

Desenvolvimento de um Sistema de Medição para Determinação do Potencial Eólico para Geração de Energia Elétrica

Sebastian Y. C. Catunda, José E. O. Pessanha, João V. da Fonseca Neto, Nelson J. Camelo, Jaderson P. Oliveira, Mauro S. S. Pinto e Rycardo B. F. Soares, UFMA
Paulo R. Mendes Silva, CEMAR

RESUMO

A monitoração de grandezas associadas ao vento é de extrema importância para análise de viabilidade e instalação de parques eólicos para geração de energia elétrica. As principais grandezas de interesse são a velocidade, a direção e a densidade de potência do vento (DPV), esta última sendo necessária para determinar a potência elétrica que pode ser extraída em um determinado local. Neste artigo, apresentam-se as principais considerações e características no projeto e desenvolvimento de um instrumento para monitoração eólica e determinação da DPV.

PALAVRAS-CHAVE

Medição, comportamento eólico, geração de energia, energia eólica, densidade de potência do vento.

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica gerada a partir de turbinas eólicas depende da energia do vento que passa através da área coberta pelas suas hélices, por unidade de tempo. Este fluxo de energia é chamado de densidade de potência de vento (DPV). O aspecto fundamental da densidade de potência de vento é sua dependência cúbica com a velocidade do vento. Isto significa que a potência extraível aumenta rapidamente com a velocidade do vento.

A densidade de potência do vento é o principal parâmetro para determinação da potência extraível de uma turbina eólica. A partir dela, e usando coeficientes específicos dos aerogeradores que serão utilizados, tais como coeficiente de rendimento e área de cobertura das hélices, pode-se determinar o montante de potência elétrica que poderá ser gerada em função da velocidade do vento num determinado local.

Sebastian Y. C. Catunda, José E. O. Pessanha, João V. Fonseca Neto e Nelson J. Camelo são professores do Departamento de Engenharia de Eletricidade da Universidade Federal do Maranhão. (e-mail: catunda,pessanha,jviana,ncamelo@dee.ufma.br).

Jaderson P. Oliveira, Mauro S. S. Pinto e Rycardo B. F. Soares são alunos do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMA.

Paulo R. Mendes Silva é engenheiro senior da Companhia Energética do Maranhão - CEMAR

Para avaliar a viabilidade de instalação de uma turbina eólica ou parque eólico, o comportamento do vento deve ser monitorado durante um período de tempo longo, que normalmente varia de um ano a dois anos. Geralmente, as condições eólicas são avaliadas usando instrumentos para medições meteorológicas, que devido a sua generalidade e pouca exatidão de medição, podem prover informações sobre a DPV com incerteza elevada. Por outro lado, a utilização de instrumentos de medição com maior precisão, devido à quantidade de grandezas medidas e armazenadas, facilidade para disponibilizar informação e grande quantidade de pontos para medição, são fatores que elevam o custo do sistema. Tal generalidade pode não ser necessária no processo de monitoração do comportamento eólico para extração de energia elétrica.

Neste trabalho, apresenta-se o desenvolvimento de um instrumento para monitoração das condições eólicas e determinação da DPV. Faz-se uma análise da influência da incerteza e necessidade de medição das diversas grandezas associadas na determinação da DPV. As especificações iniciais de projeto para a medição da DPV é que esta seja determinada com uma incerteza inferior a 10%. Também, são considerados diversos fatores de projeto, como exatidão de determinação das diversas grandezas de interesse, autonomia, capacidade de memória, e custos.

II. DEFINIÇÕES PRELIMINARES

A DPV depende basicamente da densidade do ar e da velocidade do vento e pode ser calculada por [1]:

$$DPV = \frac{1}{2} \rho v^3, \quad (1)$$

em que ρ é a densidade do ar e v é a velocidade do vento.

Para cálculo da densidade do ar, considera-se inicialmente a lei dos gases ideais [2] e [3], dada por:

$$PV = nRT, \quad (2)$$

em que P é a pressão, V é o volume, n é o número de moles, R é a constante do gás e T é a temperatura em Kelvin.

A densidade do ar é simplesmente o número de moléculas em um determinado volume de ar, $\rho = n / V$.

