

*Introducción a los modelos y Control de maquinas eólicas I*  
*I Ing. Rafael Oliva I*

# 3 ■ /PARTE I

## **.ADQUISICIÓN DE DATOS RECURSO EÓLICO**

---

***\_3.1 Mediciones de viento***

***\_3.2 Evaluación de Datos - Mediciones  
de Viento***

### .3 ADQUISICIÓN DE DATOS RECURSO EÓLICO

Se tratará en este tema la adquisición de datos orientada a equipos eólicos. En sentido general puede definirse la adquisición de datos como cualquier proceso de recolección de información del mundo real, aunque cada vez con mayor frecuencia se traducen las magnitudes físicas a adquirir a magnitudes eléctricas. El uso y abaratamiento de las computadoras en los últimos años han permitido la automatización de éste proceso, facilitando la recolección de más datos en menos tiempo reduciendo los errores.

En lo que respecta a las máquinas eólicas, la adquisición de datos comprende tanto la medición de datos meteorológicos importantes para el funcionamiento de la máquina, antes y durante la operación, como en las mediciones de los parámetros potencia, velocidad de giro, tensión y corriente propios de la máquina.

Los equipos para medición meteorológica “*stand-alone*” son utilizados en general para evaluar las condiciones de un futuro emplazamiento para máquinas eólicas. Estos equipos almacenan como mínimo datos de intensidad y dirección de viento, aunque no es raro utilizar también sensores de temperatura y presión atmosférica. Son equipos autónomos y de bajo consumo, que pueden funcionar sin atención durante meses.

La mayoría de las máquinas eólicas por encima de los 50kW de potencia tienen incorporados en la góndola instrumentos para medición de viento en dirección e intensidad. Esta última, con las correcciones por la proximidad del rotor, se suele utilizar para diferenciar estados de operación (ej  $V > V_N$  o  $V < V_N$ ) pero no como parámetro continuo de control. La medición de dirección se utiliza para la corrección del azimut de la góndola a través de un motor y un sistema de piñón y corona. Todas las máquinas eólicas necesitan algún tipo de medición de potencia, o de tensión y corriente de salida. Otras magnitudes importantes que suelen medirse son velocidad de giro, temperatura del generador y caja multiplicadora, y potencia activa y reactiva.

Finalmente, el relevamiento de las características de las máquinas eólicas, típicamente la curva de potencia o los esfuerzos en la torre o las palas, requieren complejos sistemas de adquisición de datos que combinan mediciones meteorológicas con datos internos de la máquina.



3.1 Mediciones de viento

3.1a\_ Medición de intensidad de viento: La evolución temporal de la intensidad de viento es típicamente muy irregular. Como se muestra en la Figura 3 I, en pocos segundos su valor instantáneo puede apartarse bastante de la media  $\langle V \rangle$ . La velocidad instantánea es una magnitud analógica, entendiéndose por tal a una variación de cambios infinitesimales. En general tendremos, sin embargo, mediciones “discretas”, o sea muestras digitalizadas cada  $\Delta t$  segundos, constituyendo una serie de valores que aproximan la medición real.

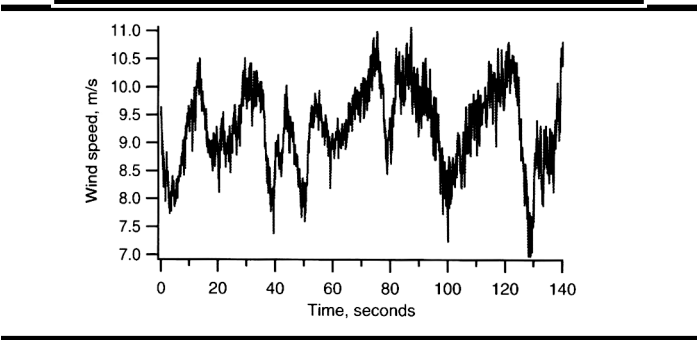


Figura 3 I/  
Representación  
analógica de la  
velocidad V de viento

El tipo de transductor más utilizado para la medición de la intensidad  $V$  del viento es el anemómetro de copas o de copelas (Figura 3 II). Se trata de una rueda con piezas cóncavas de material liviano, de eje vertical. Su principio de funcionamiento es el de un rotor de eje vertical con arrastre diferencial, que se basa en la disímil resistencia al aire de las piezas cóncavas según su ubicación respecto a la dirección del viento. La velocidad de giro del transductor tiene una relación aproximadamente lineal con la velocidad, y por lo tanto con la frecuencia de la señal eléctrica de salida.



