37504-022 - Itajubá - MG, Brasil
vanessa_asiqueira@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI
Caixa Postal 96 - 13416-000 - Itajubá - MG, Brasil
arcilan@unifei.edu.br

³ Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF
Av. Alberto Lamego, 2000 - 28013-602, Campos dos Goytacazes - RJ, Brasil
mendonca.josecarlos@gmail.com

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Trindade, Florianópolis - 88040-900 – Florianópolis - SC, Brasil
felipe.mendonca@gmail.com

Abstract. This paper shows the application of an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for monitoring the Atmospheric Boundary Layer (ABL), with temperature profile measurements, in order to obtain the Richardson Number. The system has the capacity to contribute in applications in wind energy, meteorology, air quality, hydrology, mesoscale meteorology, biometeorology, study of waves electromagnetic propagation and models of weather and climate forecast. As a result, it was observed that moderately intense wind conditions and additional instrumentation weight (temperature sensors) have not compromised the stability and autonomy of the quadricopter. Therefore, the use of UAVs in atmospheric measurements, in addition to those usually used in data collection, such as ground platform, towers, meteorological balloons, radiosondes, manned airplanes, lidar, sodar and radar, has proved to be advantageous and applicable.

Palavras-chave: unmanned aerial vehicles, temperature measure, atmospheric stability, veículo aéreo não tripulado, medidas de temperatura, estabilidade atmosférica.

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) evoluíram tecnologicamente e tornaram-se mais acessíveis, possibilitando a implantação de diversos projetos que visam sua aplicação em medições atmosféricas.

Na literatura, são documentadas diversas aplicações de VANTs na coleta de dados atmosféricos, em adição a dados obtidos por estações terrestres e sensoriamento remoto (Lenschow, 1986; Dias et al., 2012; Mayer et al., 2012; Reuder et al., 2012; Van Den Kroonenberg et al., 2012; Bonin et al., 2013; Wildmann et al., 2013; Wildmann et al., 2016).

A relação custo-benefício, autonomia, facilidade de uso, além da sua utilização como complementar aos demais métodos de Sensoriamento Remoto, são fatores importantes que tornam os VANTs uma boa ferramenta no estudo da Camada Limite Planetária (CLP).

A turbulência nesta camada depende das condições de estabilidade atmosférica conduzidas pelo aquecimento ou resfriamento da superfície terrestre e das características da interação entre

o campo de velocidade e a superfície. Um indicador dessas condições de estabilidade é o Número de Richardson (Filho, 2000).

A análise desta camada geralmente é realizada com base nos perfis térmicos obtidos por meio de radiossondagens, porém estas medições são realizadas apenas duas vezes ao dia em aeroportos de grandes cidades. Para se obter informações mais precisas em relação a evolução da CLP, é necessário um conhecimento mais detalhado do comportamento temporal e espacial da temperatura, sendo necessária uma maior frequência no levantamento destes perfis térmicos.

Além disso, a aplicação da radiossondagem para coleta de dados em determinadas regiões é dificultada pelo alto custo e a necessidade do transporte de equipamentos pesados.

Outras maneiras de se realizar medições atmosféricas são, por exemplo, por meio de torres meteorológicas ou anemométricas e sensores acoplados a balões cativos. Entretanto, existem desvantagens na utilização destes, pois as torres anemométricas não necessariamente possuem sensores de temperatura e umidade em diferentes níveis de altura, além de serem raras ou inexistentes em determinados locais. Em comparação aos VANTs, os balões possuem baixa estabilidade.

O uso de Lidar como uma forma de medida remota do perfil do vento vem sendo amplamente utilizado. Porém, o Lidar mede a apenas o vento, e em várias aplicações meteorológicas é necessário também o perfil da temperatura e umidade. O uso de VANTs adequadamente instrumentados poderia complementar estas medidas.