Assim, considerando o ar úmido como composto de moléculas de água e de ar seco, e a partir de (2), a densidade do ar pode ser expressa por:

$$\rho = \frac{P_d}{RT} + \frac{P_v}{R_v T}, \quad (3)$$

em que P_d é a pressão do ar seco, P_v é a pressão do vapor d'água, R e R_v são respectivamente as constantes do ar seco e de vapor d'água, dadas por $287,05 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ e $461,495 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

A pressão absoluta, devido à influência da pressão do ar seco e pressão do vapor d'água, pode ser calculada por:

$$P = P_d + P_v. \quad (4)$$

A pressão de vapor d'água pode ser calculada a partir de valores da umidade relativa H , e da pressão de saturação de vapor d'água, P_s , por:

$$P_v = H P_s. \quad (5)$$

A pressão de saturação de vapor d'água indica a máxima quantidade de água que pode ter no ar em função da temperatura. O valor de P_s pode ser calculado, em Pa, em função da temperatura em graus Celsius, T_c , usando a seguinte aproximação (com valor máximo de erro relativo de 0,5% do valor tabelado):

$$P_s = 610,78 \times 10^{\frac{7,5T_c}{237,3+T_c}}. \quad (6)$$

As grandezas v , P , H e T podem ser medidas diretamente, utilizando-se sensores específicos e as grandezas P_s e P_d podem ser calculadas indiretamente através de (6) e (4), respectivamente.

III. ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

As incertezas de determinação das grandezas são uma associação das incertezas inerentes aos sensores com os erros introduzidos pelo sistema de medição. Estes últimos se devem principalmente à quantização das variáveis de medição. Através da análise de propagação de incertezas [4], considerando os processos de medição de ρ e v independentes, pode-se determinar o limite do erro relativo de cálculo da DPV como:

$$\varepsilon_{DPV} = \sqrt{\varepsilon_\rho^2 + (3\varepsilon_v)^2}, \quad (7)$$

em que ε_{DPV} , ε_ρ e ε_v são as incertezas relativas da DPV, da densidade do ar e da velocidade do vento, respectivamente. Essas incertezas podem ser calculadas por:

$$\varepsilon_{DPV} = \frac{\delta_{DPV}}{DPV_0}, \quad \varepsilon_\rho = \frac{\delta_\rho}{\rho_0}, \quad \varepsilon_v = \frac{\delta_v}{v_0} \quad (8)$$

em que δ_{DPV} , δ_ρ e δ_v são valores absolutos das incertezas e DPV_0 , ρ_0 e v_0 são os valores nominais das grandezas, medidos, calculados ou assumidos por falta.

Observa-se, então, a partir de (7) que a incerteza da velocidade de vento contribui bem mais do que a incerteza da densidade do ar, para a formação da incerteza na DPV. Entretanto a diminuição dessa incerteza implica no uso de sensores de velocidade de vento mais precisos e no aumento dos custos do instrumento. Para valores da incerteza da densidade de ar menores do que $3\varepsilon_v$, esse primeiro parâmetro pode ser desprezado e a incerteza da DPV pode ser aproximada para $\varepsilon_{DPV} \approx 3\varepsilon_v$.

A determinação da densidade do ar é necessária, uma vez que, considerando as faixas de variação das grandezas associadas, esta pode variar de até 10% em torno do seu valor médio.

A. Influência das grandezas na densidade do ar

A densidade do ar é fortemente dependente da pressão atmosférica e da temperatura, mas varia pouco com umidade relativa. A fim de verificar a necessidade de se medir H , faz-se necessário antes verificar sua influência no cálculo da densidade do ar. A equação (3) pode ser reescrita em função da pressão efetiva do ar úmido (considerando o efeito da umidade) como:

$$\rho = \frac{P_e}{RT}, \quad (9)$$

$$\text{com } P_e = P + \frac{(R - R_v)}{R_v} H \cdot P_s. \quad (10)$$

A partir de (9), verifica-se a incerteza na determinação da densidade do ar como¹:

$$\varepsilon_\rho = \sqrt{\varepsilon_{P_e}^2 + \varepsilon_T^2}. \quad (11)$$

Derivando-se (10) com relação à H , pode-se encontrar a contribuição desta na incerteza da pressão efetiva por¹:

$$\varepsilon_{P_e} = \frac{\sqrt{\delta_P^2 + (A\delta_H)^2}}{P_{e0}}, \quad (12)$$

