

## MODELADO A MICROESCALA DE VARIABLES EÓLICAS PARA BANCO DE ENSAYOS EÓLICOS EN NEUQUÉN

Claudia Palese<sup>a</sup>, Carlos V. Labriola<sup>b</sup>, Jorge L. Lassig<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Grupo de Ingeniería del Viento, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue Buenos Aires 1400, Q8300IBX, Neuquén, Argentina, claudia.palese@fain.uncoma.edu.ar*

<sup>b</sup> *Grupo de Energía y Sustentabilidad, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue Buenos Aires 1400, Q8300IBX, Neuquén, Argentina, carloslabriola54@yahoo.com.ar*

**Palabras clave:** modelado del viento, microescala, energía eólica, banco de ensayos eólicos, central eléctrica escuela a partir de recursos renovables combinados.

**Resumen.** En el contexto del uso racional de la energía y sustentabilidad energética aplicados en una primera etapa para los edificios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue se desarrolla el proyecto de una Central Eléctrica Escuela a partir de Recursos Renovables Combinados para abastecimiento del 70% de la potencia contratada y el 95% de la energía consumida por la FIUNCo. En dicho proyecto la primera etapa de instalación comprende a la generación eólica. En el presente trabajo se caracterizan las condiciones del viento para el sitio donde se instalará el aerogenerador en el predio de la Universidad de acuerdo a sus particularidades geofísicas. Para este estudio a microescala se utilizan los resultados de un modelo diagnóstico de conservación de la masa. Se han obtenido valores medios anuales en general y por cada una de las direcciones del viento a 10 m, 30 m y 50 m de altura. Se establece la dirección más energética del viento, la velocidad media, los parámetros de la distribución de Weibull y la densidad de potencia. Se calculan las velocidades extremas con períodos de retorno de 50 años. Se comparan los resultados con valores medios medidos en la zona observándose una adecuada correspondencia en los valores medios, mientras que los extremos son subestimados. Los resultados obtenidos orientan el proyecto a la instalación de convertidores eólicos de hasta 50kW con dos líneas de trabajo diferenciadas por la solución tecnológica de cada una: convertidores eólicos de eje horizontal con control por entrada en pérdida aerodinámica (control stall) y convertidores eólicos de eje vertical (tipo Darrieus) con control aerodinámico de frenado.

## **1 INTRODUCTION**

En el ámbito de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Comahue (FIUNCo) se está concretando un banco de ensayos para turbinas eólicas para ser utilizadas en el proyecto de una Central Eléctrica Escuela a partir de Recursos Renovables Combinados (CEERRC) para abastecimiento del 70% de la potencia contratada y el 95% de la energía consumida por la FIUNCo.

El proyecto está a cargo del Grupo de Energía y Sustentabilidad (GES) pero contribuyen el Grupo de Ingeniería del Viento (GIV) y el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (LAMHI) integrados en el Centro de Estudios de Aplicaciones de Fuentes de Energía Renovable (CEAFER).

La CEERRC se enmarca en el contexto de uso racional de la energía y sustentabilidad energética aplicados en una primera instancia para los edificios de la FIUNCo.

En la primera etapa se propone la instalación correspondiente a la generación eólica, luego se instalará la de generación hidráulica y por último la de generación térmica a base de biogás y biodiesel.

Respecto del subproyecto eólico se disponen de datos de variables a macroescala de estudios anteriores (Barros, 1983; Palese y otros, 2007, 2009), sin embargo, se necesitan conocer las características del viento en el predio de la UNCo debido a las particularidades orográficas y de rugosidad superficial del terreno.

Dado que no se disponen de mediciones del viento en el lugar donde se instalará el aerogenerador (AEG) el objetivo de este trabajo es realizar una evaluación del recurso eólico en el sitio utilizando un modelo de flujo de aire.

Con posterioridad y sobre la base de los resultados de este trabajo se podrá determinar la tecnología más apropiada para aprovechar al máximo el potencial eólico disponible.

## **2 METODOLOGÍA**

El lugar de estudio se ubica en 38,939° latitud Sur, 68,055° longitud Oeste y está a una elevación de 336 m sobre el nivel medio del mar.

El dominio de análisis en este trabajo corresponde a la zona de bardas ubicada al norte de la ciudad de Neuquén. Ésta presenta vegetación arbustiva típica de la meseta patagónica que deja abundante suelo desnudo. Este tipo de cobertura produce baja rugosidad aerodinámica superficial,  $z_0$ , siendo la del área igual a 0,05 m.