De acordo com Garrat (1994) e Filho (2000), o estudo da estrutura e desenvolvimento da CLP, além de questões relacionadas ao aproveitamento de energia eólica, é essencial em diversas áreas da meteorologia, como na poluição ambiental, pois a dispersão e diluição de poluentes do ar dependem das condições determinadas pela estrutura da turbulência; na meteorologia agrícola, devido à estimativa da evapotranspiração, que auxilia na quantificação da necessidade de água das plantas; na meteorologia aeronáutica, pois o conhecimento da turbulência na Camada Limite Superficial viabiliza a realização de pousos e decolagens em segurança; assim como na hidrologia, meteorologia de mesoescala, biometeorologia, estudo da propagação de ondas eletromagnéticas e até em modelos de previsão de tempo e clima.

Em meteorologia a utilização de VANTs em medições atmosféricas tem um grande potencial. Diante disso, este trabalho apresenta uma forma complementar às usualmente utilizadas na coleta de dados, tais como plataforma terrestre, torres, balões cativos, radiossondas, aviões tripulados, lidar, sodar e radar, por meio do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) equipados com instrumentação adequada para realizar estas medições.

2. Metodologia de Trabalho

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dados velocidade dos ventos, pertencentes a uma torre anemométrica (Figura 1a) do Parque de Energias Alternativas (PEA), localizada na Universidade Estadual do Norte Fluminense “Darcy Ribeiro”. Em conjunto, foi realizado um experimento, no qual obteve-se dados de temperatura a partir de um VANT instrumentado com sensores de alta portabilidade (ibutton), responsáveis pela medição desta variável (Figura 1c).

A torre possui 50 m de altura e cinco níveis de monitoramento: 50, 30, 15, 10 e 3 m de altura. Para a caracterização média da CLP na região de estudo foi realizada uma análise no período entre 30 de maio de 2009 a 03 de outubro de 2011 e, neste intervalo, além de intensidade do vento, estavam disponíveis dados de temperatura para cada nível. Já durante o experimento com o VANT, os dados desta variável estavam indisponíveis e os sensores de temperatura acoplados a ele foram posicionados nos mesmos níveis de medição da torre.

Neste estudo, o VANT permaneceu no ar por 6 minutos, entre as 18 h 27 min e 18 h 32 min, no dia 27 de outubro de 2016. Ao longo deste intervalo de tempo não houve relevante variação da temperatura. O valor utilizado para o cálculo do Número de Richardson foi a média dos seis dados obtidos.

Para obtenção deste dados, foi utilizado um drone Phantom quadricóptero (Figura 1b), selecionado em virtude da sua estabilidade. Os sensores de temperatura (ibutton) foram presos ao VANT por um cabo conexão nos mesmos cinco níveis de monitoramento da torre anemométrica.