$$P_{e0} = P_0 + A H_0,$$

$$A = P_s (R - R_v) / R_v.$$

A influência da incerteza de H depende do valor nominal da pressão de saturação de vapor d'água P_s , com valor máximo de 12,3 KPa (para $T = 50^\circ\text{C}$), e que, por sua vez, é uma função da temperatura. Definindo-se o valor nominal da umidade relativa igual a 50% ($H_0 = 0,5$), o valor máximo da incerteza absoluta de H é de 0,4 no pior caso. Neste caso a incerteza do cálculo de P_s pode ser desprezada com relação à de H . Na Figura 1, apresenta-se a influência do pior caso de incerteza de H ($\varepsilon_H = 0,4$) na determinação da incerteza da pressão efetiva do ar, para uma pressão atmosférica padrão ao nível do mar ($z = 0 \text{ m}$) e a 1000 m de altitude.

A incerteza na determinação da densidade do ar ainda depende das incertezas de medição da pressão atmosférica e da temperatura, o que reflete na escolha dos sensores. A temperatura pode ser medida utilizando um sensor integrado de precisão, de baixo custo, o qual fornece tipicamente uma incerteza de medição inferior a $1,5^\circ\text{C}$. Considerando os valores de temperatura em Kelvins, como usado em (9), a incerteza relativa é inferior a 0,5%. A pressão atmosférica pode ser medida utilizando também um sensor integrado que tem uma incerteza máxima de tipicamente 1,5%. A influência final na densidade do ar pode ser obtida a partir da associação de (11) e (12) por:

$$\varepsilon_\rho = \sqrt{\frac{\delta_P^2 + (A\delta_H)^2}{P_{e0}^2} + \varepsilon_T^2}. \quad (13)$$

¹ Desprezando-se a influência da incerteza da temperatura na determinação de P_s .

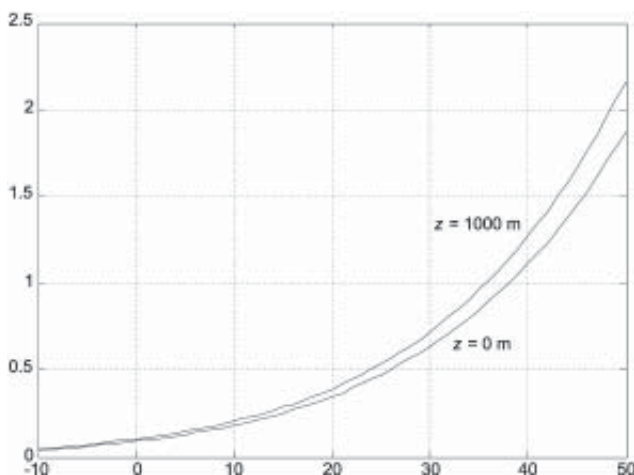


FIGURA 1 - Incerteza relativa na determinação da pressão efetiva do ar úmido para $e_H = 0,4$ e diferentes altitudes.

A partir desta equação, apresenta-se na Figura 2 o gráfico da incerteza na determinação da densidade de ar em função da temperatura, para os valores típicos da incerteza dos sensores e da umidade relativa.

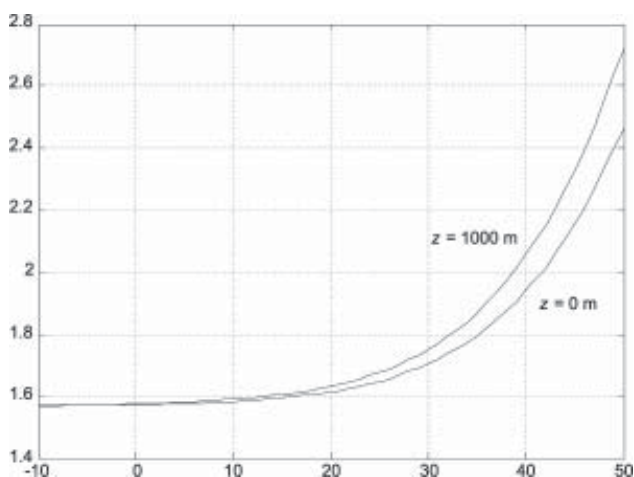


FIGURA 2 - Incerteza relativa na determinação da densidade do ar para $e_H = 0,4$ e diferentes altitudes.