En la Figura 1 se observa dentro de las instalaciones de la UNCo el emplazamiento que tendrá el aerogenerador.



Figura 1: Escena del satélite Ikonos del asentamiento de la UNCo en la que se señalan las localizaciones de la Facultad de Ingeniería de la UNCo (FIUNCo) y la del aerogenerador (AEG). Imagen: Google Earth.

En el diseño de la central eólica se estudia el régimen de viento para valorar el recurso potencial y las cargas para consideraciones de seguridad.

Por lo tanto, se analizan dos aspectos: las características generales del viento que ocurrirán durante la operación normal de la turbina eólica; y las condiciones de vientos extremos.

## 2.1 Características generales del viento en el sitio

Para la valoración del recurso eólico de un lugar frecuentemente se utilizan modelos de flujo de aire (Potts y otros, 2001; Tammelin, 1991; Reid, 1997; Frank y Landberg, 1997). Se han desarrollado varios modelos y en Rohatgi y Vaughn (1994) se describen algunos de ellos. Éstos son especialmente útiles en regiones donde la red de estaciones meteorológicas tiene baja densidad.

En este trabajo las características generales del recurso eólico en el sitio se establecen mediante un modelo de diagnóstico que satisface la ecuación de continuidad llamado ArgentinaMap. Una descripción puede encontrarse en Lassig y Palese (2011).

El modelo utilizado representa la circulación en las capas bajas de la atmósfera simulando los efectos orográficos, de rugosidad y de la estabilidad térmica vertical en los vientos locales que son conducidos por el flujo de escala sinóptica.

El dominio corresponde a una zona más grande que el predio de la FIUNCo, en la que están incluidos el sitio de interés y la estación meteorológica principal. La ejecución del programa se efectúa mediante la integración de los siguientes datos:

- ✓ Mapa digital de elevación del terreno: en la Figura 2 se presenta el mapa de la elevación del terreno. Fue construido con los datos Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) extraídos del sitio Web del US Geological Survey. La resolución espacial en ambas direcciones horizontales es de 93 m.

- ✓ Mapa digital medio anual de la longitud de rugosidad de la superficie: en la Figura 3 se muestra el mapa de la longitud de rugosidad. En Palese y otros (2008) se indica la metodología indirecta utilizada en su preparación. La resolución espacial en ambas direcciones horizontales es de 93 m.

- ✓ Datos medidos del viento de superficie: se utilizaron los datos de velocidad y dirección del viento de tres estaciones meteorológicas, una es la instalada en el Aeropuerto de la ciudad (Neuquén Aero). Esta estación es del tipo sinóptica principal con observaciones

convencionales del viento a 10 metros de altura sobre el suelo, en promedios de 10 minutos, cada una hora, las 24 horas del día. Se contó con 10 años de datos horarios del período comprendido entre el 01/Ene/1995 hasta el 31/Dic/2004. También se utilizaron los datos de estaciones meteorológicas automáticas instaladas en Agua del Cajón y en Mari Menuco que no están dentro del dominio del modelo. En la Tabla 1 se muestra la información correspondiente. El modelo utiliza los vientos de superficie para calcular el campo inicial de vientos a lo largo del dominio, para ello realiza el promedio ponderado de los datos. La ponderación puede ser una constante (promedio de los datos disponibles) o proporcional a la inversa de la distancia al cuadrado de cada estación.

✓ Datos medios anuales de velocidad y dirección del viento de altura: los vientos de altura (viento geostrófico) se utilizan para calcular el campo inicial de vientos a lo largo del dominio desde el tope de la capa límite atmosférica hasta el nivel con dato de viento geostrófico más bajo ingresado, asumiendo una variación lineal dada por el incremento de la velocidad con la altura en la atmósfera libre superior. También entre el tope de la capa de superficie y el tope de la capa límite atmosférica el modelo asume una interpolación utilizando el viento geostrófico. Se usaron los datos del sistema Global Data Assimilation System (GDAS/NOAA). Se recopilieron 5 años de información (Abr/2000 a Mar/2005), de las 3, 9, 15 y 21 horas, de las alturas de 1.490 m, 3.072 m y 5.685 m.

✓ Estructura vertical media anual de la capa límite atmosférica: los requerimientos respecto de las condiciones y características de la capa límite atmosférica con valores locales, se calcularon mediante los datos GDAS/NOAA del año 2004, de las 3, 9, 15 y 21 horas. Del análisis de estos datos se estableció que la capa límite atmosférica tiene, en promedio anual, un espesor de 693 m. La capa de superficie tiene una profundidad de 180 m. Los casos cercanos a la neutralidad atmosférica tienen la más alta ocurrencia anual.