Figura 3 II/  
Anemómetro de  
copas  
MAX#40 de NRG

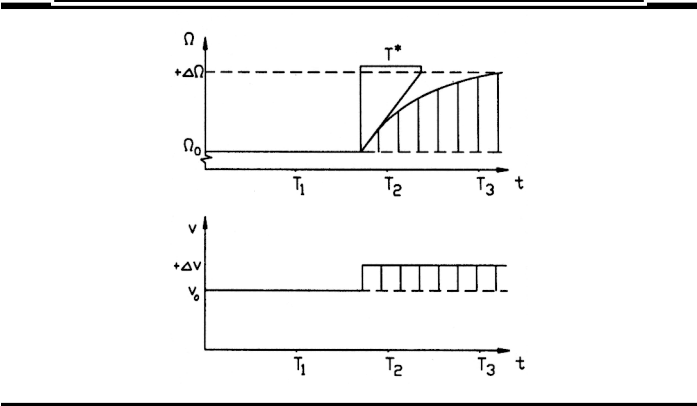
Si bien se fabrican modelos para adquisición de una tensión analógica de salida, la mayoría de los anemómetros actuales generan pulsos de salida de un sensor óptico o un sensor de efecto Hall, o una salida de tensión alterna senoidal cuya información es la frecuencia. La salida proporcional a la frecuencia otorga una gran inmunidad a los ruidos. Rangos típicos de frecuencia son:

|          |                                           |
|----------|-------------------------------------------|
| 0-70 Hz  | NRG Systems (cuatro imanes ó efecto Hall) |
| 0-800 Hz | Thies Clima (sensor óptico)               |

La respuesta transitoria de los anemómetros de copela puede caracterizarse mediante una constante  $L$  [m]. Esta constante representa la longitud de la columna de aire que pasa en un tiempo  $T^*$ [s], tiempo de respuesta a la velocidad  $V_0$ [m/s] de la columna, suponiendo un sistema de primer orden y un escalón de velocidad a  $V_0 + \Delta V$ . Esto puede verse en la Figura 3 III. La expresión de la constante de longitud es entonces  $L = V_0 T^*$ .

Una constante  $L$  reducida indica mejor respuesta en los cambios de la velocidad de giro  $\Omega$  a las variaciones de  $V$ . Para instrumental de investigación se suele requerir  $L$  de 1m o menos. Valores típicos para medición son 3 a 5m.

Figura 3 III/  
Respuesta transitoria  
del anemómetro  
(gent. DEWI)



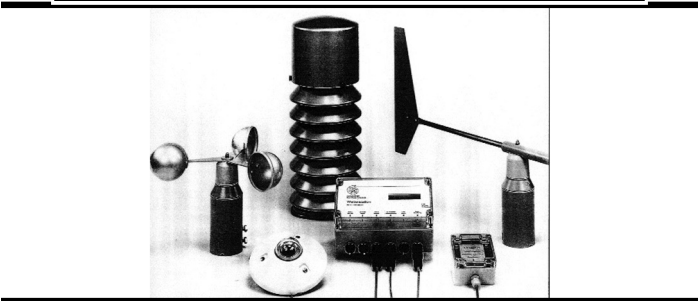
Los principales errores en los anemómetro de copela surgen en la alinealidad para bajas velocidades de viento (típicamente errores superiores al 20 % para 1m/s, dependiendo del instrumento) y los errores en la respuesta transitoria por sobrevelocidad, o efecto overspeeding.

Esto se debe a la diferencia en los coeficientes de arrastre  $C_{w1,2}$ , que producen una aceleración  $+dV/dt$  ante un escalón de viento mayor que la deceleración ante una caída de  $V$ .

Los instrumentos más utilizados son los de 3 o 4 copelas, y la elección del tipo de generador de señal depende en gran medida del circuito de adquisición que se utilice. Para aplicaciones en temperaturas extremas, se fabrican anemómetros con resistencias de calentamiento que evitan su inutilización en invierno. Esto se realiza con transformadores para aplicar 24VCA a dichas resistencias [NRGSystems], y el sistema de alimentación de la estación es mucho más complejo.

Otros instrumentos utilizados para la medición de la intensidad de viento son los anemómetros de hélice, en 1 ó en tres dimensiones (muy especializados), los anemómetros de esfera de arrastre, los de alambre caliente (que actúan por enfriamiento convectivo al aumentar al intensidad de  $V$ ) y los tubos de presión o de Pitot. Estos últimos suelen utilizarse para calibración de anemómetros de copela, en túneles especiales de viento.

**3.1b\_ Medición de dirección de viento:** Para medir la dirección del viento (la convención usual de la OMM es la dirección desde dónde viene el viento) se utiliza comúnmente una veleta con salida analógica (a través del cursor de un potenciómetro) o digital (típicamente con una codificación Gray de 8 bits, y corrección de errores). Los modelos más nuevos de salida analógica utilizan potenciómetros de plástico conductivo, que otorgan una vida útil extendida de aproximadamente  $50 \times 10^6$  revoluciones [NRGSystems], o potenciómetros duales. Valores típicos son potenciómetros de 10Kohm con un rango de  $352^\circ$  y un error de linealidad mejor que 1 %. La pequeña zona muerta requiere en general alguna compensación por software.



