

VIENTOS EXTREMOS EN LA PROVINCIA DE NEUQUÉN

Jorge L. Lassig, Claudia Palese y Anabel Aparician

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina

(Manuscrito recibido el 22 de abril de 2010, en su versión final el 5 de febrero de 2011)

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es calcular los valores extremos de la velocidad del viento con distintos modelos propuestos en normas internacionales que son utilizadas tanto en el diseño de parques eólicos como en el de obras civiles. Se describen los modelos empleados y se realizan los cálculos en 5 lugares de la Provincia de Neuquén, utilizando datos de vientos medidos cuyas series tienen entre 8 meses y 5 años de longitud. Los valores extremos se obtienen con una recurrencia media de 50 años, y corresponden a la velocidad del viento media en intervalos de 10 minutos y de 3 segundos. Los valores encontrados se analizan y se los compara entre sí, con mediciones y con valores propuestos en la norma argentina de seguridad de obras civiles. Los valores extremos estimados según la European Wind Turbine Standards II no subestiman las mediciones disponibles, y comparados con los obtenidos por los otros modelos, se observa que las menores diferencias corresponden a las estaciones con series de mayor longitud. El parámetro de forma de Weibull y la longitud de los registros serían los factores más importantes en las estimaciones de los valores extremos de la velocidad del viento.

Palabras clave: aerogeneradores, velocidad de referencia, velocidad de supervivencia, velocidad básica, velocidades extremas del viento.

EXTREME WINDS IN THE PROVINCE OF NEUQUÉN

ABSTRACT

The objective of this work is to calculate the extreme values of wind speed with different models proposed in international standards that are utilized so much in the design of wind farms as in civil structures. The employed models are described and the calculations are carried out in 5 places of the Neuquén Province, utilizing data of winds measured whose series have between 8 months and 5 years of length. The extreme values are obtained with a return period of 50 years and they correspond to the extreme of the 10-minute and 3-second average wind speed. The found values are analysed and it are compared among them, with measurements and with values proposed in the standard of security of civil structures of Argentina. The extremes values that were estimated according to the European Wind Turbine Standards II do not underestimate the available measurements and the smaller differences observed with the results of the other models correspond to the longest series. The shape parameter of the Weibull distribution and the sample length (time period) would be the most important factors in the estimations of the extremes values of wind speed.

Keywords: wind turbines, reference wind speed, survival velocity, basic velocity, extreme windspeed.

1. INTRODUCCIÓN

Conocer los valores extremos de la velocidad del viento con un retorno de 50 años es de mucho interés en aplicaciones de ingeniería: normas de construcción de edificios, instalación de turbinas eólicas, tendido de líneas de alta tensión, y otras.

En algunas aplicaciones interesa encontrar el posible valor de la mayor tormenta de viento a ocurrir en un lugar específico, en otras el valor de la ráfaga máxima. Ambos valores son distintos.

En el reglamento del Centro de Investigaciones de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles Nro. 102 (CIRSOC 102) propuesto en 2001 (CIRSOC, 2001) se usa la velocidad básica del viento, V_b . Esta velocidad se calcula utilizando las velocidades extremas anuales considerando un intervalo de medición de 3 segundos (u_T) que está asociada con una recurrencia de 50 años (probabilidad anual de excedencia 0,02). Este dato es importante para los cálculos de las cargas o presiones dinámicas en estructuras.

En el diseño de aerogeneradores se utilizan las normas de la International Electrotechnical Commission, International Standard Nro. 61400-1 (IEC-61400-1) (IEC, 1994) o las European Wind Turbine Standards II (EWTS II, 1998). En ese caso interesa conocer la condición extrema de viento que deberá soportar la turbina eólica en el sitio de emplazamiento, a este valor se lo denomina velocidad de referencia (V_{ref}) y se define como el valor extremo de la velocidad considerando un intervalo de medición de 10 minutos, a la altura del rotor del aerogenerador, con un período de retorno de 50 años. También se debe calcular la velocidad de supervivencia de los aerogeneradores que se define como la velocidad máxima anual considerando intervalo de medición de 3 segundos, que está asociada con una recurrencia de 50 años, Ve_{50} , (o V_b en obras civiles).

Estas velocidades extremas se pueden calcular a través de la distribución de Gumbel (Fisher-Tippett tipo I), construyendo una base de datos a partir de los valores máximos anuales.

Si no hay una estación meteorológica en el sitio de interés, obtener una base de datos de 20 ó 30

valores requeriría una serie climática de datos de vientos del lugar donde se emplazará el futuro parque eólico u obra civil, tiempo imposible de considerar desde el punto de vista económico. En este caso se instala una estación meteorológica automática por un periodo de un año y mediante modelos de correlación o de flujo de aire se extiende la serie corta de datos de viento a una serie de varios años utilizando, si hubiera, otra estación meteorológica con registros de mayor longitud temporal y sometida al mismo régimen climático y características topográficas.

Además del modelo de Gumbel ajustado a la sub-muestra de máximos anuales, SG, (Standard Gumbel) hay otros modelos estadísticos que se utilizan para la estimación cuantitativa de la velocidad extrema. Por ejemplo, el método del pico sobre un umbral de velocidad, POT, (Peak-Over Threshold) que considera la serie completa de velocidades y fija un umbral suficientemente alto en vez de valores máximos.