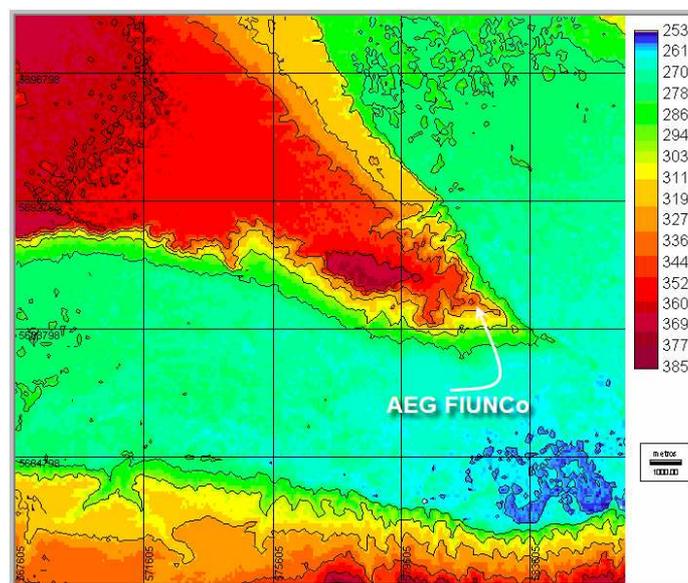


Figura 2: Mapa digital de elevación (m).

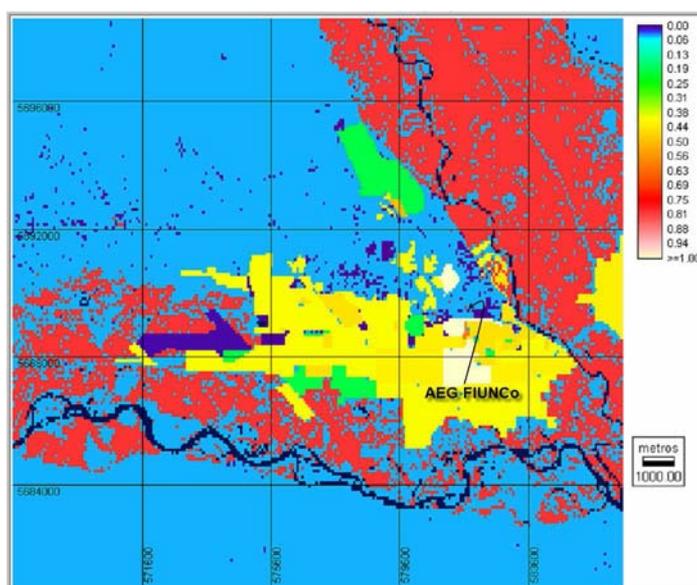


Figura 3: Mapa medio anual de la longitud de rugosidad aerodinámica superficial ( $z_0$ ) de la ciudad de Neuquén y alrededores.

	<b>Neuquén Aero</b>	<b>Agua del Cajón</b>	<b>Mari Menuco</b>
Altura Sensor	10,0 m	2,5 m	4,0 m
Latitud	S 38° 57'	S 38° 56'	S 38° 32'
Longitud	O 68° 08'	O 68° 21'	O 68° 33'
Elevación snmm	271 m	307 m	416 m
Período	01/01/1995 a 31/12/2004	30/10/2000 a 26/07/2004	03/07/1996 a 30/06/1997
Intervalo Medición	1 hora	15 minutos	15 minutos
Fuente	SMN	CAPEX	LISAMET

Tabla 1: Estaciones de medición con las que se elaboraron los mapas de velocidad del viento a 10, 30 y 50 m de altura. Ubicación de los sensores, posición geográfica, longitud de las series de datos e intervalo de medición.

SMN: Servicio Meteorológico Nacional; LISAMET: Laboratorio de Imágenes Satelitales Meteorológicas (FIUNCo); CAPEX: Central Térmica Capex.

Los productos del programa son los campos de la velocidad media y de la densidad de potencia eólica (Ec. (1)), en ambos casos valores medios anuales. También se obtienen los datos de la distribución de frecuencias de la dirección, la velocidad media (velocidades mayores que 0 m/s) y el parámetro de forma de la distribución de Weibull (Ec. (2)) en forma direccional, es decir, por cada uno de los rumbos analizados en todo el dominio.

