

IMPLEMENTACIÓN DE CÁLCULOS ESTADÍSTICOS EN UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA MEDICIONES DE VIENTO

Ing. Rafael B. Oliva

Centro de Investigación
Universidad Nacional de la Patagonia Austral
Lisandro de la Torre 1070, 9400 Río Gallegos, Argentina
TE 0966 42319 Int 22 ó TE/FAX 0966 31081
email: roliva@ufparg.edu.ar

RESUMEN

Se ha desarrollado un sistema de adquisición de datos de viento en intensidad y dirección, que implementa cálculos estadísticos y puede cumplir fines didácticos. En el presente trabajo se discute, luego de una introducción a la estadística de Weibull, la utilización de los algoritmos y el análisis de los datos obtenidos. El sistema está basado en un microcontrolador 80C535 y programas de soporte en PC. El prototipo ha cumplido un año de funcionamiento satisfactorio con sensores calibrados NRG, montados en una torre a 10m de altura en la sede de la UNPA. Se calculan internamente promedios y desvíos standard de velocidad, como así también histogramas. Los datos pueden ser transferidos a PC por un port RS232 en diferentes formatos, y son analizados a través de un programa basado en un lenguaje tipo visual (VBA) y planillas electrónicas. Se muestran comparaciones de las mediciones realizadas con estaciones automáticas comerciales instaladas en la zona.

TEORÍA DE LAS DISTRIBUCIONES DE WEIBULL

La medida más usual de la intensidad del viento es la media de velocidad anual en un sitio $\langle V \rangle$ [m/s]. Su definición puede expresarse como la esperanza matemática de la función de variable aleatoria v , dada por:

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (1)$$

En general la distribución de probabilidad del viento, o *función densidad de probabilidad* $f(v)$ no es conocida para el lugar particular donde se mide, y es necesario determinar una aproximación mediante una serie temporal de mediciones y una distribución de frecuencias f_i discretas. La experiencia muestra (Molly, 1990 ; Jamil, 1995) que las distribuciones experimentales de viento pueden ajustarse adecuadamente con una distribución de Weibull-II, según la fórmula:

$$f_w(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{A}\right)^k \quad (2)$$

La distribución indicada tiene dos parámetros, el factor de escala A (ó ϵ) en [m/s] y el factor de forma k adimensional. La probabilidad de que el viento para ésta distribución esté entre dos valores V_x y V_y está dada por la *probabilidad acumulativa equivalente*:

$$P(V_x \leq V \leq V_y) = \int_{V_x}^{V_y} f_w(v) dv = \exp\left(-\frac{V_x}{A}\right)^k - \exp\left(-\frac{V_y}{A}\right)^k \quad (3)$$

donde se usa la función $F(V) = 1 - \exp\left(-\frac{V}{A}\right)^k$ que cumple $dF(V)/dv = f_w(v)$. para el cálculo de la media $\langle V \rangle$ [m/s] con $f_w(v)$ se puede reemplazar la expresión de la siguiente manera:

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} v \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\frac{v}{A}\right)^k dv \quad (4)$$

y utilizar el cambio de variable $z = \left(\frac{v}{A}\right)^k$ para escribir:

$$\langle V \rangle = \int_0^{\infty} \left(Az^{\frac{1}{k}}\right) e^{-z} dz = A \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5)$$

donde se ha utilizado la función gamma usual, definida por:

$$\int_0^{\infty} z^{x-1} e^{-z} dz = \Gamma(x) \quad ; \quad \text{Función tabulada} \quad (6)$$

En Molly (1990) se da la siguiente aproximación para la expresión de $\langle V \rangle$ para realizar estimaciones sin recurrir a tablas de $\Gamma(x)$:

$$\langle V \rangle \cong A \left(0.568 + \left(\frac{0.434}{k}\right)^{1/k} \right) \quad (7)$$

La velocidad del viento puede considerarse como una superposición de una velocidad media $\langle V \rangle$ y una componente instantánea turbulenta, cuya medida usual es la desviación standard σ_v . También se utiliza con frecuencia el factor

adimensional $S = \sigma_v / \langle V \rangle$, a veces designado *IT* por "intensidad de turbulencia" (DEWI, 1993). La desviación estándar es la raíz positiva de la *varianza*, que para distribuciones de probabilidad de viento conocidas puede escribirse:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (v - \langle V \rangle)^2 f(v) dv \quad [m^2/s^2] \quad (8)$$