■ Figura 3 IV/  
De Izq. a Der.  
Anemómetro,  
Piranómetro  
(radiación solar),  
Sensor de  
Temperatura, Data  
Logger (Registrador),  
Sensor de Presión  
Atmosférica y Veleta  
(Ammonit GmbH)

También se fabrican veletas especiales para el control de dirección del viento de máquinas eólicas. Estas veletas tienen un interruptor óptico o un *microswitch* en topes de  $\pm 10^\circ$ , que permiten iniciar el desvío actuando con el motor azimutal por parte del control supervisor. También tienen la capacidad de ubicar a la máquina a  $90^\circ$  fuera de la dirección del viento.

**3.1c. Otras magnitudes meteorológicas:** En el inicio del capítulo se presentaron las magnitudes principales que describen la potencia de una máquina eólica, según la fórmula:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p \eta_{TS} V_N^3 \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \quad [\text{kW}] \quad (1.3.1a)$$

donde  $\eta_{TS}$  es el rendimiento del *drivetrain* + generador [0.7 a 0.95] y  $C_p$  el coeficiente de potencia [0.3 a 0.5]

Una vez medida la velocidad  $V$  del viento, la magnitud restante que no depende de la máquina eólica es la densidad  $\rho$  [ $\text{kg/m}^3$ ] del aire. Puede utilizarse la siguiente fórmula para evaluar la densidad del aire:

$$\rho = \frac{B}{RT} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad B \equiv \text{Presión} [\text{hPa}]; R \equiv \text{constante de los gases}$$

$$\text{y } T \equiv \text{Temperatura en } ^\circ \text{K} \quad (1.5.1a)$$

y referir los valores a una atmósfera standard de valores:

$$\begin{aligned} T_0 &= 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K} \\ \rho_0 &= 1.225 [\text{kg/m}^3] \\ B_0 &= 1013.13 [\text{hPa}] \end{aligned}$$

La siguiente fórmula, utilizada por el Instituto Alemán de Energía Eólica [DEWIK93] y por el CREE de Rawson, [Mattio/Guerrero95] permite corregir para la densidad real, basándose en mediciones de temperatura y presión (indicadas con subíndice  $m$ ):

$$\rho = \rho_0 \frac{B_m}{B_0} \frac{T_0}{T_m} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad B \equiv \text{Presión} [\text{hPa}] \text{ y } T \equiv \text{Temperatura } [^\circ\text{K}] \quad (1.5.1b)$$

con lo cual la potencia corregida resulta:

$$P_{corr} = P_m \left( \frac{\rho_0}{\rho_m} \right) \quad [\text{kW}] \quad ; \text{el subíndice } m \text{ indica } medido \quad (1.5.1c)$$



3.1c\_1 Medición de la presión atmosférica

Si bien es común utilizar para la presión atmosférica la columna de mercurio, basada en el principio de Torricelli, para mediciones automáticas se recurre a algún sensor más adecuado. Por ejemplo, para mediciones de precisión se utiliza un sensor tipo *caja anerode*. Se trata de una caja o tubo de paredes finas y deformables, de cobre-berilio, parcialmente al vacío. Las variaciones de presión externa **B** se transmiten con buena precisión en deformaciones de las paredes de la caja.

Como ejemplo citamos al *Barogeber D1* de Thies-Clima (Alemania), que tiene un rango de presiones absolutas entre 700 y 1050 hPa, y una precisión de  $\pm 0.5\text{hPa}$ . Se trata de una unidad programable que puede trabajar a temperaturas entre 0 y 50°C. La altura sobre el nivel del mar en que opera el instrumento se selecciona con microswitches entre 0 y 1970m s.n.m. El instrumento cuenta con una salida serie estandar RS232, y una salida analógica tipo 4-20mA.

El avance de la tecnología de semiconductores ha facilitado la construcción de sensores de presión micromecanizados, cuyo costo es sensiblemente inferior al de los clásicos de caja anerode [NRGSystems]. Las primeras versiones requerían acondicionamiento de señal externo, y las últimas ya incluyen en el mismo sensor el amplificador, un conversor A/D y una interfase serie (ej. I<sup>2</sup>C) que permiten su conexión directa a un circuito con microcontrolador.