Se calcularon los mapas a 10, 30 y 50 metros de altura sobre el nivel del suelo. Se determina el exponente,  $p$ , de la ley de la potencia (Sutton, 1953) que describe la variación de la velocidad del viento con la altura dentro de la capa límite atmosférica (Ec. (3)):

$$Pot = \sum_0^{\infty} (1/2 \rho f(v) v^3) \quad (1)$$

donde  $Pot$  es la densidad de potencia,  $\rho$  es la densidad del aire,  $f(v)$  es la función de densidad de probabilidad de Weibull de la velocidad del viento  $v$ .

La función de densidad de probabilidad de Weibull es:

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{(k-1)} \exp(-(v/c)^k) \quad (2)$$

donde  $c$  y  $k$  son los parámetros de escala y de forma, respectivamente. La Ec. (2) está

definida para valores de  $v$ ,  $k$  y  $c > 0$ .

$$v_2 = v_1 (h_2 / h_1)^p \quad (3)$$

donde  $v_i$  es la velocidad del viento a la altura  $h_i$  y  $p$  es el exponente que se toma constante con la altura para un cierto rango de alturas. La velocidad  $u_1$  y la altura  $h_1$  son conocidas y se toman como referencia. El exponente  $p$  también es llamado coeficiente de la cortante del viento.

## 2.2 Características de vientos extremos en el sitio

Las condiciones de vientos extremos se determinan con la velocidad extrema,  $V_r$ , que se define como la velocidad del viento extrema anual, que tiene un período de retorno de 50 años (límite de confianza de 98%); con la velocidad de ráfaga de 3 segundos,  $V_{e50}$ , que tiene un período de retorno de 50 años; y con la variación angular de la dirección en un período corto durante los eventos de tormentas de viento.

Para este análisis se consideran dos tipos de velocidades: una que surge del promedio de la velocidad considerando un intervalo de medición de 10 minutos,  $v$ , y otra que también es un valor medio pero de un intervalo de medición más corto de 3 segundos,  $u_T$ , que es llamada ráfaga.

Con el primero se establece la velocidad media anual de la submuestra sin las calmas,  $v_{med}$ , y el valor extremo anual,  $V_r$ ; y con el segundo el extremo anual  $V_{e50}$ .

En la norma de la International Electrotechnical Commission, International Standard Nro. 61400-1 (IEC-61400-1) (IEC, 1994) 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*).

La proporción entre la velocidad  $V_r$  y la velocidad media anual de la submuestra sin las calmas ( $v_{med}$ ) es constante para las distintas clases de aerogeneradores y lugares:

$$V_r / v_{med} = 5 \quad (4)$$

Este valor es el resultado de efectuar un análisis con el modelo de extremos de Gumbel ajustado a la distribución de probabilidad de la muestra de máximos anuales de mediciones de la velocidad del viento por períodos prolongados (varias décadas).

Las normas European Wind Turbine Standards II (EWTS II, 1998) proponen utilizar la distribución Fisher-Tippett 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. En este caso la relación se establece como:

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

donde  $n$  es el número de eventos independientes en el año y se estima que tiene el valor 23.037, con lo que la velocidad del viento  $v$  presenta eventos independientes en promedio cada 5.760 minutos, es decir, cada 4 días.  $Tr$  es el período de retorno (50 años).

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). Por lo tanto, se hallan valores  $V_r / v_{med}$  menores o iguales a 5 para sitios con  $k > 1,77$  y superiores a 5 en sitios donde  $k < 1,77$ .

Se analizan en este trabajo los valores extremos de velocidad del viento cuyo intervalo de medición es de 3 segundos. Este valor extremo se refiere, a veces, como la velocidad de supervivencia de los aerogeneradores ( $Ve50$ ) o como la velocidad básica ( $Vb$ ) en normas de construcciones civiles.