En el caso de la distribución de Weibull, tenemos que:

$$\sigma_w = A \left[\left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [m/s] \quad (9)$$

y por lo tanto el factor *S*, intensidad de turbulencia, puede definirse de la siguiente manera.

$$S = \frac{\sigma_w}{\langle V \rangle} = \left[\left(\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)^{-1} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad [] \quad (10)$$

ALGORITMOS UTILIZADOS

Para la obtención de $\langle V \rangle$ en base a mediciones reales, se realizan aproximaciones a través de muestras. Los algoritmos para el cálculo de promedios y cuadrado de desvío standard utilizados (Akai, 1994) proporcionan un instrumento más eficiente que las fórmulas clásicas y disminuyen los requerimientos de almacenamiento en el microcontrolador. Para analizar su fundamentación, consideramos una sucesión de muestras x_j , y escribimos promedios de las primeras j , $j-1$ muestras como sigue:

$$A_j = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_j}{j}; \quad A_{j-1} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_{j-1}}{j-1}; \quad (11)$$

En base la expresión anterior, se cumple que

$$jA_j = (j-1)A_{j-1} + x_j \quad (12)$$

y por lo tanto

$$A_j = ((j-1)A_{j-1} + x_j) / j \quad (13)$$

lo cual da el promedio como función de los valores previos almacenados y de la nueva muestra x_j . Para nuestro caso de muestras de velocidad de viento, el valor máximo de j ocurre al cumplirse el tiempo prefijado por software para la muestra, por ejemplo 10 minutos. En ese momento se almacena $A_{\max} = \langle V \rangle_{10}$.

Para la varianza de una muestra de n elementos, cuya media es A , puede escribirse:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{j=1}^n x_j^2 - nA^2 \right] \quad (14)$$

lo cual implica que para las primeras j muestras

$$s_j^2 = \frac{1}{j-1} \left[\sum_{k=1}^j x_k^2 - jA_j^2 \right] \quad (15)$$

y las siguientes relaciones son válidas:

$$(j-1)s_j^2 = \left[\sum_{k=1}^j x_k^2 - jA_j^2 \right]; \quad (j-2)s_{j-1}^2 = \left[\sum_{k=1}^{j-1} x_k^2 - (j-1)A_{j-1}^2 \right] \quad (16)$$

Operando sobre ambas expresiones, se llega a que:

$$s_j^2 = \frac{1}{j-1} \left[(j-2)s_{j-1}^2 + \left(\frac{j}{j-1} \right) (x_j - A_j)^2 \right] \quad (17)$$

Este valor es también almacenado al final de cada período de muestreo, como s_{\max}^2 .

TÉCNICA DE MEDICIÓN

El prototipo C2 construido implementa las mediciones de $\langle V \rangle$ como promedios de velocidades muestreadas, almacenando al final de períodos seleccionados (en general 10 o 20 minutos) dichos promedios y su varianza σ^2 utilizando los algoritmos mencionados. A la vez clasifica todas las mediciones de velocidad en un histograma, que se denominó de muestras instantáneas, y la información de dirección de viento. Los sensores utilizados fueron un anemómetro (provisto con coeficientes de calibración) y una veleta potenciométrica, ambos de marca NRG.

El anemómetro provee una salida eléctrica pulsante, cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de giro. A su vez, dicha velocidad de giro está directamente relacionada con la velocidad del viento. Los fabricantes proveen coeficientes de calibración en caso de instrumentos de calidad, que permite relacionar la frecuencia de la señal con el viento mediante una ecuación lineal.