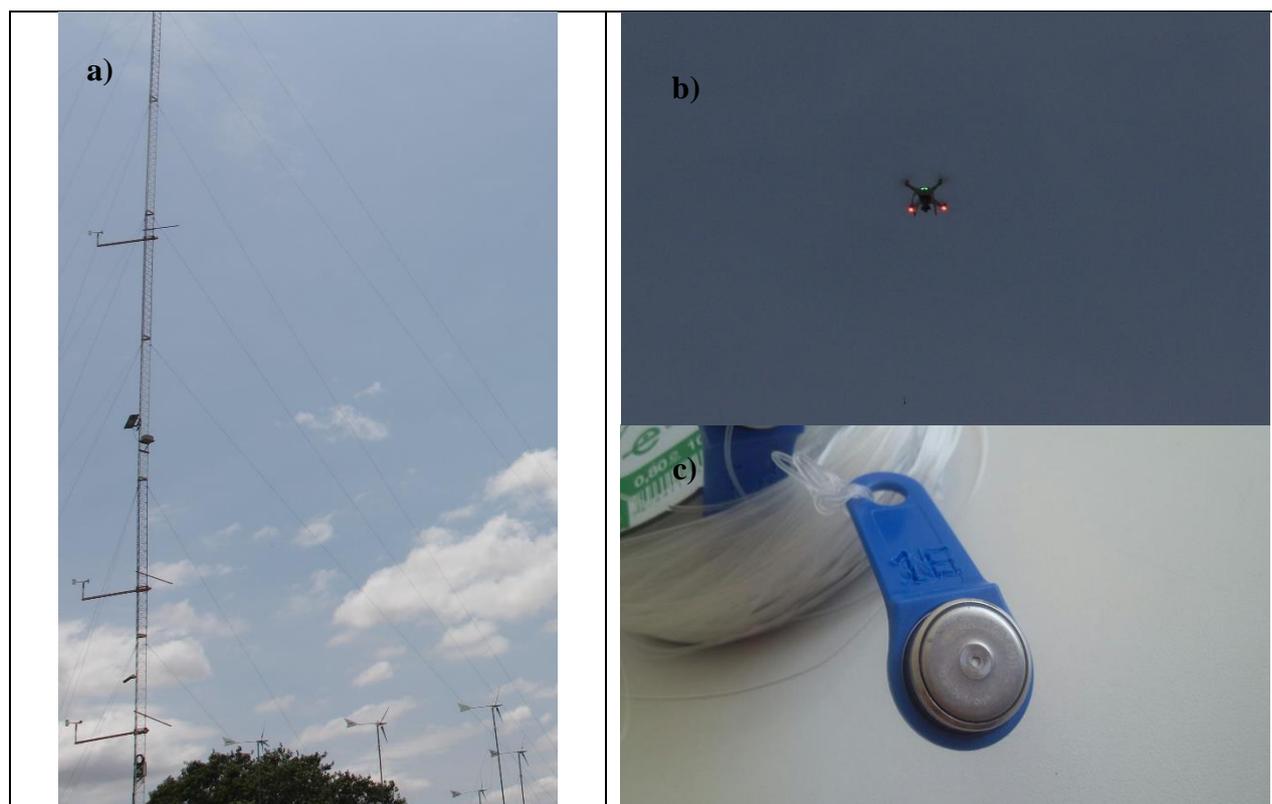


Figura 1. (a) Torre anemométrica. (b) Drone. (c) Sensor de temperatura (ibutton).

As Tabela 1 e 2 mostras as especificações do quadricóptero e do ibutton, respectivamente.

Tabela 1. Especificações do drone utilizado neste trabalho.

Tipo	Quadricóptero
Dimensão horizontal	350 mm
Peso	1216 g (com bateria)
Autonomia	25 minutos
Máxima velocidade	16 m.s ⁻¹

Tabela 2. Especificações do ibutton utilizado neste trabalho.

Sensores	Temperatura e umidade
Tamanho	16 mm
Peso	2,5 g

O estudo da CLP foi feito por meio do cálculo de Ri, o qual é obtido por:

$$Ri = \frac{g}{\bar{T}} \frac{(\Delta T * \Delta z)}{(\Delta u)^2} \quad (1)$$

em que, g corresponde à aceleração da gravidade (9.7879 m.s^{-2}), Δu (m.s^{-1}) é a variação da velocidade do vento, ΔT (k) é a variação da temperatura e \bar{T} (k) é a média da temperatura entre os dois níveis. A variação das alturas de medida da torre ao longo da vertical, Δz (m), é expressa como:

$$\Delta z = z_1 - z_2 \quad (2)$$

com z_1 referente ao nível mais elevado e z_2 ao nível mais baixo ($z_1 > z_2$).

Para se determinar o intervalo de Ri correspondente a cada condição atmosférica, considerou-se os intervalos propostos por Clifton et al. (2013):

Tabela 1 – Classificação da condição atmosférica de acordo com Ri .

Condição atmosférica	Ri
Instabilidade	$Ri \leq -0.01$
Neutralidade	$-0.01 < Ri < 0.01$
Estabilidade	$Ri \geq 0.01$

Fonte: Adaptado de Clifton et al. (2013).

De acordo com Mendonça et al. (2007), o clima da região é classificado como Aw (classificação climática de Köppen), ou seja, clima tropical úmido, com verão chuvoso, inverno seco e temperatura do mês mais frio superior a 18°C . A amplitude térmica é pequena, com temperatura média anual de em torno de 24°C e temperatura média do mês mais frio de aproximadamente 21°C .