Otro modelo estadístico es el de la tormenta independiente, MIS (Method of Independent Storms), que analiza una serie temporal de máximos de tormentas a los que se les ajusta una distribución de Gumbel. Este método incluye dos partes, la primera es la obtención de la sub-muestra de máximos independientes de las tormentas identificadas, y en segundo lugar el ajuste de la distribución de Gumbel a esos máximos (An y Pandey 2005).

En este trabajo el objetivo es calcular las velocidades extremas del viento con los distintos modelos de extremos propuestos (según IEC 61400-1; SG según EWTS II; y MIS) en algunos lugares de la provincia de Neuquén y compararlos con los registros de viento de los lugares y con los valores propuestos en el reglamento CIRSOC 102.

2. METODOLOGÍA

En este trabajo se consideran dos tipos de velocidades. Una que surge del promedio de la velocidad considerando un intervalo de medición de 10 minutos, que llamaremos v y otra que también es un valor medio pero de un intervalo de medición más corto: 3 segundos, que llamaremos

u_T . Con el primero se establece la velocidad media anual, v_{med} , y el valor extremo anual, V_{ref} ; y con el segundo el extremo anual V_{e50} .

2.1 Las Normas IEC 61400-1

El diseño de parques eólicos y la determinación del tipo de aerogenerador que se instalará se establecen mediante las normas IEC 61400-1 (1994). Las mismas fijan que se deberán conocer las características del viento del lugar donde se emplazarán las turbinas eólicas, para que los ingenieros calculen las cargas que actuarán sobre los distintos componentes de dichas máquinas y verifiquen que no excedan los límites para evitar daños estructurales o deformaciones irreversibles.

La norma IEC 61400-1 divide el régimen del viento, para el cálculo de la carga y consideraciones de seguridad, en condiciones del viento normales durante las cuales funciona la turbina de viento y, condiciones de viento extremas con períodos medios de retorno de 50 años. Las condiciones de viento extremas se usan para determinar cargas de diseño críticas que la turbina debe resistir durante su vida útil. Estas condiciones extremas incluyen la velocidad máxima debido a las tormentas y los cambios rápidos en velocidad y dirección del viento.

Para definir las características eólicas del sitio interesan las estadísticas de la población de las velocidades del viento y de los valores extremos.

Para la primera se asume que los datos de velocidad del viento (v) ajustan a una distribución Weibull. Se obtienen la velocidad media anual, v_{med} , y los factores de escala c y de forma k que definen $f(v)$ que es la función de densidad de probabilidad (f_{dp}):

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{k-1} \exp \left[-(v/c)^k \right] \quad [1]$$

La expresión [1] es válida si v , c y k son mayores que 0.

En la norma IEC 61400-1 el valor máximo de la velocidad del viento se establece con el Modelo de Velocidad de Viento Extremo llamado EWM (Extreme Wind Model). Este modelo se aplica en el cálculo de la carga o presión máxima que puede soportar la estructura del aerogenerador detenido antes que ocurra una rotura (*carga última*).

En la norma IEC 61400-1 la proporción entre la

velocidad de referencia (V_{ref}) y la velocidad media anual (v_{med}) es constante para las distintas clases de aerogeneradores:

$$V_{ref} / v_{med} = 5 \quad [2]$$

Esa relación se basa en valores típicos encontrados en el código de edificación británica. Probablemente la misma sea una característica de latitudes medias, porque en el código de edificación holandés se establece la misma proporción. Este valor resulta de un análisis del tipo SG de mediciones de la velocidad del viento por períodos prolongados (más de 20 años).

2.2. Distribución de valores extremos basada en la función de distribución acumulada de Weibull

Tomando la función de distribución acumulada, f_{da} , de la distribución de Weibull, la distribución de los valores extremos anuales de v está dada por la distribución estadística de orden n :

$$F^n(V) = \left(1 - \exp \left\{ - \left[(V/v_{med}) \Gamma(1+1/k) \right]^k \right\} \right)^n \quad [3]$$

donde Γ es la función gamma.

V_r es el valor extremo anual de v con un período de retorno de T_r años, entonces, se tiene la siguiente relación:

$$1 / \left[1 - F^n(V_r) \right] = T_r$$

$$F(V_r) = \exp \left[n^{-1} \ln(1 - 1/T_r) \right] \quad [4]$$

donde n es el número de eventos independientes. Cuando T_r es 50 años, V_r es V_{ref} .