La medición de intensidad de viento en m/s se basa en nuestro caso en la medición del periodo de la señal del anemómetro (figura 1. (1)), que contiene una salida pulsante a partir un sensor de efecto Hall, y la derivación posterior de la frecuencia. Se realiza un promedio del tipo *running average* en las cuatro últimas mediciones de periodo (figura 1, (2)), para emular un filtro de paso bajo de primer orden y de constante de tiempo variable. El espectro de frecuencia de las mediciones de viento está concentrado en 10^{-3} Hz (Buehring, 1981) y tiene poca energía por encima de 1Hz , haciendo posible éste método para eliminar ruido sin afectar significativamente la información adquirida. Los periodos son almacenados en palabras de 32 bits, y el cociente para la determinación de la frecuencia (figura 1, (3)) se realiza con algoritmos de punto flotante IEEE de 32 bits provistos por el compilador de lenguaje C utilizado. La resolución n [bits] de la medición de frecuencia por este método (Williamson, 1985) requiere una resolución de m bits en la medición del periodo, según:

$$m \geq n + \frac{\ln\left(\frac{f_{max}}{f_{min}}\right)}{\ln 2} \quad (18)$$

En nuestro caso, la resolución en periodo requerida para una frecuencia máxima de 100Hz y mínima de 1Hz, es de 14,9 bits para una resolución de 8 bits en f . Como se utiliza un contador de 16 bits aumentado para el conteo de periodo (Señal base de 500kHz) la resolución es mejor que 9 bits. Los algoritmos estadísticos descritos por las ecuaciones (19-22) se implementan sobre las muestras de V después de la ecuación de calibración (figura 1, (4)). Asimismo, se clasifican todas las muestras de V en un histograma interno (Akai, 1994; Gasch 1990) implementado con contadores de 32 bits, con una resolución de 1m/s.

El prototipo C2 está basado en un microcontrolador Siemens 80C535, y consiste de a) una placa CPU, que contiene el microcontrolador, 32KB de RAM estática, 32KB de EPROM y la interfase RS232 para comunicarse con la PC, b) una placa de adaptación de señales analógicas y de pulsos, provenientes del anemómetro y de la veleta, así como de la tensión de la batería de 12V asociada a la fuente de alimentación del sistema, c) un display alfanumérico de cristal liquido (LCD) de 1 línea y 16 caracteres, d) una placa que unifica el teclado de 4 contactos y un sencillo calibrador de señales, para realizar las pruebas, que toma como referencia la frecuencia de 50Hz de la línea, y e) una placa que contiene a la fuente de alimentación de línea (220V CA), y un conjunto fuente-cargador para una batería de 12V, que provee energía en casos de fallas de línea. El cargador está limitado a una corriente de 180mA, y tiene como finalidad compensar la autodescarga de la batería. Podemos ver un diagrama de la configuración de éste prototipo en la figura 2. El sistema funciona satisfactoriamente desde octubre de 1995.