3.1c\_2 Medición de temperatura

Hay una gran variedad de sensores utilizables para mediciones automáticas de temperatura. Las resistencias NTC (*Negative Temperature Coefficient*) suelen tener una transferencia fuertemente alineal aunque su costo es reducido y existen actualmente versiones con excelente repetibilidad en los reemplazos (1 a 2 %). Para mejor precisión se prefieren las resistencias PTC construidas con alambre de platino, de altísima linealidad, denominadas genéricamente Pt100. También suelen construirse en base al mismo principio sensores integrados con salida analógica, por ejemplo de 4 a 20mA. El modelo 2.12.14 de Thies-Clima (Alemania) tiene una salida de éste tipo, con una precisión de  $\pm 0.3^\circ\text{C}$ . El rango de trabajo es de 0 a 60°C. En general, se proveen con algún tipo de abrigo meteorológico que inhibe su enfriamiento por corrientes convectivas o su calentamiento por radiación directa. Finalmente, se pueden utilizar sensores semiconductores integrados de menor costo, aunque se fabrican algunos de precisión aceptable para aplicaciones eólicas [NRGSystems].

3.1d\_ Sistemas autónomos para recolección de datos meteorológicos (Data-logger)

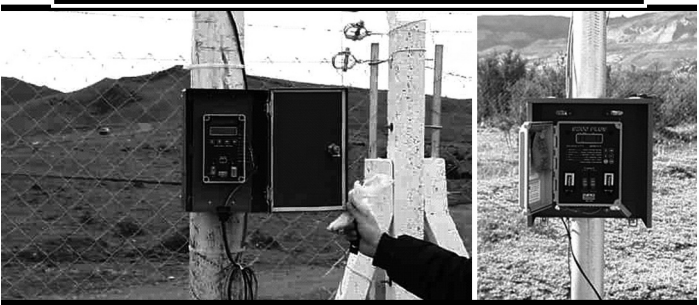
Estos sistemas son de funcionamiento automático y bajo consumo, indicados para mediciones a largo plazo de viento, presión y temperatura para evaluación de sitios para máquinas eólicas. La mayoría de los equipos posee al menos 2 entradas, para un anemómetro y una veleta. Varios parámetros son programables. En una aplicación típica, el procesador interno tomará muestras de intensidad de viento cada 1s, construyendo luego de 10min una media  $\langle V \rangle$  de 600 valores, que es almacenada en una serie temporal asociada a un indicador de hora/fecha generado por un reloj interno. Simultáneamente, se incrementa el contador correspondiente a un intervalo predefinido  $\Delta V$  o *bin* en que cae la media recién calculada, lo que permite construir el histograma de la medición. Ambos datos son almacenados junto con la media de dirección. Es común que el aparato calcule y almacene también alguna medida de la dispersión de los datos, como la desviación standard o la intensidad de turbulencia **S** (ver 2.8 -4). Algunos *Data-loggers* tienen entradas adicionales para medir el viento a distintas alturas, presión, temperatura e incluso lluvia y humedad relativa.

Figura 3 V/  
Estación BAPT  
nacional – SPSE  
/Los Antiguos



Los métodos de almacenamiento de estos sistemas han evolucionado bastante. Al principio, lo más común eran las memorias estáticas de estado sólido *SRAM* fijas, con respaldo de baterías. El acceso a los datos se realizaba con una interfase RS232 a través de una PC portátil que debe llevarse hasta el lugar de la medición (marcas BAPT – Figura 3 V, Ammonit, Figura 3 IV). Las siguieron los modelos basados en memorias tipo EEPROM extraíbles (marca NRG, modelo 9200 - Figura 3 VI) o en tarjetas de estado sólido extraíbles tipo PCMCIA (NRG 9300, *Secondwind*). Los últimos modelos utilizan Tarjetas Compact Flash y conexión a Internet (NRG Symphonie) que son más sencillos

de operar y arriesgan menos la integridad de los datos. Su costo, sin embargo, es mayor. Como opcionales, estos *data-loggers* permiten la conexión a un modem con teléfono celular, satelital o con una línea telefónica convencional. Existen modelos de menor costo como la NRG WindExplorer, que almacenan menor cantidad de información aunque resultan útiles para muchas aplicaciones (Figura 3.VI).



■ Figura 3.VI/  
Estación NRG Wind  
Explorer UNPA-SPSE  
Río Turbio y  
(der.)  
Estación NRG 9200

En general las mismas firmas que fabrican los *data-loggers* venden algún tipo de software para análisis de datos de viento en entorno PC. Estos paquetes simplifican la elaboración de los datos, permitiendo el ajuste a una distribución de Weibull del histograma y la creación de gráficas. Fue el caso del paquete ALWIN, producido conjuntamente por el DEWI y la firma Ammonit de Alemania, y el software MicroSite de NRG Systems, EEUU, hoy discontinuado.