Combinando [3] y [4] encontramos, después de una simplificación algebraica:

$$V_r / v_{med} = \left[\Gamma(1+1/k) \right]^{-1} \left(- \ln \left\{ 1 - \exp \left[n^{-1} \ln(1 - 1/T_r) \right] \right\} \right)^{1/k} \quad [5]$$

2.3. Distribución Fisher-Tippet tipo I basada en la distribución de Weibull

La distribución Fisher-Tippet tipo I o Gumbel de los valores extremos anuales de v , cuando el patrón de vientos del lugar se ajusta a una distribución de Weibull, es:

$$F_n(V) = \exp \left\{ - \exp \left[- \alpha (V - \beta) \right] \right\} \quad [6]$$

donde α es el parámetro de dispersión y β el parámetro modal. Si c es el parámetro de escala de la distribución de Weibull:

$$\alpha = k/c \left[\ln(n) \right]^{(1-1/k)} \quad [7]$$

$$\beta = c \left[\ln(n) \right]^{1/k} \quad [8]$$

$$c = vmed / \Gamma(1 + 1/k) \quad [9]$$

Para un período de retorno de Tr años es:

$$Tr = \{1 - Fn(Vr)\}^{-1} \rightarrow Fn(Vr) = 1 - 1/Tr \quad [10]$$

Combinando [6] a [10]):

$$Vr/vmed = \left\{ \left[k \Gamma(1 + 1/k) \right]^{-1} \left\{ \left[\ln(n) \right]^{1/k-1} \left\{ k \ln(n) - \ln[-\ln(1 - 1/Tr)] \right\} \right\} \right\} \quad [11]$$

2.4. Número de eventos independientes por año

En las expresiones [5] y [11] la relación de Vr a $vmed$ es función del parámetro de forma k de Weibull, del número de eventos independientes n y del período del retorno Tr .

La teoría del valor extremo considera que los extremos provienen de muestras de n observaciones independientes e idénticamente distribuidas, que se originan de una población a la que se le ajusta una función de distribución acumulada $F(x)$. Entonces el valor extremo tiene una distribución de probabilidad dada por $F^n(x)$.

Así, en el caso de velocidades del viento, si los valores promedio de 10 minutos (v) fueran

estadísticamente independientes de los promedios vecinos, entonces se esperaría que el valor extremo anual de la velocidad del viento tuviera una distribución de probabilidad dada por $[F(x)]^{52596}$, donde $F(x)$ es la distribución de Weibull, y 52596 es la cantidad de intervalos de 10 minutos en un año.

Esto no se observa en la práctica, porque los valores de 10 minutos adyacentes no son independientes. Castillo (1988) ha mostrado que los datos son estadísticamente estacionarios, y por lo tanto tienen un tiempo de correlación finito, τ , entonces, la distribución del valor extremo está dada por $F^n(x)$, donde $n \sim T/\tau$, si T es la longitud del registro (Harris, 1996). Bergström (1992) usa la función de autocorrelación $\rho(\tau)$ para determinar τ , donde τ es el lapso de tiempo con el cual se calcula la correlación. Si pusiéramos $\rho = 0,5$ y resolvemos para τ , la solución puede interpretarse como una medida del tiempo medio, en el cual la variable presenta una autocorrelación inferior a 0,5. La solución de este caso particular usando representación espectral (Rice, 1954) es:

$$v_T = \left[\int_{f_0}^{0.5/T} f^2 S_{uu}(f) df / \int_{f_0}^{0.5/T} S_{uu}(f) df \right]^{0.5} \quad [12]$$

donde $S_{uu}(f)$ es la función de densidad espectral, f la frecuencia y $v_T = 1/\tau$ es la frecuencia efectiva válida para el período T . El límite de la integración inferior, f_0 , puede escogerse alrededor de $1/(2.3600)$ Hz para eliminar la parte sinóptica del espectro (EWTS II, 1998). El número de observaciones independientes, promediado sobre un período de longitud T , dentro de un período de tiempo T_p (longitud de la muestra, generalmente 1 año), puede estimarse entonces de la relación:

$$n = v_T T_p \quad [13]$$

Bergström (1992) calculó la frecuencia efectiva v_T en $0,00073 \text{ seg}^{-1}$.

2.5 Estimación de la velocidad de referencia

Usando la expresión [5] o la [11], si Tr es 50 años, la proporción $Vref / vmed$ se calcula como una función del parámetro de forma k de Weibull y se

presenta en la Figura 1. En esta figura las curvas de las distribuciones [5] y [11] casi coinciden. Para determinar el número n de eventos independientes en un año se usa la frecuencia efectiva ν_T dada por Bergström (1992):

$$\left. \begin{aligned} \nu_T &= 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \\ T_p &= 3,1557610^7 \text{ s} \end{aligned} \right\} n = \nu_T T_p = 23037 \quad [14]$$

Esta estimación sugiere que la velocidad del viento ν presenta eventos independientes en promedio cada 5.760 minutos, es decir, cada 4 días.

Para los sitios en terrenos planos en latitudes medias el valor del parámetro k de Weibull varía típicamente entre 1,65 en áreas continentales, 1,9 en áreas costeras y 2,1 en el mar (Rohatgi y Nelson 1994).

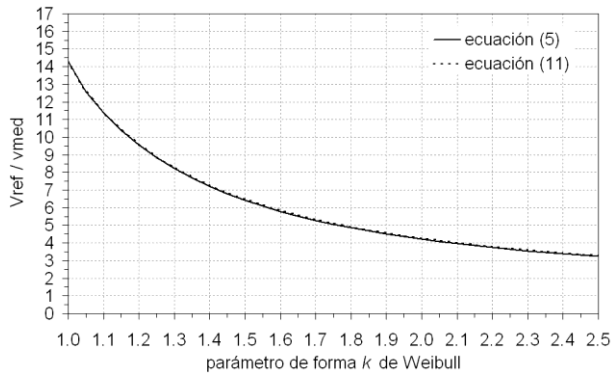


Figura 1: Relación V_{ref}/v_{med} en función del parámetro de forma k de Weibull.