3. Resultados e Discussão

O resultado apresentado na Figura 2a diz respeito ao perfil do vento, a partir de dados da torre anemométrica, e o perfil da temperatura, obtido pelo VANT, ambos no dia 27 de outubro de 2016, às 18 h 30 min.

Durante o experimento foi possível observar que, fatores como o peso adicional referente aos sensores de temperatura e o valor máximo da intensidade do vento, observada a 50m de altura ($8,28 \text{ m.s}^{-1}$), não comprometeram a estabilidade e autonomia de vôo do VANT.

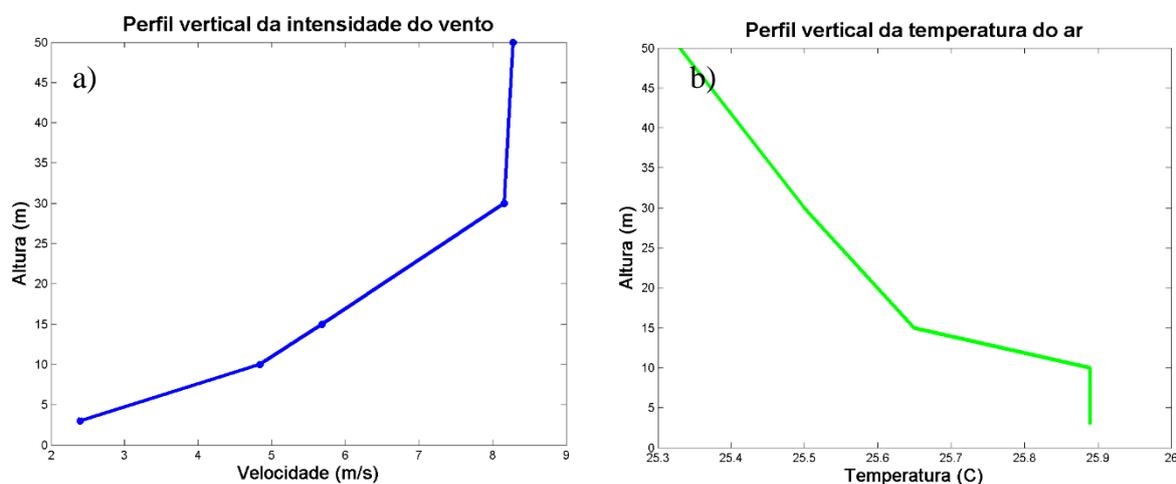


Figura 2. (a) Perfil do vento, a partir de dados da torre anemométrica e (b) perfil da temperatura obtido pelo VANT ambos no dia 27 de outubro de 2016, às 18 h 30 min.

A partir destes perfis de intensidade do vento e temperatura, o valor do Número de Richardson obtido entre as camadas de 3m e 50m foi de -0,025. De acordo com os intervalos de classificação propostos por Clifton et al. (2013), este valor corresponde a atmosfera instável.

A Figura 3a mostra a frequência relativa do número de casos de atmosfera estável, instável e neutra, ao longo das horas do dia. Observa-se um aumento da instabilidade (decréscimo da estabilidade) após o nascer do sol, atingindo seu máximo (mínimo) valor no horário de maior aquecimento da superfície e diminuindo (aumentando) sua frequência novamente um pouco antes do pôr do sol. Os picos de neutralidade ocorrem nos intervalos de transição entre estas duas condições atmosféricas.

O valor do Número de Richardson obtido mostra que a atmosfera se encontrava instável no momento do experimento. Isto se deve ao fato deste ter sido realizado às 18 h 30 min, horário próximo ao pôr do sol. Neste horário de transição, há uma queda na porcentagem de instabilidade, mas esta condição ainda é superior em relação às demais (Figura 3a).

Quando analisada toda a estação da primavera (Figura 3b), percebe-se um predomínio de atmosfera instável (71%), decorrente deste grande intervalo de tempo ao longo do dia em que esta condição é observada.