Otros programas, como el WASP del RISO National Laboratory de Dinamarca, permiten no sólo la evaluación y ajuste a distribución de Weibull *por dirección* de series temporales de datos de viento, sino también la construcción de los denominados *Atlas* de viento para una determinada zona, con una validez de 100 km a la redonda. Estos *Atlas* simplifican la evaluación de un nuevo sitio para la ubicación de máquinas eólicas dentro de la zona de influencia, pues proporcionan datos bastante precisos si se evalúan correctamente la rugosidad y los obstáculos, sin necesidad de realizar extensas mediciones en el lugar mismo [WASP-RISO92]. Otros programas mas recientes, como el WindPro de EMD ([www.emd.dk](http://www.emd.dk)), integran módulos de tipo básico (Basis, Meteo) que permiten introducción de series de tiempo de diversas estaciones y el cálculo de producción anual energética de aerogeneradores típicos. Asimismo, es posible integrar (a costo adicional) módulos para dimensionamiento de parques, estudios eléctricos y análisis de ruido y efectos visuales.

3.2 Evaluación de los Datos - Mediciones de viento

La estadística del viento que se discutiera en la sección anterior sirve como base para la evaluación de las muestras de datos de viento digitalizadas por los equipos de registro. Las fórmulas basadas en funciones continuas pueden ser aproximadas con precisión aceptable por expresiones discretas. La media anual  $\langle V \rangle$  [m/s] definida en 1.2.6a puede aproximarse de la siguiente manera:

$$\langle V \rangle = \int_0^\infty v f(v) dv \cong \sum_{i=1}^n f_i V_i \tag{1.3.2a}$$

donde  $f(v)$  es la distribución de probabilidad.

Aquí se ha supuesto que un *data-logger* proporciona una serie de cantidades de ocurrencia de viento  $N_i$  para distintos *bins* separados un valor  $\Delta V$  entre sí, con valores centrales  $V_i$ . Si la función distribución no es conocida, las frecuencias  $f_i$  se pueden calcular a partir de la expresión:

$$f_i = \frac{N_i}{N_T}; \text{ con } i = 1, 2, 3 \dots n, \text{ y } N_T = \sum_{i=1}^n N_i \tag{1.3.2b}$$

Del mismo modo, el momento de tercer orden para las expresiones de potencia puede aproximarse de la siguiente manera:

$$\langle V^3 \rangle = \int_0^\infty v^3 f(v) dv \cong \sum_{i=1}^n f_i V_i^3 \tag{1.3.2c}$$

donde  $f(v)$  es la distribución de probabilidad.

Una vez obtenida la media muestral  $\langle V \rangle$ , es posible calcular la varianza muestral que aproxima al valor continuo con:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (v - \langle V \rangle)^2 f(v) dv \cong \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_i - \langle V \rangle)^2 f_i \quad [\text{m}^2/\text{s}^2] \tag{1.3.2d}$$

Con estas estimaciones, es posible calcular la intensidad de turbulencia  $S = \sigma_v / \langle V \rangle$ , y la expresión del *epf* o factor de patrón de energía:

$$K_e = \frac{\langle V^3 \rangle}{\langle V \rangle^3} \quad [ ] \tag{1.3.2e}$$

que se utilizó para evaluar la potencia promedio en 1.2.6-5.

3.2 /1 Cálculo práctico de valores

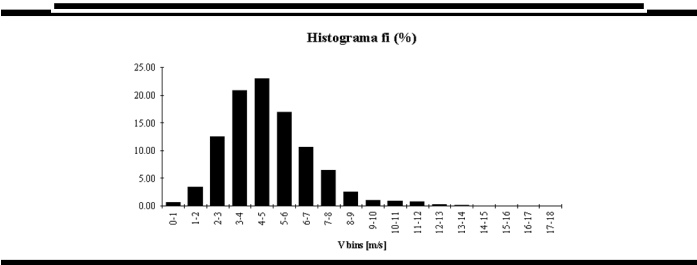
A continuación se muestra una tabla de valores, y los resultados de cálculo implementados con una planilla electrónica convencional, para datos relevados por un *data-logger* Ammonit.

Para éstos cálculos se utilizaron las fórmulas 1.3.2a-e.