La Figura 1 muestra que V_{ref}/v_{med} es menor o igual a 5 para $k > 1,77$, ya sea que se utilice la expresión [5] o la [11]. En latitudes medias la relación $V_{ref}/v_{med} = 5$ es aceptable para la mayoría de los sitios continentales con terrenos llanos, y es ligeramente conservador para terrenos planos en las áreas costeras.

2.6. Estimación de la velocidad de referencia según el método MIS

Otro modelo estadístico para estimar el valor extremo de ν es el de la tormenta independiente, MIS (Method of Independent Storms), que analiza

una serie temporal de máximos de tormentas. Este método incluye dos partes, la primera es la obtención de la sub-muestra de máximos independientes de las tormentas identificadas, y en segundo lugar el ajuste de la distribución de Gumbel a esos máximos (An y Pandey 2005).

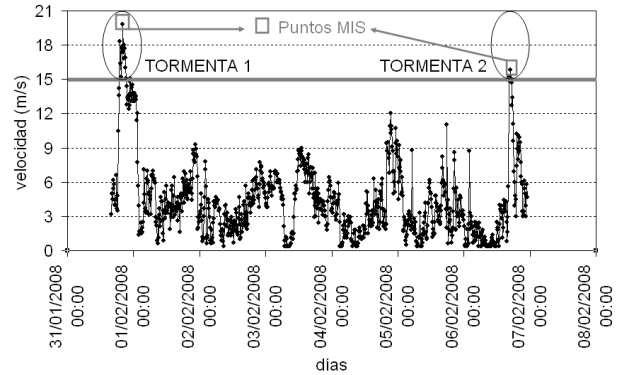


Figura 2: Concepto del método de la tormenta independiente (MIS) en una porción de la serie temporal de Chorriaca (Tabla II). Se han indicado los puntos que conforman la nueva submuestra de datos de tormentas.

Se ha considerado una tormenta de viento cuando la velocidad media, ν , supera 15 m/s y las tormentas están separadas al menos por 4 días. En la Figura 2 se ilustra el concepto del método MIS. Según la expresión [4] un período de retorno de 50 años se corresponde con una probabilidad de 0,98 de que ocurran valores extremos menores o iguales que V_{ref} .

Considerando que los máximos de las tormentas convergen a una distribución de Gumbel, una forma de estimar el valor extremo es a través de: $V = \{-\ln[-\ln(F(V))]/\alpha\} + \beta$, que es una forma linealizada de la expresión [6]. Si $F(V)$ es 0,98, entonces, V es la velocidad de referencia V_{refG} .

La expresión [6] se transforma a la forma lineal $Y_i = a + b X_i$, donde a y b se calculan mediante el método de cuadrados mínimos. La transformación se logra tomando logaritmo natural de la siguiente forma: $Y_i = \ln \{-\ln[F(V_i)]\}$; $X_i = V_i$, donde V_i es la velocidad en la clase i -ésima (marca de clase) y $F(V_i)$ es la frecuencia relativa acumulada de la velocidad V_i , calculada con los datos de la submuestra de los máximos de las tormentas independientes. La pendiente de la recta de

regresión es $b = -\alpha$ y la ordenada al origen es $a = -\alpha\beta$.

2.7. La fdp de la velocidad del viento u_T

Hasta aquí se ha estudiado la distribución de los valores extremos de datos cuyo intervalo de medición es 10 minutos (v). A partir de aquí se analiza la distribución de los valores extremos de velocidad del viento cuyo intervalo de medición es de 3 segundos. Como se ha mencionado en la Introducción, este valor extremo se refiere como la velocidad de supervivencia de los aerogeneradores ($Ve50$) o como la velocidad básica (Vb) en construcciones civiles.

La velocidad media en un intervalo de tiempo corto, T , es anotada como u_T . Se asume que u_T está normalmente distribuida alrededor del valor medio de 10 minutos, v , con desviación estándar σ_T . La fdp condicional de u_T dado v es:

$$f(u_T | v) = (\sigma_T \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-0,5(u_T - v/\sigma_T)^2\right] \quad [15]$$

Se asume que la fdp de v sigue una fdp de Weibull con parámetros de escala c y de forma k (expresión [1]).

Según la teoría de probabilidades la función de densidad condicional de Y dado X es:

$$f(y | x) = f(x, y) / f_x(x) \quad [16]$$

donde $f(x,y)$ es la fdp conjunta de X e Y , y $f_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy$ es la función de densidad marginal de X . Usando [16] se tiene:

$$f(u_T, v) = f(u_T | v) f(v) \quad [17]$$

con la que se halla:

$$f(u_T) = \int_0^{\infty} f(u_T, v) dv = \int_0^{\infty} N[u_T; v; \sigma_T(v)] \cdot W[v; c; k] dv \quad [18]$$

donde $N[u_T; v, \sigma_T(v)]$ y $W[v; c, k]$ son respectivamente las notaciones de la distribución

Normal y de la distribución de Weibull, y σ_T es la parte de la desviación estándar total, σ_u , que permanece después de haber aplicado un filtro paso bajo con un período T .