A partir da Figura 2, pode-se chegar a algumas conclusões: a máxima influência da incerteza causada pela não medição da umidade relativa na determinação da densidade do ar é menor que 2,6%, para altitudes em torno do nível do mar; para locais de medição de grande altitude (p.e. 1000 m) é pouco provável que a temperatura atinja valores próximos de 50 °C; ainda, nas regiões mais quentes do Brasil, a temperatura máxima é de em torno de 40 °C, o que reduz a incerteza máxima para valores menores do que 2,2%. Dessa forma, pode-se optar por não medir a umidade relativa, e assumir o valor nominal de 50%.

Substituindo o valor máximo da incerteza da densidade do ar (2,6%) em (7), e considerando as especificações de projeto de incerteza menor do que 10% na determinação da DPV, pode-se calcular o valor máximo da incerteza de medição da velocidade do vento como: $e_v \leq 3,2\%$. Esse valor é factível, sendo que existem disponíveis diversos sensores de velocidade de vento com incerteza relativa de medição inferior a esse valor.

IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição completo para determinação da densidade de potencia do vento é constituído de uma estação de medição e de um módulo de coleta de dados. Todo o processo de monitoração e aquisição de dados pode ser resumido da seguinte forma: a estação de medição deve realizar continuamente medições de velocidade e de direção do vento, de pressão atmosférica, de temperatura e da tensão da bateria, calcular parâmetros necessários para avaliação do comportamento eólico e armazenar os valores em sua memória interna; no momento da coleta de dados (periódica), realizada por um operador, esses valores devem ser transmitidos para o módulo de coleta de dados. Finalmente, os dados coletados (de uma ou várias estações) são transferidos para um computador central, que tem a finalidade de concentrar, processar e apresentar esses dados.

As grandezas que são diretamente medidas pela estação de medição são: velocidade e direção do vento, temperatura, pressão atmosférica e tensão da bateria. A velocidade do vento (num ponto central), temperatura e pressão atmosférica são grandezas necessárias para o cálculo da DPV. A direção do vento é importante para levantamento do comportamento eólico estatístico, para possível direcionamento de turbinas de eixo fixo. A tensão da bateria é um parâmetro para monitoração do funcionamento adequado da estação de medição. A medição da velocidade do vento também pode ser realizada em mais dois pontos (superior e inferior, além do central), para análise de gradientes de velocidade e homogeneidade, necessário para turbinas de grande porte.

As seguintes características foram especificadas para o projeto da estação de medição:

- Medição das principais grandezas para determinação da DPV: velocidade do vento em até três pontos distintos (superior, central e inferior), pressão atmosférica, temperatura, e medição de grandezas adicionais: direção do vento e tensão da bateria;
- Cálculo de parâmetros para análise do comportamento do vento num determinado período: velocidades média, máxima e mínima; velocidade cúbica média, direção predominante;
- Armazenamento dos dados em memória interna não volátil;
- Utilização de bateria recarregável para alimentação e de painel solar para recarga da bateria. Com isso, obtém-se uma autonomia adequada de utilização que vai depender da vida útil da bateria;
- Transmissão de dados via cabo serial ou radio frequência. A transmissão via RF possibilita a instalação da estação a uma altura do solo que inibe o acesso a pessoas não autorizadas;
- Identificação da estação e proteção dos dados armazenados através de senha: possibilitando a identificação da estação e proteção dos dados armazenados;

O módulo de coleta é utilizado para recuperação dos dados armazenados em uma ou mais estações de medição. A leitura dos dados da estação deve ser feita periodicamente de maneira programada, de forma que não ocorra a saturação da memória da estação com conseqüente perda de dados. Os dados coletados devem, depois, serem transferidos para um computador central para processamento e análise. As principais características funcionais do módulo de coleta de dados são:

- Leitura de dados de uma ou mais estações de medição, via cabo serial ou RF;
- Interface com o usuário através de display alfanumérico e teclado numérico;
- Transferência dos dados para um computador central através de cabo serial;
- Utilização de bateria recarregável. Neste caso a recarga é realizada através de uma fonte de tensão de 12 V (eliminador de pilhas, bateria de automóvel, etc.);

V. DIMENSIONAMENTO DA ESTAÇÃO DE MEDIÇÃO

O principal instrumento do sistema de medição é a estação de medição, sendo discutida nesta seção. Na Figura 3, apresenta-se um diagrama em blocos funcionais da estação de medição. Os sinais elétricos gerados pelos sensores das grandezas de interesse são condicionados no bloco de condicionamento de sinais e em seguida convertidos para a forma digital e enviados para um microcontrolador. O microcontrolador controla a estação de medição e, entre outras funções, realiza as medições e cálculos necessários, armazena resultados, controla o carregamento e estado de carga da bateria e realiza a comunicação com o módulo de coleta. A memória de armazenamento tem capacidade para armazenar diversos valores de medição e é não volátil. Com isso os dados armazenados são preservados mesmo sem energização da estação. A bateria fornece energia para a estação e o painel fotovoltaico realiza a recarga da bateria durante o dia. Dessa forma, garante-se a autonomia necessária de operação da estação.