| Histograma DEWI, iniciado 10.8.88, 512h 41m |           |                                                         | RBO 1995 |        |          |          |                |
|---------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------|----------|--------|----------|----------|----------------|
| Valor                                       | Bin [m/s] | fi (%)                                                  | Vi       | fi*Vi  | fi*Vi**2 | fi*Vi**3 | fi*(Vi-<V>)**2 |
| 1                                           | 0-1       | 0.60                                                    | 0.50     | 0.30   | 0.15     | 0.08     | 0.11045549     |
| 2                                           | 1-2       | 3.40                                                    | 1.50     | 5.10   | 7.65     | 11.48    | 0.368153644    |
| 3                                           | 2-3       | 12.50                                                   | 2.50     | 31.25  | 78.13    | 195.31   | 0.655856045    |
| 4                                           | 3-4       | 20.80                                                   | 3.50     | 72.80  | 254.80   | 891.80   | 0.346454859    |
| 5                                           | 4-5       | 23.00                                                   | 4.50     | 103.50 | 465.75   | 2095.88  | 0.019423123    |
| 6                                           | 5-6       | 17.00                                                   | 5.50     | 93.50  | 514.25   | 2828.38  | 0.085552221    |
| 7                                           | 6-7       | 10.60                                                   | 6.50     | 68.90  | 447.85   | 2911.03  | 0.309737126    |
| 8                                           | 7-8       | 6.40                                                    | 7.50     | 48.00  | 360.00   | 2700.00  | 0.469814295    |
| 9                                           | 8-9       | 2.50                                                    | 8.50     | 21.25  | 180.63   | 1535.31  | 0.343991209    |
| 10                                          | 9-10      | 1.00                                                    | 9.50     | 9.50   | 90.25    | 857.38   | 0.221784484    |
| 11                                          | 10-11     | 0.90                                                    | 10.50    | 9.45   | 99.23    | 1041.86  | 0.293375235    |
| 12                                          | 11-12     | 0.80                                                    | 11.50    | 9.20   | 105.80   | 1216.70  | 0.360128387    |
| 13                                          | 12-13     | 0.30                                                    | 12.50    | 3.75   | 46.88    | 585.94   | 0.178304545    |
| 14                                          | 13-14     | 0.09                                                    | 13.50    | 1.22   | 16.40    | 221.43   | 0.068268284    |
| 15                                          | 14-15     | 0.06                                                    | 14.50    | 0.87   | 12.62    | 182.92   | 0.056563469    |
| 16                                          | 15-16     | 0.02                                                    | 15.50    | 0.31   | 4.81     | 74.48    | 0.02293825     |
| 17                                          | 16-17     | 0.01                                                    | 16.50    | 0.17   | 2.72     | 44.92    | 0.013711005    |
| 18                                          | 17-18     | 0.00                                                    | 17.50    | 0.00   | 0.00     | 0.00     | 0              |
|                                             |           | 99.98                                                   |          | 479.06 | 2687.90  | 17394.88 | 3.9245117      |
| Valores Calculados:                         |           | <V>[m/s]= 4.7906                                        |          |        |          |          |                |
|                                             |           | <V**2>[m/s]= 26.87895                                   |          |        |          |          |                |
| Tmedia=10min                                |           | <V**3>[m/s]= 173.94875                                  |          |        |          |          |                |
| Nro. medias=3076                            |           | ke= 1.582164303                                         |          |        |          |          |                |
| <V>[dado por ALWIN] = 4.7m/s                |           | sigma[m2/s2] 1.981038028                                |          |        |          |          |                |
|                                             |           | II=sigma/<V> 0.413526078                                |          |        |          |          |                |
|                                             |           | Verificación Sigma:<br>(<V**2>-<V>**2)**.5= 1.982196166 |          |        |          |          |                |

■ Tabla 3.2 I/  
Implementación en  
planilla electrónica

El histograma toma, para ésta medición, la forma siguiente:



■ Figura 3.2 I/  
Histograma de los  
datos

Si se quisieran obtener los coeficientes para una distribución de Weibull que ajuste al histograma de la medición, puede recurrirse a los métodos explicados en 2.6, que requieren el ajuste de una recta  $y_i = bx_i + a$ , con valores dados por:

$$\ln(-(\ln(1 - P_i))) = y_i$$

$$\ln v_i = x_i \tag{1.2.6k}$$

A partir de las constantes, pueden obtenerse los coeficientes de Weibull según;

$$A = e^{\frac{a}{b}} \text{ [m/s]}$$

$$k = b \text{ [ ]} \tag{1.2.6l}$$

Esto es lo que se ha realizado en la **tabla 3.2 II (derecha)**, a partir de datos de la misma medición. Los valores  $P_i$  son las frecuencias acumulativas obtenidas sumando las  $f_r$ .

La gráfica del ajuste de la recta puede verse en la **Figura 3.2 II**.

De una manera similar, se puede reconstruir el histograma de una medición en forma aproximada conociendo los coeficientes de la distribución de Weibull del sitio, recordando que;

$$f_i = F(V_i + \frac{\Delta V}{2}) - F(V_i - \frac{\Delta V}{2}) \text{ [ ]} \tag{1.3.2f}$$