La relación $q_T = \sigma_T / \sigma_u$ puede calcularse (Bergström 1992) de:

$$q_T \approx \int_{f_0}^{0,5/T} S_{uu}(f) df / \int_{f_0}^{\infty} S_{uu}(f) df \quad [19]$$

El límite inferior de la integral f_0 puede escogerse aproximadamente $1/(2 \cdot 3600)$ Hz, para eliminar la componente sinóptica del espectro (EWTS II, 1998).

La desviación estándar, σ_u , es una variable aleatoria y se puede calcular según EWTS II como:

$$\sigma_u = v / \ln(z / z_0) \quad [20]$$

donde z_0 es la longitud de rugosidad; o utilizar la expresión dada por la norma IEC 61400-1:

$$\sigma_u = 1,2 I_{med} (0,75 v + 0,16 v_{med}) \quad [21]$$

donde I_{med} es la intensidad de turbulencia media anual, que se calcula de la relación entre la desviación estándar de la velocidad y la velocidad media obtenidas de registros meteorológicos.

Cuando se grafica la fdp $f(u_T)$ de u_T para turbinas eólicas (de gran potencia, clase I a IV) utilizando las expresiones [18] y [21] se observa que la distribución de u_T es similar a una distribución de Weibull presentando diferencias en las colas: la cola derecha más pronunciada y la izquierda en teoría se extiende a $-\infty$ (EWTS II, 1998).

2.8. La fda de los valores extremos de u_T

La función de la distribución acumulada (fda) de u_T está dada por:

$$F(u_T) = \int_{-\infty}^u \int_0^{\infty} \{N[u_T; v; \sigma_T(v)] W[v; c; k] dv du_T\} \quad [22]$$

Para n observaciones independientes, la distribución del valor extremo está dada por la distribución de orden n :

$$F_{X_{n:n}}(u_T) = F^n(u_T) \quad [23]$$

Una alternativa, en el cálculo de $F(u_T)$, aprovecha el hecho de que dos fda con la misma cola derecha, los mismos valores para el rango $(0,9; 1)$, y valores muy diferentes en el intervalo $(0; 0,9)$ tienen exactamente la misma distribución límite (máximo) (Castillo, 1988).

Teniendo en cuenta las características de la distribución de u_T es posible ajustar una distribución de Weibull a la cola derecha de $f(u_T)$. Los parámetros c y k de Weibull pueden ser usados para obtener el valor extremo de la distribución. Se obtiene un buen resultado con el cálculo exacto (ecuación [23]) si la cola derecha se toma en el rango $(0,9; 1)$ (EWTS II, 1998).

2.9. Estimación de $Ve50$

En las normas IEC 61400-1 la velocidad del viento promedio de 3 segundos extrema para un período de retorno medio de 50 años, $Ve50$, se calcula como:

$$Ve50 = 1,4 Vref \quad [24]$$

En EWTS II (1998) se define a $Ve50$ como el valor extremo anual de u_T (velocidad media cuyo intervalo de medición es de 3 segundos) con recurrencia de 50 años.

La Figura 3 muestra, para varios valores de $vmed$ y k , las estimaciones de $Ve50$ realizadas con las expresiones [11] y [24]. Con el propósito de compararlas, se incluyen en la Figura los valores calculados con las expresiones [2] y [24] para las cuatro clases de turbinas eólicas IEC, estos resultados también se presentan en la Tabla I.

CLASES	I	II	III	IV
Vref (m/s)	50	42,5	37,5	30
vmed (m/s)	10	8,5	7,5	6
Ve50 (m/s)	70	60	52,5	42

Tabla I: $Vref$, $vmed$ y $Ve50$ de las cuatro clases de turbinas eólicas definidas en la norma IEC 61400-1 (1994).

Se observa en la Figura 3 que los valores de $Ve50$ de la norma IEC 61400-1 son válidos para sitios donde $k > 1,7$ (EWTS II, 1998). Se acepta que los valores de la norma IEC son válidos para lugares de terreno plano ubicados en latitudes medias, mientras que para zonas de terreno complejo no son válidos puesto que $k < 1,4$.

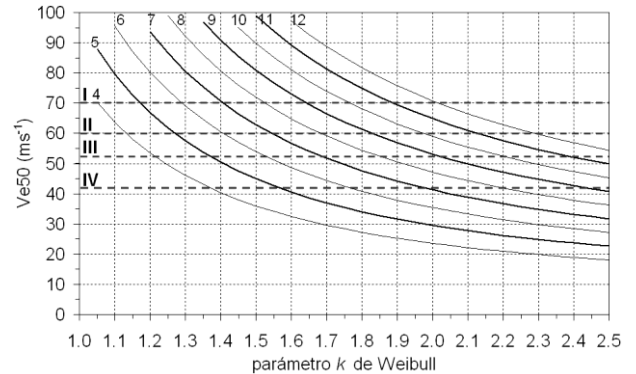


Figura 3: $Ve50$ ($\alpha = 0,02$) en función del parámetro de forma, k , de Weibull y el viento medio anual, $vmed$, variando entre 4 y 12 m/s.