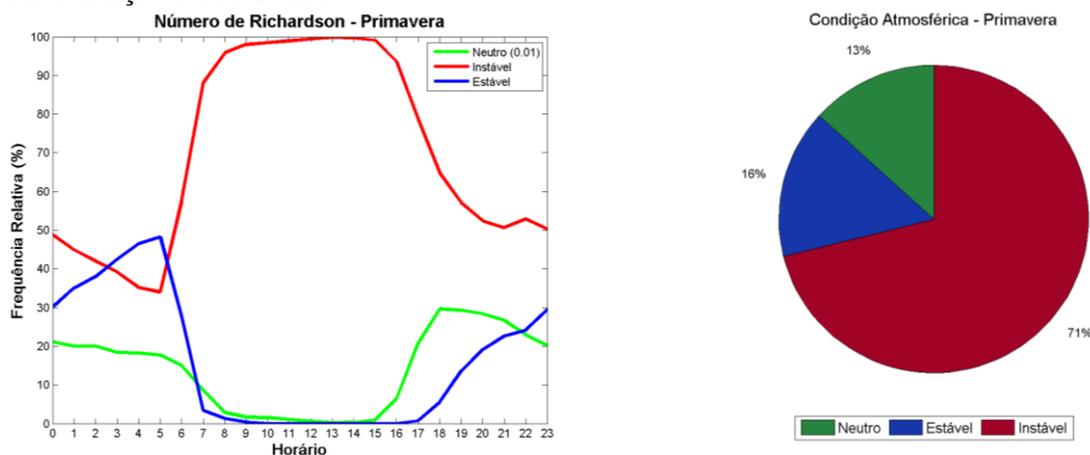


Figura 3. (a) Frequência relativa de condições de neutralidade (verde), instabilidade (vermelho) e estabilidade (azul) em relação às horas, e (b) porcentagem de casos de atmosfera neutra, estável e instável ambos entre os níveis de 3 m e 50 m, durante o período de 30 de maio de 2009 a 03 de outubro de 2011, durante a primavera e a partir dos dados da torre anemométrica.

Em torres anemométricas, os sensores de temperatura possuem tempo de vida útil limitado e existe uma certa dificuldade de acesso aos níveis de instalação destes em torres de altura elevada. Diante disso, uma boa alternativa é o uso de VANTs na obtenção de dados de temperatura e umidade em complemento a dados de vento. Estas variáveis não apresentam variação significativa ao longo de uma hora, o que viabiliza a obtenção do perfil destas em pequenos intervalos de tempo ao longo das horas do dia, sem comprometer a análise das condições atmosféricas.

A Figura 4 é similar à Figura 3a, entretanto foram utilizados apenas 20 minutos de cada hora do dia para obtenção da frequência relativa. Não é observada uma variação significativa nos resultados, em relação à frequência relativa obtida por toda amostra de dados. Portanto, é viável a obtenção de dados apenas durante o intervalo de 25 minutos, período de autonomia do VANT.

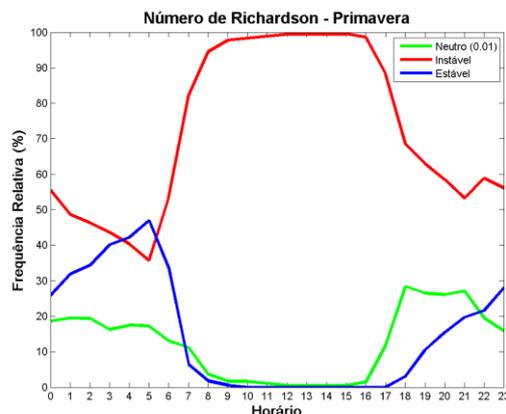


Figura 4. Frequência de condições de neutralidade (verde), instabilidade (vermelho) e estabilidade (azul) em relação às horas, entre os níveis de 3 m e 50 m. Foram utilizados 20 minutos de dados para cada hora do dia, no período entre 30 de maio de 2009 a 03 de outubro de 2011, durante a primavera e a partir dos dados da torre anemométrica.