donde

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \tag{1.3.2f - 1}$$

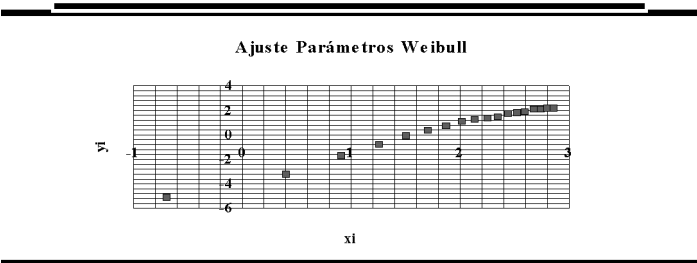
| Ajuste Weibull - II |         |         |
|---------------------|---------|---------|
| Pi (%)              | yi      | xi      |
| 0.60                | -5.1130 | -0.6931 |
| 4.00                | -3.1985 | 0.4055  |
| 16.50               | -1.7130 | 0.9163  |
| 37.30               | -0.7618 | 1.2528  |
| 60.30               | -0.0792 | 1.5041  |
| 77.30               | 0.3939  | 1.7047  |
| 87.90               | 0.7476  | 1.8718  |
| 94.30               | 1.0525  | 2.0149  |
| 96.80               | 1.2361  | 2.1401  |
| 97.80               | 1.3394  | 2.2513  |
| 98.70               | 1.4685  | 2.3514  |
| 99.50               | 1.6674  | 2.4423  |
| 99.80               | 1.8269  | 2.5257  |
| 99.89               | 1.9188  | 2.6027  |
| 99.95               | 2.0283  | 2.6741  |
| 99.97               | 2.0933  | 2.7408  |
| 99.98               | 2.1421  | 2.8034  |
| 99.98               | 2.1421  | 2.8622  |

| Curva de ajuste $y_i=bx_i+a$ |         |
|------------------------------|---------|
| b=                           | a=      |
| 2.1324                       | -3.5612 |

|             |        |
|-------------|--------|
| A[Weibull]= | 5.3124 |
| k[Weibull]= | 2.1324 |

3.2 /2 Cálculo de energía

Se trata de obtener una predicción de la energía producida por una máquina eólica en un período  $T$ , conocida la distribución discreta  $f_i$  del sitio y la curva de potencia  $P(Vi)$  dada por el fabricante.

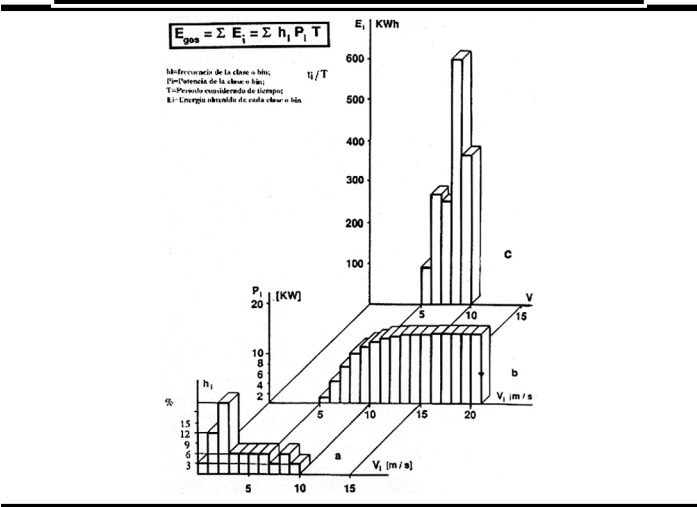


■ Figura 3.2 II/  
Ajuste de  
Coeficientes de  
Weibull

La energía producida por la máquina puede hallarse a partir de:

$$E = T \sum_{i=1}^n f_i P_i \quad [\text{kWh}] \quad (1.3.2h)$$

Puede verse que ambas curvas, la distribución discreta **fi** y la característica de potencia de la máquina **P<sub>i</sub>** contribuyen fuertemente al resultado final de energía **E**. Para el período **T** suele tomarse 1 año (8760h) o un mes, dependiendo de la aplicación. En la **Figura 3.2 III** pueden verse las tres características, con la notación **h<sub>i</sub>** para designar las frecuencias **fi**.



■ Figura 3.2 III/  
Cálculo de la Energía  
h<sub>i</sub> = frecuencia de la clase  
o bin;  
P<sub>i</sub> = Potencia de la clase o bin;  
T = Período considerado de  
tiempo;  
E<sub>i</sub> = Energía obtenida de cada  
clase o bin

La determinación precisa *a priori* de la energía anual que entregará una máquina eólica es imposible. Sin embargo es de suma importancia económica el cálculo de una estimación confiable, que

permita evaluar la inversión, pues la cantidad de kWh define muchas veces la viabilidad de un proyecto.

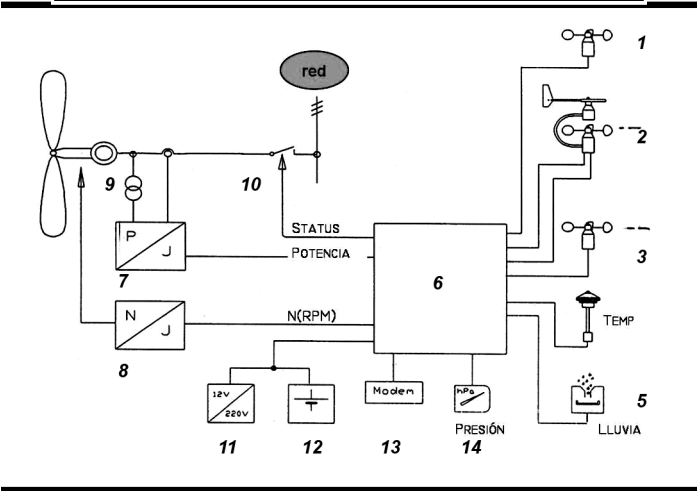
3.2 /3 Característica de Potencia de una máquina eólica