3. RESULTADOS

3.1. Sitios analizados

En la Tabla II se indica la ubicación geográfica de 5 estaciones meteorológicas seleccionadas para aplicar en este trabajo.

Lugar		Lat. Sur	Long. Oeste	Alt. (m)	Período
Auq	A	37°19'06"	69°56'53"	1554	Abr/2008 Dic/2008
Bar	B	36°49'52"	69°54'19"	1212	Jun/2005 Feb/2006
Cho	C	37°55'57"	79°06'14"	1203	May/2005 Dic/2008
C Có	D	38°56'	69°15'	661	Ene/2000 Dic/2004
Cha	E	40°05'	71°08'	779	Jul/2000 Dic/2004

Tabla II: Estaciones meteorológicas.

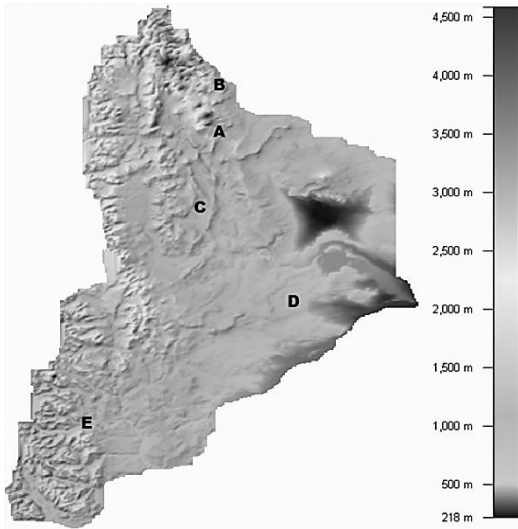


Figura 4: Mapa topográfico de la provincia de Neuquén con la ubicación de las estaciones meteorológicas.

Las series de datos de Auquinco (Auq), Barrancas (Bar) y Chorriaca (Cho) corresponden a mediciones efectuadas con estaciones meteorológicas automáticas, marca NRG System, con registros cada 10 minutos de la velocidad v , de la dirección prevaleciente, de la velocidad u_T y del desvío estándar de la velocidad en dicho intervalo, entre otros parámetros. Las mediciones de datos de 5 años de Cutral-Có (C C6) y de Chapelco (Cha) fueron obtenidas con estaciones meteorológicas convencionales, con observaciones de velocidad y dirección del viento horaria de las 09, 12, 15, 18 y 21 hora local en C C6; y datos horarios entre las 12 y 21 hora local en Cha. En todas las estaciones las mediciones de viento corresponden a una altura del sensor de 10 metros sobre el nivel del terreno. En la Figura 4 se observan sus posiciones en el mapa del relieve de la provincia de Neuquén.

En la Tabla III se muestra un resumen de los valores estadísticos de las series de viento analizadas. Todos los parámetros fueron calculados a partir de los registros disponibles. La Tabla III incluye la longitud de la muestra, T_p , la velocidad media del período, v_{med} , los parámetros de forma, k , y de escala, c , de la distribución de Weibull ajustada a la submuestra de datos sin considerar las calmas, utilizando el método de máxima

verosimilitud. Se utilizó este método debido a su mayor eficiencia (Seguro y Lambert, 2000). Se utilizaron las expresiones propuestas para datos agrupados:

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^m v_i^k (\ln v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^m v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^m (\ln v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right]^{-1} \quad [25]$$

$$c = \left[\frac{\sum_{i=1}^m v_i^k f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right]^{1/k} \quad [26]$$

donde v_i es la velocidad del viento v en la clase i -ésima (marca de clase); m es el número de intervalos de clase y $f(v_i)$ es la frecuencia relativa de la velocidad v_i . La ecuación [25] se resuelve en forma iterativa y una vez obtenido k el valor c se calcula en forma explícita de [26].

Lugar	Tp	vmed	Weibull		Nº t.	Gumbel	
			k	c		α	β
Auq	8 m	7,2	1,28	7,7	20	0,20	18,5
Bar	8 m	6,0	1,27	6,5	25	0,25	17,8
Cho	1 a	6,8	1,43	7,1	130	0,35	18,1
C C6	5 a	6,4	1,78	7,3	74	0,49	15,5
Cha	5 a	7,9	1,95	8,9	205	0,32	15,1

Tabla III: Resumen estadístico de las series. T_p , longitud del período; v_{med} , velocidad media del período T_p en m/s; k , parámetro de forma de Weibull; c , parámetro de escala de Weibull en m/s; $N^\circ t$, cantidad de tormentas de viento; α , parámetro de dispersión de Gumbel en m/s; y β , parámetro modal de Gumbel en m/s.

La sexta columna de la Tabla III muestra el número de tormentas de viento, $N^\circ t$, consideradas en los cálculos del método MIS. Las dos últimas columnas presentan los parámetros de dispersión, α , y modal, β , de la distribución de la submuestra de las tormentas de viento ajustada a la distribución teórica de Gumbel.

3.2. Valores extremos de v

La Tabla IV muestra los resultados obtenidos de la velocidad de referencia estimada según los distintos métodos presentados.