Las normas IEC 61400-1 definen la velocidad del viento promedio de 3 segundos (ráfaga) extrema anual que tiene un período de retorno medio de 50 años,  $Ve50$ , como:

$$Ve50 = 1,4 Vr \quad (6)$$

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, ráfaga) con recurrencia de 50 años. Se asume que  $u_T$  está normalmente distribuida alrededor del valor medio de 10 minutos,  $v$ , con desviación estándar  $\sigma_T$ . La función de densidad de probabilidad condicional de  $u_T$  dado  $v$  es:

$$f(u_T | v) = (\sigma_T \sqrt{2\pi})^{-1} \exp\left[-0,5(u_T - v/\sigma_T)^2\right] \quad (7)$$

Se asume que la función de densidad de probabilidad de  $v$  sigue la distribución de Weibull de la Ec. (2). La función de densidad de probabilidad de  $u_T$  es:

$$f(u_T) = \int_0^{\infty} N[u_T; v; \sigma_T(v)] \cdot W[v; c; k] dv \quad (8)$$

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. 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 anual de las ráfagas (EWTS II, 1998). Se realizan las estimaciones de  $Ve50$  utilizando la Ec. (6) y la Ec. (8).

En este trabajo se utilizan los valores  $v_{med}$  y  $k$  para el cálculo de los dos tipos de valores extremos que se obtienen como resultado de la aplicación del modelo de flujo de aire en el sitio donde se instalará el AEG de la Central Eléctrica Escuela.

### 3 RESULTADOS

El mapa de velocidades del viento media anual a 10 metros de altura sobre el suelo de la Figura 4 corresponde a una sectorización de la zona de interés. Se observa que, como es de esperar, las velocidades más altas se producen en las zonas más elevadas y expuestas. En el sitio de instalación del aerogenerador (AEG) la velocidad media anual es 4,0 m/s.

El mapa de la densidad de potencia, o potencia meteorológica disponible a 10 metros de altura sobre el suelo se presenta en la Figura 5. En el sitio de instalación del aerogenerador (AEG) la densidad de potencia media anual es 94,0 Watt/m<sup>2</sup>.

Estos resultados se consideran una buena aproximación al patrón climático de viento debido a que se han utilizado 10 años de datos horarios de la estación Neuquén Aero, además, las otras series si bien son de períodos más cortos, representan adecuadamente el régimen general de vientos de la zona de acuerdo a lo analizado en Palese y otros (2011).

La determinación del ajuste logrado por el modelo se realiza con el cálculo de errores y del coeficiente de correlación lineal entre las velocidades medidas y las calculadas en la posición correspondiente a la estación Neuquén Aero. La diferencia entre el valor modelado y el medido de la velocidad media anual es 0,02 m/s (0,8 %). El análisis direccional del valor absoluto del error relativo porcentual calculado según la Ec. (9) se presenta en la Figura 6. Los errores más frecuentes son menores a 5 %. En 60° y 240° la velocidad medida es subestimada

13 % por el modelo.

$$\text{error relativo} = (v_E - v_O)/v_O \quad (9)$$

donde el subíndice  $E$  es la velocidad estimada por el modelo y el subíndice  $O$  corresponde al valor de velocidad medido.

En la Figura 7 se observa que la nube de puntos tiene poca dispersión, el coeficiente de correlación lineal,  $R^2$ , es 0,89. Se concluye que hay adecuada concordancia entre lo medido y los resultados del modelo.

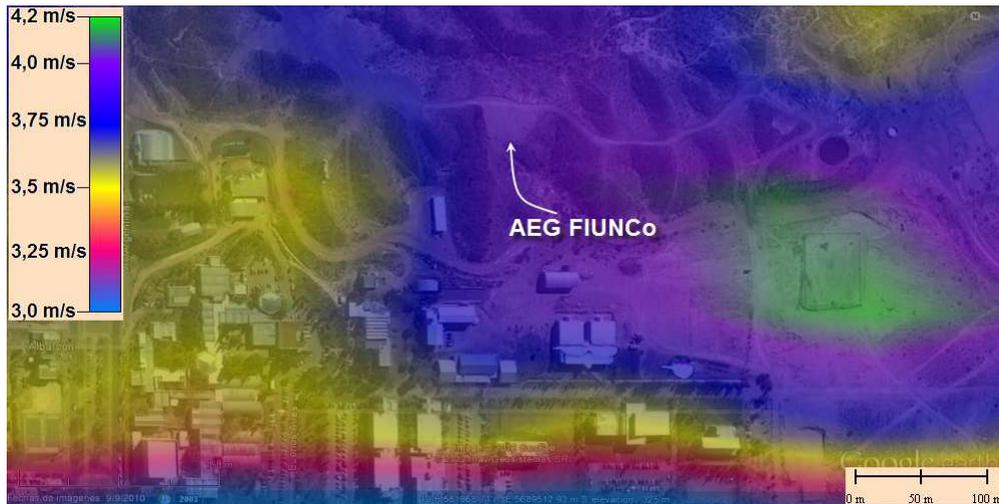


Figura 4: Velocidad media anual del viento a 10 m de altura sobre el nivel del suelo. Resolución espacial en ambas direcciones horizontales 93 m. Imagen de fondo: Google Earth.