Como se vio en la fórmula de energía, es importante conocer la potencia que entrega una máquina eólica para una determinada velocidad de viento. Los fabricantes proporcionan una curva **P(V<sub>i</sub>)** que suele ser demasiado optimista. En los casos en que dicha curva no ha sido certificada por un organismo técnico independiente, puede considerarse la evaluación particular como una referencia.

La medición de potencia se realiza con un *data-logger* especial, con capacidad de registrar potencia activa entregada (a través de tensión y corriente de línea), velocidad de giro, y estado (activo-inactivo) del aerogenerador, además de los datos meteorológicos: viento en magnitud y dirección, temperatura, presión barométrica y lluvia.

Este equipo almacena una secuencia de valores medios, típicamente generados cada 600s [10min] a una frecuencia de muestreo de 1Hz. En la **Figura 3.2 IV** podemos ver un esquema de éste tipo de *data-logger*, que cuenta incluso con un módem para consulta a distancia de la evolución de la medición. Los valores medios extraídos se evalúan con un programa estadístico, construyendo una curva media de potencia en función de la velocidad del viento.

Figura 3.2 IV/  
Sistema para  
medición de curvas  
de potencia de  
aerogeneradores  
(gene. DEWI)  
1 Velocidad de viento a la  
altura del cubo del rotor; 2  
Medición de velocidad de  
viento de referencia y  
dirección; 3 Velocidad de  
viento a 10m de altura; 4  
Temperatura; 5 Precipitación;  
6 Data-logger; 7 Trasdutor  
de potencia; 8 Trasdutor de  
velocidad de giro; 9 Medición  
de tensión y corriente; 10  
Status; 11 Fuente de  
alimentación; 12 Batería  
de backup; 13 Módem;  
14 Trasdutor de presión  
atmosférica





El programa ALDA, del DEWI y Ammonit GmbH, realiza este tipo de evaluaciones, con capacidad para realizar comparaciones entre la curva teórica de la máquina y la medición realizada. El programa también realiza corrección para las zonas en que la medición del anemómetro no es efectiva, toma nota del tiempo activo de la máquina durante la medición, de la energía producida y del rendimiento general.

3.2 /4 Propagación de errores en la medición de potencia

El tratamiento de los datos para las curvas de potencia es relativamente complejo, y existen trabajos importantes publicados al respecto (ver [ECN-Dragt89] o [Mattio-Guerrero95]). Solo trataremos aquí el tema de la evaluación simplificada del error y la influencia de cada componente en la medición de la curva de potencia de una máquina eólica.

La expresión de potencia es:

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p S V^3 = \frac{1}{2} \left( \frac{B}{RT} \right) C_p S V^3 \quad \left[ \text{kW} \right] \quad (1.3.2h)$$

donde B es la presión atmosférica, y T la temperatura.

Tomando en cuenta los transductores en un sistema típico como el de la Figura 1.4 IV, se suele tomar la siguiente expresión para la propagación de error;

$$\Delta P = \left( \left( \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial B} \Delta B \right)^2 + \left( \frac{\partial P}{\partial T} \Delta T \right)^2 + \Delta P_{med}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \left[ \text{kW} \right] \quad (1.3.2i)$$

donde B es la presión atmosférica, T la temperatura, V el viento y ΔP el error del transductor de potencia.

La contribución al error de la componente del viento es la mayor, debido a su potencia cúbica. Por eso es de suma importancia la calibración precisa de los anemómetros en éstos casos. A continuación se muestran los resultados de error de una medición de una máquina de 100kW.

$$\left( \frac{\partial P}{\partial V} \right) \approx 15 \text{ kW} / \text{ms}^{-1} \quad \Delta V = 0.2 \text{ ms}^{-1}$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial B} \right) \approx 1.2 * 10^{-5} \text{ kW} / \text{Pa} \quad \Delta B = 200 \text{ Pa}$$

$$\left( \frac{\partial P}{\partial T} \right) \approx 4.2 * 10^{-3} |P_i| \text{ kW} / ^\circ \text{C} \quad \Delta T = 2^\circ \text{C}$$

$$\Delta P_{med} = 0.5\% \text{ f.e.} \approx 1 \text{ kW}$$

Con lo cual la medición produce un error absoluto total de:

$$\Delta P_{tot} \cong 3.2 \text{ kW}$$

lo cual representa un error relativo de 3.2 % para la potencia nominal indicada de aerogenerador.-