Se ha calculado el valor extremo de v con una recurrencia media de 50 años, V_{ref} , utilizando la expresión [2] sugerida en las Normas IEC 61400-1. La velocidad de referencia (V_{ref} , estimada con la expresión [11] o la Figura 1) que se refiere al modelo SG basada en la distribución de Weibull se expresa como V_{ref_W} , donde el subíndice W indica que ha sido calculada teniendo en cuenta el parámetro de forma k de la distribución de Weibull que se ajustó a las mediciones de viento del período disponible.

El valor extremo, V_{ref_G} , surge del ajuste de la expresión [6] a la sub-muestra de vientos máximos de las tormentas de la manera indicada en el punto 2.6.

Lugar	IEC 61400	EWTS II	MIS	v_x (m/s)
	V_{ref} (m/s)	V_{ref_W} (m/s)	V_{ref_G} (m/s)	
Auq	36,0	61,0	38,5	42,1
Bar	30,0	51,3	33,4	30,8
Cho	34,0	47,6	29,2	32,1
C Có	32,0	31,6	23,4	26,9
Cha	39,5	35,6	27,1	33,3

Tabla IV: velocidad de referencia, V_{ref} , según distintos métodos y la velocidad del viento máxima medida en los períodos disponibles de cada estación, v_x .

Es de hacer notar que los valores de V_{ref} se obtienen de la serie de datos de v , mientras que V según MIS se estima utilizando los valores extremos de v , considerando las tormentas de viento.

3.3. Valores extremos de u_T

En la Tabla V los cálculos de la columna Ve_{50} EWTS II se han obtenido utilizando la Figura 3, con los datos de k y v_{med} , de cada uno de los lugares estudiados, asumiendo que v_{med} de la Tabla III es la velocidad media anual.

También se ha extraído, mediante interpolación lineal, la Ve_{50} de la Figura 5 que presenta una sectorización de la Figura 27 Velocidad Básica que está incluida en el Reglamento CIRSOC 102 (año 2001).

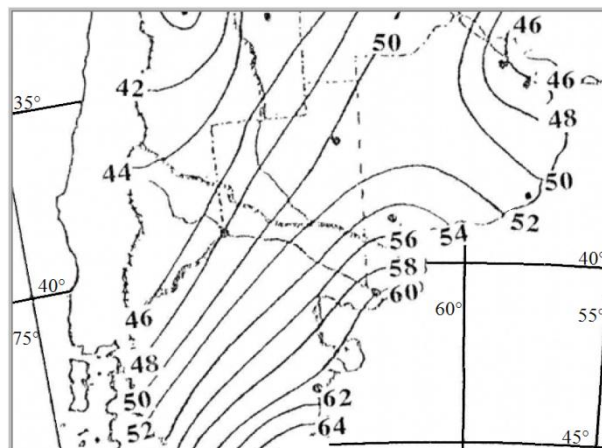


Figura 5: Sectorización del mapa de la Velocidad básica del viento en m/s a 10 m de altura sobre el terreno, extraída del Reglamento CIRSOC 102: Figuras – 27 (2001).

Lugar	IEC 61400	EWTS II	CIRSOC 102	$u_{T,x}$ (m/s)
	Ve_{50} (m/s)	Ve_{50} (m/s)	Ve_{50} (m/s)	
Auq	50,4	79	44,5	51,1
Bar	42	66	44	43,6
Cho	47,6	61	44	41,3
C Có	44,8	41	45	31,1
Cha	42,7	46	46	30,8

Tabla V: Ve_{50} , velocidad básica según distintos métodos. $u_{T,x}$ es el valor máximo medido en los períodos disponibles de cada estación

En la cuarta columna de la Tabla V se muestra el resultado de aplicar la metodología propuesta en la norma IEC 61400-1 (ecuación (24)) para el cálculo de la Ve_{50} . La última columna exhibe el registro máximo de $u_{T,x}$, medido en cada estación.

4. ANÁLISIS

4.1 Velocidad de referencia

En la Tabla IV la V_{ref} tiene diferencias para cada lugar y con cada método que se ha empleado para estimarla.

Se observa que los valores hallados con los métodos MIS e IEC 61400-1 presentan diferencias inferiores a 3,5 m/s en Auq y en Bar, y superior a 5 m/s en el resto de las estaciones, en Cha difieren 12,4 m/s. En las localidades en las que los parámetros k de Weibull son menores a 1,3 el método IEC 61400-1 otorga un valor inferior al método MIS, probablemente por el valor constante 5 utilizado para la relación entre la velocidad de referencia y la velocidad media (ver sección 2.1).

Las mayores diferencias entre las estimaciones EWTS II y las otras dos, se observan en las localidades en las que los parámetros k de Weibull son menores a 1,5 (tierras complejas). Pero también hay que considerar que Auq, Bar y Cho son las estaciones con menor longitud de registros.

Los máximos valores registrados que se incluyen en la Tabla IV que surgen de analizar los datos disponibles podrían ser superados en un período prolongado, por ejemplo, 50 años.

Sin embargo, en una comparación entre los resultados de los modelos y estos máximos medidos, los modelos no deberían subestimarlos.

No obstante, se observa que el método MIS, salvo en Bar, da resultados inferiores a lo medido. El método utilizado en IEC 61400-1 también subestima el máximo en Auq y Bar.