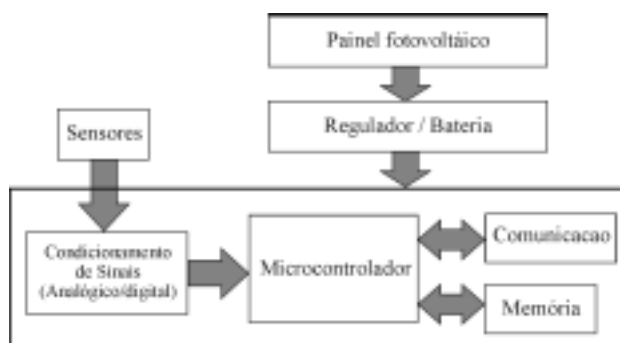


FIGURA 3 - Diagrama dos principais blocos funcionais da estação de medição.

A. Aquisição e armazenamento dos dados

A taxa de aquisição/armazenamento e resolução dos dados foram definidas de forma a minimizar o tamanho de memória necessária sem comprometer a qualidade das medições.

A estação realiza o armazenamento das informações medidas em um bloco de dados, que é constituído dos valores das diversas grandezas de medição. O período de armazenamento de um bloco de medição é de 10 minutos. Os valores de temperatura e pressão são medidos a cada 10 minutos e armazenados. Os valores de velocidade do vento, nos três pontos de medição, são medidos a cada 10 segundos e a partir destes, a velocidade média a cada 10 minutos é calculada e armazenada. A partir dos valores de velocidade de vento central, para cada 10 minutos, calcula-se a velocidade cúbica média do vento e as velocidades média, máxima e mínima, que em seguida são armazenadas. A direção do vento é medida também a cada 10 segundos e a velocidade predominante é calculada e armazenada a cada 10 minutos. O valor de tensão da bateria é medido a cada 10 segundos, mas seus valores são armazenados apenas uma vez a cada hora.

Os valores de direção predominante do vento são armazenados em quatro bits, que correspondem a 16 direções distintas (N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW e NNW). Os valores de velocidade cúbica média do vento são armazenados utilizando 12 bits, de forma a minimizar o erro de quantização quando elevado ao cubo. Os demais valores das grandezas são armazenados em oito bits, o que introduz um erro de truncamento inferior a 0,4 % e não compromete a exatidão especificada de projeto.

B. Alimentação e recarga de bateria

O consumo da estação de medição é da ordem de 15 mA. Para tal, dimensionou-se a bateria com capacidade de 10 AH, de forma a poder fornecer continuamente energia para a estação por aproximadamente 10 dias, até atingir uma carga de 60 % de sua carga nominal sem que haja recarga. A quantidade de energia consumida pela estação, em um período de utilização de 12 horas sem recarga, é de aproximadamente 180 mAH.

A recarga da bateria é proporcionada por um painel fotovoltaico com capacidade nominal de 150 mA (para uma taxa de radiação de 1000 W/m²). Mesmo com dias nublados, considerando a metade da capacidade nominal de geração de energia, 75 mA, o painel consegue realizar a recarga diária da bateria em um período de três horas.

C. Comunicação e transferência de dados

A estação de medição pode realizar a transferência de dados para o módulo de coleta de duas formas: via cabo serial ou via RF. Pode-se optar pela utilização da conexão via cabo em locais onde a estação esteja segura da ação de vândalos e de roubo. A opção de transmissão via RF pode

ser usada em locais menos seguros, em que a estação pode ser instalada a uma altura que dificulte o acesso à mesma. Para ambas as opções a taxa de transmissão é de 19200 bits por segundos, o que garante uma transmissão de dados rápida, de aproximadamente 170 blocos de medição por segundo.