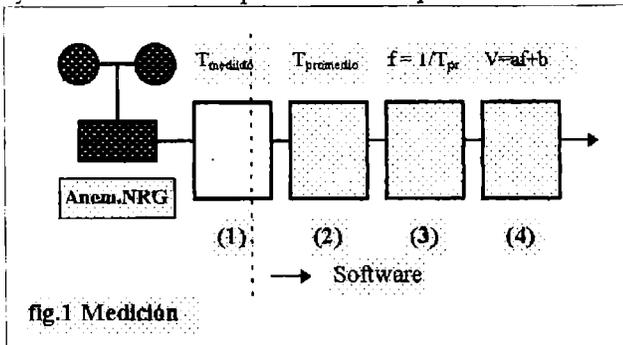


fig.1 Medición

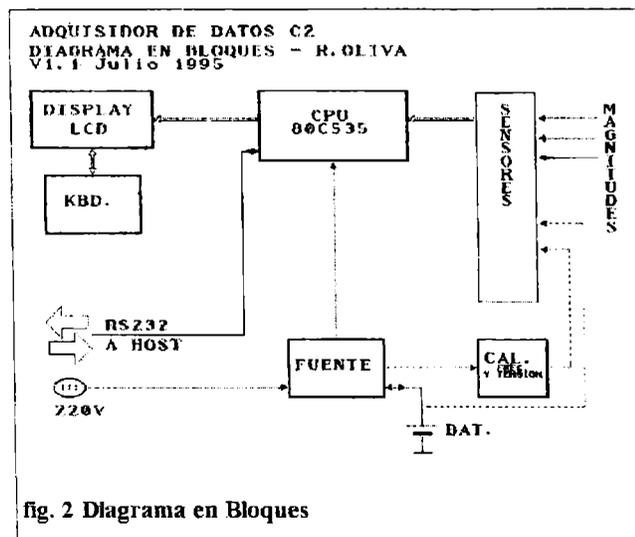


fig. 2 Diagrama en Bloques

PROGRAMAS DE ANÁLISIS DE DATOS

Para el análisis de los datos obtenidos, se escribió un programa en ambiente DOS de descarga de datos, similar a un terminal con comandos específicos, y las rutinas de conversión para permitir la lectura de los datos en formato de planillas de cálculo estándar. El tamaño de la memoria RAM del C2 obligaba a esta descarga en periodos de 1 semana aproximadamente, con muestras $\langle V \rangle$ de 20 minutos. El análisis de los datos descargados se realizó en bloques mensuales, utilizando un lenguaje de macros (VBA) para las planillas de cálculo. Las salidas de éste análisis permiten obtener: a) Gráficas de series temporales de $\langle V \rangle$ para un mes particular (por ejemplo, figura 3). b) Gráficas de los histogramas comparados para distintos meses (figura 4). c) Histogramas mensuales de dirección de viento. d) Evaluación de los parámetros k, A de Weibull a partir de histogramas y a partir de las mediciones de $\langle V \rangle$. e) Comparación de histogramas teórico y medido a partir de los parámetros obtenidos.

Para la estimación de los parámetros de Weibull, se utilizó un método (Justus et al, 1977; Barros, 1986; Mattio/Ponce 1995) que permite obtener dichos parámetros a partir de la salida del *histograma interno* de C2, que consiste en un conjunto de ocurrencias de velocidad de viento, clasificadas en bins de $0-V_1, V_1-V_2, \dots$ con frecuencias f_1, f_2, \dots . El método consiste en hallar las frecuencias acumuladas P_i tales que $P_1 = f_1, P_2 = P_1 + f_2, \dots, P_i = P_{i-1} + f_i$. Recordando que para Weibull, puede escribirse lo siguiente:

$$F(v_i) = P_i = 1 - \exp\left(-\frac{v_i}{k}\right)^k \quad \text{o también} \quad 1 - P_i = \exp\left(-\frac{v_i}{k}\right)^k \quad (19)$$

tomando logaritmo natural dos veces, se tiene:

$$\ln(-\ln(1 - P_i)) = k \ln v_i - k \ln A \quad (20)$$

El cambio de variable siguiente;

$$\ln(-\ln(1 - P_i)) = y_i, \quad \ln v_i = x_i \quad (21)$$

permite intentar un ajuste de la recta $y_i = bx_i + a$ y luego, en base a los coeficientes b, a obtenidos, hallar:

$$A = e^{-\frac{a}{b}} \text{ [m/s]}, \quad k = b \quad (22)$$

que son los coeficientes requeridos. Esta estimación debe hacerse sobre un periodo suficientemente extenso.

A efectos de evaluar la aproximación de las mediciones realizadas, se hicieron comparaciones con mediciones de dos estaciones automáticas de tipo comercial (Davis) instaladas a) sobre la costa de la Ría de Río Gallegos, por el Instituto de Oceanografía de la UNS (Bahía Blanca) en convenio con el Centro Marítimo Austral (CEMA) en octubre de 1995, y b) en la base Río Gallegos de la empresa Transportadora Gas del Sud S.A., desde 1994. En ambos casos las mediciones son similares, a pesar de estar ubicadas las estaciones en zonas diferentes (5km de distancia entre ellas). La diferencia entre las medias de las estaciones del CEMA y la UNPA en el período estudiado fue de 11.09%. La proximidad con el edificio del anemómetro de la estación Davis/CEMA sería el factor más importante a tener en cuenta para explicar la media menor allí. Sin embargo, la media anual (Octubre '95 a Octubre '96) medida con el C2 de 5.74m/s, está por debajo de los valores históricos de la zona (Barros, 1986), lo que sugiere que la ubicación de la torre no es adecuada.