Figura 5: Densidad de potencia media anual del viento a 10 m de altura sobre el nivel del suelo. Resolución espacial en ambas direcciones horizontales 93 m. Imagen de fondo: Google Earth.

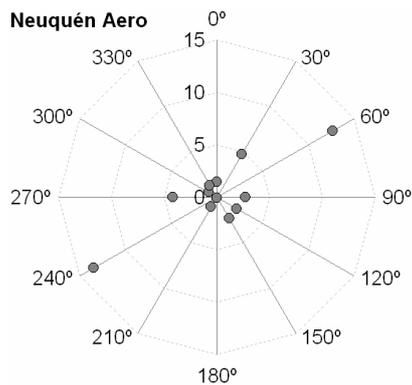


Figura 6: Valor absoluto de los errores porcentuales calculados entre las velocidades modeladas y las medidas en Neuquén Aero.

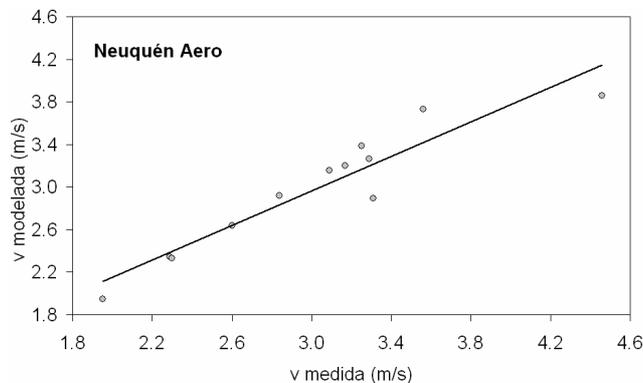


Figura 7: Velocidad media anual por dirección medida vs. velocidad media anual modelada, a la altura de medición y ajuste lineal de los datos de Neuquén Aero.

La distribución de frecuencias de la velocidad del viento utilizada en las evaluaciones del recurso eólico consideran solamente los casos en que dicha velocidad es mayor que cero, es decir, que no están incluidas las calmas. Los parámetros de la distribución de Weibull (Ec. (2)) estimados con el modelo se presentan en la Tabla 2. Corresponden a los valores medios anuales por alturas de todas las direcciones. Además, se agregan la velocidad media  $v_{med}$  ( $v > 0$ ) y la densidad de potencia.

La Tabla 3 muestra los resultados en forma direccional. Se observa que los vientos provenientes del SO son los más frecuentes (26,6 %). Entre el SSO (210°) y el OSO (240°) suman 42 %. El porcentaje de calmas medio anual es 3 %. La velocidad media anual por dirección (Tabla 3) varía entre 6,0 m/s (10 m) y 6,8 m/s (50 m) en la dirección 240°.

La menor ocurrencia es de vientos del sector S (2,8 %). Los vientos más débiles provienen de NNO (330°), las velocidades varían de 2,8 a 3,6 m/s entre 10 y 50 m de altura.

El factor de escala,  $c$ , está positivamente correlacionado con la velocidad, por lo tanto, sigue el patrón descrito en el párrafo anterior. En la dirección de mayor velocidad  $c$  varía entre 6,8 m/s (10 m) y 7,7 m/s (50 m).

El valor medio anual del factor de forma,  $k$ , es mayor en el sector E, en 60°, 90° y 120° supera el valor 2,0. Esta característica indica menor dispersión de los datos de velocidad, opuestamente, en el sector O son menores, que indica mayor dispersión o desvío estándar de los datos de velocidad.

La diferencia entre la densidad de potencia a 10 y a 50 m de altura representa aproximadamente 30 % (Tabla 2). Los vientos de los 240° son los de mayor potencia

meteorológica con 33,9 a 49,35 Watt/m<sup>2</sup>, entre 10 y 50 m de altura, respectivamente, como se aprecia en la Tabla 4. Los vientos del sector SO (210° y 240°) tienen más del 68 % de la potencia disponible, es decir, son los más energéticos.

La Figura 8 presenta la distribución de densidad de potencia versus la velocidad del viento en las tres altura. Se observa que vientos entre 7 y 9 m/s, según la altura, son los que producen mayor potencia.