4.2 Velocidad básica

Las ráfagas extremas, velocidad máxima en un intervalo de 3 segundos, con un retorno medio de 50 años (Ve_{50}), se muestran en la Tabla V y se observa un comportamiento similar al de la velocidad de referencia: las velocidades obtenidas con los métodos CIRSOC 102 e IEC 61400-1 son parecidos en todas las localidades (diferencias inferiores 6 m/s).

Las mayores diferencias entre las estimaciones EWTS II y las otras dos, se observan en las localidades en las que los valores de k de Weibull son menores a 1,5.

Al igual que en el punto anterior los valores máximos de u_T registrados que se incluyen en la

última columna de la Tabla V, podrían ser superados en un período prolongado de, por ejemplo, 50 años.

En el caso de las ráfagas las estimaciones de todos los métodos dan valores superiores al valor medido o con diferencias despreciables. La única excepción la constituye Auquingo en la que el método CIRSOC 102 subestima el valor (diferencia porcentual de 13 %). Este hecho se puede deber a que las mediciones corresponden a un área de terreno complejo que se encuentra cercano al Volcán Tromen. En las normas CIRSOC 102 se explicita que cuando el terreno tiene algún grado de complejidad se deben realizar estudios del sitio.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los estudios de valoración eólica de sitios previos a la instalación de un parque eólico no pueden esperar 20 ó 30 años de datos de vientos del lugar, pues no serían rentables, a lo sumo, se toman entre 8 meses y un año de información.

Esto lleva a una complicación puesto que al aplicar los métodos de análisis de valores extremos se deben analizar datos independientes, por eso se consideran generalmente los máximos anuales que garantizan este criterio, pero se extiende el período de información necesario. Por ello se utilizan métodos alternativos como el del análisis de los picos sobre un valor umbral de velocidad de tormentas de viento independientes (MIS).

Los métodos probabilísticos para determinar los extremos a partir de series cortas de vientos aún están en discusión.

La metodología propuesta en las normas EWTS II que se vale de la ecuación [11] para el cálculo de V_{ref} y de la Figura 3 para el cálculo de Ve_{50} son los que se utilizan en la evaluación eólica de sitios y en estudios de factibilidad de diseño e instalación de parques eólicos. Con esta información de extremos se toma la decisión del tipo de turbina a instalar en un determinado lugar.

Los valores extremos estimados según estas normas no subestiman en ninguna estación las mediciones disponibles, tanto sea en el cálculo de V_{ref} como de Ve_{50} . Además, en las 3 estaciones ubicadas en terreno complejo no parecen excesivos los extremos hallados puesto que se ha medido, en sólo 8 meses, vientos máximos de 42,1 m/s con ráfagas máximas de 51,1 m/s.

Las menores diferencias entre las estimaciones

EWTS II y las otras, tanto en el valor de V_{ref} como en el de V_{e50} , se observan en las localidades con mayor cantidad de registros (5 años).

Surge como conclusión de este trabajo que hay dos factores que intervienen en las estimaciones: uno es el parámetro de forma, k , de Weibull que su valor depende del tipo de complejidad del terreno; y otro es la longitud, T_p , de los registros disponibles para llevar adelante los análisis.

Agradecimientos: Este trabajo se realizó con un subsidio de la Secretaría de Investigación de la Universidad Nacional del Comahue, y un Convenio de trabajo entre el Ente Provincial de Energía del Neuquén y el Departamento de Mecánica Aplicada de dicha Universidad. Los autores queremos agradecer a los revisores quienes con sus comentarios y sugerencias han mejorado este manuscrito.

REFERENCIAS

- An Y. y Pandey M.D., 2005. A comparison of methods of extreme wind speed estimation. *J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 93, 535–545.
- Bergström H., 1992. Distribution of Extreme Wind Speed. *Wind Energy Report WE 92:2*, Uppsala University, Department of Meteorology, Uppsala, Sweden.
- Castillo E., 1988. *Extreme Value Theory in Engineering (Statistical Modeling and Decision Science)*. Academic Press, 389 págs. ISBN-10:0121634752.
- CIRSOC (Centro de Investigaciones de los Reglamentos nacionales de Seguridad para las Obras Civiles), 2001. Proyecto de Reglamento CIRSOC 102: Acción del Viento sobre las Construcciones.
- EWTS II (European Wind Turbine Standards II), 1998. Published by ECN (Energieonderzoek Centrum Nederland) Solar & Wind Energy, Petten, The Netherlands.
- Harris R.I., 1996. Gumbel revisited: a new look at extreme value statistics applied to wind speeds. *J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 59 (1), 1–22.
- IEC (International Electrotechnical Commission); International Standard IEC 61400-1, 1994. *Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements*, First Edition.
- Rice S.O., 1954. *Mathematical Analysis of Random Noise*. *Bell System Tech. J.*, 23, 282–332, 1944, y 24, 46–156, 1945, ambos reimpresos en N. Wax (ed.), *Selected Papers on Noise and Stochastic Processes*, Dover, New York.
- Rohatgi J. y Nelson V., 1994. *Wind Characteristics: An analysis for the generation of wind power*, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 239págs. ISBN-100808714783.
- Seguro J.V. y Lambert T.W., 2000. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis. *J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 85, 75–84.