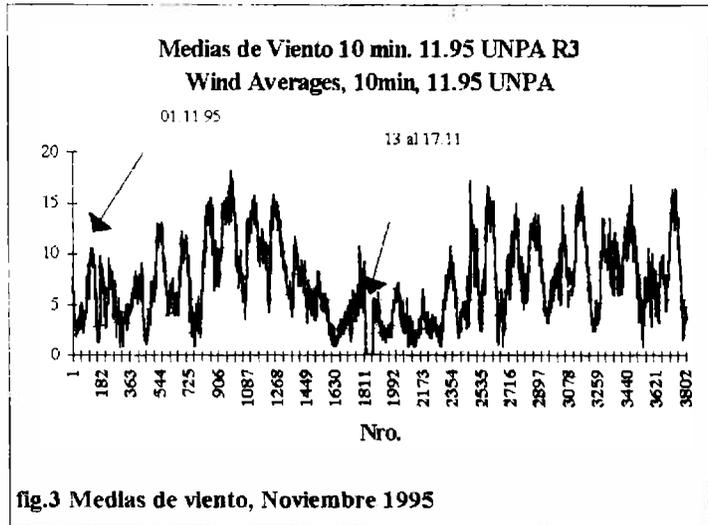


fig.3 Medias de viento, Noviembre 1995

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a lo largo de un año de mediciones con el prototipo, y su comparación con los de otras estaciones, resultan en un balance positivo. El uso principal del C2 se encuentra, sin embargo, como instrumento didáctico ya que permite la modificación y variación de sus componentes y programas, lo cual no es posible en estaciones comerciales.

AGRADECIMIENTOS

La construcción e instalación de la torre fueron donadas por la empresa INGEZA. El autor quiere agradecer al CEMA y a la empresa TGS S.A. por la valiosa colaboración prestada.

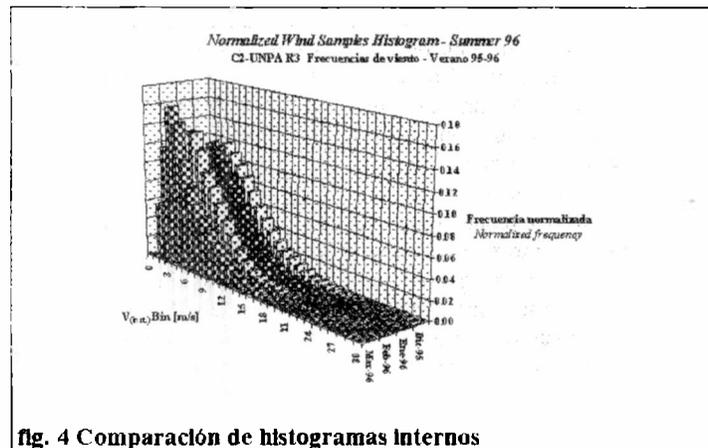


fig. 4 Comparación de histogramas internos

REFERENCIAS

- Akai, T.J. (1994) *Applied numerical methods for Engineers*, J.Wiley & Sons, New York. ISBN 0-471-02017-6.
- Barros, Vicente R. (1986) *Atlas del Potencial Eólico del Sur Argentino*. Puerto Madryn, CENPAT -CONICET.
- Buehring, I.K., Frenis L.L. (1981) Control Policies for Wind-Energy Conversion Systems, *IEE Proc.V. 128* N° 5, pp 253-61. UK.
- DEWI (Deutsches Windenergie Institut) (1993) *Course Material of Grid Connected Wind Turbines*, Wilhelmshaven, Alemania.
- Gasch, R. (1990) *Windkraftanlagen, Grundlagen und Entwurf*, BG Teubner, Stuttgart ISBN 3-519-16334-9.
- Jamil, M. (1995) Wind Power Statistics and Evaluation of Wind Energy Density, *Wind Engineering, V.18, No. 5*, pp. 227-240, UK.
- Justus, C.G.; Hargraves, W.R.; Mikhail, A. S.; Graver, D. (1977) Methods for Estimating the Wind Speed Frequency Distributions, *J. Applied Meteor.* 17, pp. 673-678.
- Mattio, H.F., Ponce, G.A. (1995) *La Importancia del Estudio del Viento en un Sistema de Conversión de Energía Eólica*, CREE-Rawson, Argentina.
- Molly, J.P. (1990) *Windenergie: Theorie, Anwendung, Messung*, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, Alemania, 2da edición.
- Williamson, T. (1985) Using the 8051 microcontrollers with resonant transducers, *IEEE T.I.E. IE32, N° 4, USA*.