	<i>vmed</i> (m/s)	<i>k</i> (adim.)	<i>c</i> (m/s)	<i>Pot</i> (W/m <sup>2</sup> )
10	4,5	1,9	5,1	94,4
30	4,8	1,9	5,4	116,1
50	5	1,9	5,6	131,0

Tabla 2: Valores medios anuales por altura considerando todas las direcciones estimados con el modelo en el sitio de estudio.

Dirección (°)	<i>frec.</i> (%)	<i>k</i> (adim.)	<i>c</i> (m/s)			<i>v</i> (m/s)		
			10 m	30 m	50 m	10 m	30 m	50 m
0	6,6	1,80	3,5	4,2	4,4	3,1	3,7	3,9
30	5,8	1,84	5,1	5,9	6,2	4,5	5,2	5,5
60	10,2	2,02	4,7	5,0	5,2	4,2	4,4	4,6
90	5,6	2,12	3,7	4,4	4,6	3,3	3,9	4,1
120	5,6	2,17	3,8	4,5	4,9	3,4	4,0	4,3
150	4,5	1,93	3,9	3,9	4,1	3,5	3,5	3,6
180	2,8	1,92	3,7	3,5	3,5	3,3	3,1	3,1
210	14,9	1,77	6,3	6,0	6,0	5,6	5,3	5,3
240	26,6	1,93	6,8	7,3	7,7	6,0	6,5	6,8
270	5,5	1,84	4,6	5,3	5,6	4,1	4,7	5,0
300	3,5	1,67	4,4	5,3	5,6	3,9	4,7	5,0
330	5,8	1,79	3,1	3,8	4,0	2,8	3,4	3,6

Tabla 3: Valores medios anuales por dirección estimados por el modelo en el sitio.

Dirección (°)	<i>Pot</i> (Watt/m <sup>2</sup> )		
	10 m	30 m	50 m
0	1,16	1,97	2,31
30	3,12	4,81	5,69
60	4,46	5,13	5,86
90	1,19	1,96	2,28
120	1,30	2,11	2,63
150	1,14	1,14	1,24
180	0,59	0,49	0,49
210	15,44	13,09	13,09
240	33,90	43,10	49,35
270	2,24	3,37	4,06
300	1,22	2,14	2,58
330	0,75	1,34	1,60

Tabla 4: Valores medios anuales por dirección de la densidad de potencia estimada en el sitio.

El perfil vertical de velocidades medio anual hasta los 100 metros de altura se muestra en la Figura 9. Se utilizó la distribución vertical de la velocidad de la Ec. (3). Se toma como

exponente,  $p$ , de la ley de la potencia el valor 0,06 que se considera constante entre 10 y 50 m de altura. Este valor fue calculado de una expresión derivada de la Ec. (3) tomando logaritmos de ambos lados de la igualdad (el subíndice 1 indica el valor a 10 m y el subíndice 2 el valor a 50 m).

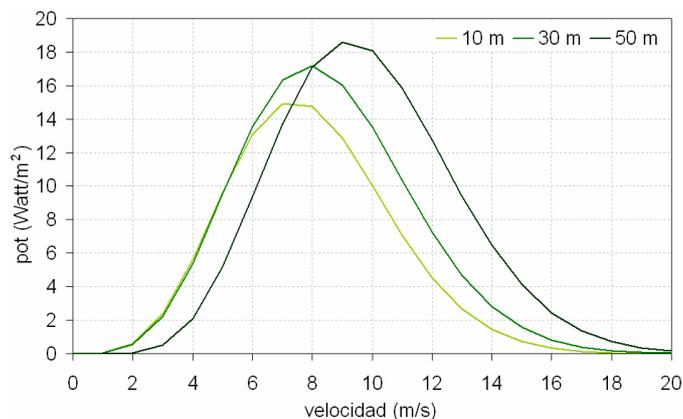


Figura 8: Variación de la densidad de potencia en función de la velocidad a 10, 30 y 50 m de altura sobre el nivel del suelo.