4. Conclusões

O presente estudo foi realizado com base em um experimento desenvolvido na Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), no dia 27 de outubro de 2016. Para tanto, foram utilizados dados de temperatura levantados a partir de um VANT instrumentado com sensores de alta portabilidade (ibutton), em conjunto com dados de velocidade dos ventos, pertencentes a uma torre anemométrica. Tal torre possui 50 m de altura e cinco níveis de monitoramento: 50, 30, 15, 10 e 3 m de altura.

Para a caracterização da CLP na região de estudo foi calculado o Número de Richardson, que indicou condições de instabilidade no horário do experimento. Este resultado condiz com a condição atmosférica predominante no horário, obtida a partir de dados da torre anemométrica.

Em torres anemométricas, os sensores de temperatura possuem tempo de vida útil limitado, portanto, como os valores de temperatura e umidade não apresentam variação significativa ao longo de uma hora, é possível a obtenção do perfil destas variáveis em pequenos intervalos de tempo ao longo das horas do dia. Sendo assim, a utilização de VANTs a fim de complementar medições realizadas por torres é viável. Outra aplicação interessante para a técnica apresentada aqui é para complementar as medidas de perfil de vento realizadas pelo Lidar, o qual mede apenas o perfil do vento.

O experimento foi realizado em condições de vento moderadamente intensos, com máximo de $8,28 \text{ m.s}^{-1}$ a 50 m de altura. Tanto a intensidade do vento, quanto o peso adicional referente aos sensores de temperatura não comprometeram a estabilidade e autonomia do quadricóptero. Com isso, pode-se concluir que a utilização de VANT para medições atmosféricas, em complemento às usualmente utilizadas na coleta de dados, tais como plataforma terrestre, torres, balões cativos, radiossondas, aviões tripulados, lidar, sodar e radar, mostrou-se vantajosa e aplicável.

Referências Bibliográficas

Bonin, T., Chilson, P., Zielke, B., Fedorovich, E. Observations of the early evening boundary-layer transition using a small unmanned aerial system. **Boundary-layer meteorology**, v. 146, n. 1, p. 119-132, 2013.

Clifton, A.; Schreck, S.; Scott, G., Kelley, N.; Lundquist, J. K. Turbine Inflow Characterization at the National Wind Technology Center. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 135, n. 3, p. 031017, 2013.

Dias, N. L., Gonçalves, J. E., Freire, L. S., Hasegawa, T., Malheiros, A. L. "Obtaining potential virtual temperature profiles, entrainment fluxes, and spectra from mini unmanned aerial vehicle data. **Boundary-layer meteorology** 145.1, p. 93-111, 2012.

Marques Filho, E. P., **Alguns aspectos teóricos e experimentais da Camada Limite Superficial acima do Pantanal Matogrossense**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, SP, 2000.

Garratt, J.R. **The atmospheric Boundary Layer**. London. Cambridge University Press, 1994.

Lenschow, D.: Probing the Atmospheric Boundary Layer, vol. 1, **American Meteorological Society**, Boston, MA, USA, 1986.

Mayer, S., Sandvik, A., Jonassen, M. O., Reuder, J. Atmospheric profiling with the UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, n. 1-2, p. 15-26, 2012.

Mendonça, J. C., Sousa, E. F., Bernardo, S., Sugawara, M. T., Peçanha, A. L., Gottardo, R. D. Determinação do coeficiente cultural (Kc) do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 471-475, 2007.

Reuder, J.; Jonassen, M. O.; Ólafsson, H. The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research. **Acta Geophysica**, v. 60, n. 5, p. 1454-1473, 2012.

Van den Kroonenberg, A. C., Martin, S., Beyrich, F., Bange, J. Spatially-averaged temperature structure parameter over a heterogeneous surface measured by an unmanned aerial vehicle. **Boundary-layer meteorology**, v. 142, n. 1, p. 55-77, 2012.

Wildmann, N.; Mauz, M.; Bange, J. Two fast temperature sensors for probing of the atmospheric boundary layer using small remotely piloted aircraft (RPA). **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, n. 8, p. 2101-2113, 2013.

Wildmann, N.; Bernard, S.; Bange, J. Measuring the local wind field at an escarpment using small remotely-piloted aircraft. **Renewable Energy**, 2016.