Cada estação possui um número de identificação, código de comunicação e código de acesso aos dados. O número de identificação é fornecido pela estação e permite a distinção dos dados de medição coletados. O código de comunicação pode ser configurado via hardware, através de chaves, e permite a utilização de 32 números distintos. Esse código é útil para evitar confusão no momento de coleta de dados, quando existirem diversas estações próximas umas das outras. O código de acesso aos dados evita a aquisição de dados por pessoas não autorizadas e pode ser o mesmo para um conjunto de estações. Esse código pode ser programado diretamente no módulo de coleta de dados.

D. Reconstrução das grandezas de medição

A estação de medição armazena os valores de medição representados em ponto fixo, utilizando a escala mais adequada para cada caso. A reconstrução das grandezas de medição é feita off-line em um computador pessoal, a partir dos dados coletados da estação. Os valores coletados são convertidos para as devidas escalas (temperatura, pressão, velocidade do vento, velocidade cúbica e tensão da bateria). A densidade do ar é calculada a partir dos valores de pressão e temperatura, considerando o valor de umidade relativa igual a 0,5. Os valores da DPV são calculados a partir dos valores de densidade do ar e de velocidade cúbica do vento. Os valores das demais grandezas são armazenados para possíveis análises estatísticas e comportamentais.

E. Especificações de operação

Na Tabela 1 apresentam-se as especificações de exatidão das grandezas de medição e grandezas calculadas.

TABELA 1

Especificações de exatidão das medições		
Grandeza	Exatidão do sensor ⁽¹⁾	Exatidão final
Temperatura	1 °C ⁽²⁾	1 °C
Pressão	1,5 %	1,5 %
Velocidade do vento	0.1 m/s ⁽³⁾	< 1% ⁽³⁾
Velocidade cúbica	-	-
Densidade do ar	-	< 3%
DPV	-	< 6% ⁽³⁾

⁽¹⁾ Especificação do fabricante.

⁽²⁾ Sensor aferido, o valor correspondente para o cálculo da DPV é menor do que 0,4 %, considerando valores em Kelvin.

⁽³⁾ Para velocidades de 5 a 25 m/s.

Na Tabela 2 apresenta-se um resumo das especificações de operação da estação. Essas especificações não dizem respeito aos limites máximo suportados pelo equipamento, mas sim à faixa normal de operação.

TABELA 2

Especificações de operação da estação de medição	
Velocidade do vento	0 a 25 m/s
Direção do vento	16 direções predominantes
Temperatura	-10 a 50 °C
Pressão atmosférica	Max 115 KPa
Umidade relativa	0 a 100 %
Capacidade da memória	6144 blocos de medição, 1024 horas (42,7 dias)
Autonomia	depende da bateria utilizada (tipicamente 2 anos)
Consumo	15 mA
Taxa de Transmissão de dados	19200 bps, ~170 blocos /s, ~ 28 h de dados / s
Modos de transmissão	Cabo serial ou RF

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentadas as principais etapas relacionadas ao dimensionamento de um instrumento para medição de velocidade e direção dos ventos, para indicação da potência elétrica extraível. Este instrumento é relevante para a avaliação da viabilidade econômica de parques eólicos, tanto na fase de planejamento, quanto na de operação das unidades geradoras. Devido à especificidade desse instrumento, ter-se-á uma redução do seu custo de fabricação e conseqüente redução nos custos de monitoração.

O instrumento de medição executará, entre outras, as funções de: 1) medir e registrar a velocidade e direção do vento e a potência elétrica extraível. O registro será feito em intervalos variáveis de tempo, de acordo com a taxa de variação dessas informações, i.e. em períodos de variação de atividade eólica ou períodos de atividade constante ou quase constante; 2) integralizar os resultados em períodos de tempo definidos (horas, dias, etc.); 3) prover comunicação sem fio, de forma a possibilitar a instalação do instrumento em locais de difícil acesso, como em postes elétricos.

VII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CEMAR e a ANEEL pelo apoio financeiro disponibilizado para essa pesquisa, e a Fundação Sausândrade de Apoio ao Desenvolvimento da UFMA pela administração dos recursos.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Hugles (Lesson 3), OKLAHOMA WINDPOWER TUTORIAL SERIES. Environmental verification and Analysis Center. The University Oklahoma.
- [2] Y. A. Cengel and M. A. Boles, Thermodynamics : an engineering approach, 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2001.
- [3] J. B. Barlon, W. H. Rae and Alan Pope, Low-Speed Wind Tunnel Testing, 3rd ed. New York, Wiley-Interscience, 1999.
- [4] J. R. Taylor, An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements, 2nd ed. Sausalito, Calif.: University Science Books, 1997.