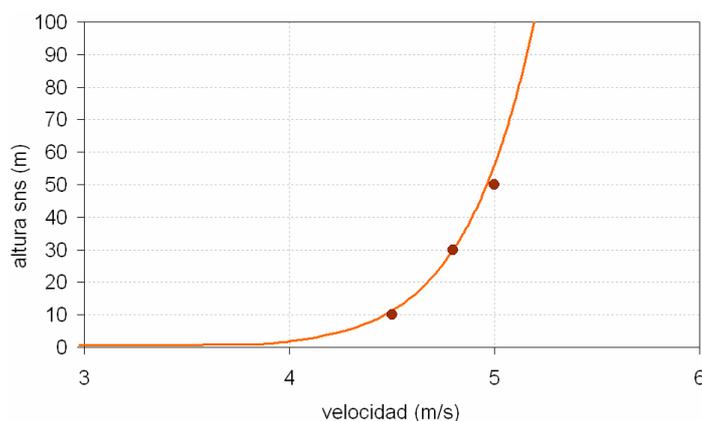


Figura 9: Perfil de la velocidad del viento hasta 100 m de altura sobre el suelo en el sitio.

Las velocidades extremas anuales se han estimado en el lugar donde se instalará el AEG con los datos que son producto de la aplicación del modelo de flujo de aire y que están incluidos en la Tabla 2.

Las velocidades extremas anuales  $V_r$  entre 10 y 50 m de altura estimadas según IEC 61400-1 varían entre 22,5 m/s y 25,0 m/s entre 10 m y 50 m de altura y según EWTS II varían entre 20,3 m/s y 22,6 m/s. Estos resultados se observan en la Tabla 5. Las velocidades calculadas con EWTS II son inferiores debido a que la estimación del parámetro de forma,  $k$ , del lugar es 1,9 (adimensional) por lo tanto la relación  $V_r/v_{med}$  es menor que 5.

Con la finalidad de comparar con mediciones se ha incluido en la tabla los datos que corresponden al período 1995/2004 de Neuquén Aero que dista 8 km hacia el oeste. Se observa que las normas subestiman el valor medido.

En la Tabla 5 se muestran también las velocidades extremas de ráfaga  $V_{e50}$  según IEC 61400-1 que varían entre 31,5 m/s y 35,0 m/s y según EWTS II que varían entre 28,4 m/s y 31,6 m/s.

En cuanto a la velocidad de ráfaga máxima medida en Neuquén Aero hay registros que

superan el valor  $u_{7x}$  de 28,3 m/s del período 1995/2004, por ejemplo, se midió 39,2 m/s en Oct/1988 y 47,8 m/s en Dic/1957.

Los máximos valores registrados que se incluyen en la tabla, que surgen de analizar los datos utilizados para ejecutar el modelo de flujo de aire (1995/2004), podrían ser superados en un período prolongado de, por ejemplo, 50 años. Sin embargo, en una comparación entre los resultados de los modelos y esos máximos medidos, los modelos no deberían subestimarlos (Lassig y otros,2011).

	<b>Vr (m/s)</b>			<b>Ve50 (m/s)</b>		
	IEC 61400-1	EWTS II	$v_x$	IEC 61400-1	EWTS II	$u_{7x}$
10 m	22,5	20,3	25,3	31,5	28,4	28,3
30 m	24,0	21,7	-	33,6	30,3	-
50 m	25,0	22,6	-	35,0	31,6	-

Tabla 5: Velocidades extremas calculadas con los resultados del modelo de flujo de aire y datos medidos en la estación meteorológica Neuquén Aero.

En un estudio previo (Lassig, 1995) se analizó la variación de la dirección del viento que se produce dentro de un período de 10 minutos, a intervalos de una hora, bajo condiciones de tormenta de viento. Las mediciones se efectuaron durante los años 1983 y 1984, registrándose la intensidad y dirección del viento mediante un anemógrafo SIAP AG-10 instalado en una torre a 10 m de altura, ubicada a 215 m hacia el O del sitio en donde se instalará el AEG.

Una tormenta de viento se definió como un evento durante el cual el viento sobrepasa la velocidad de 5 m/s sin interrupciones durante un lapso mayor o igual a 1 hora. Se registraron 83 tormentas. El 72 % duraron entre 2 y 8 horas y el 5 % más de 26 horas. La velocidad máxima de ráfaga registrada fue 33,3 m/s.

La variación de la dirección del viento, dentro del intervalo de 10 minutos registrados durante los eventos de tormentas de viento, fue menor a 30° en el 65 % de los casos, el ángulo cambió más que 45° en el 25% de los registros y varió más de 65° el 10 % de las veces. La máxima variación registrada corresponde a un cambio de 110° dentro de un período de 10 minutos mientras se estaba registrando una tormenta.

#### 4 RESUMEN Y DISCUSIÓN

Se utiliza un modelo de flujo de aire del tipo diagnóstico que satisface la ecuación de continuidad para determinar las características generales del viento en el sitio donde se instalará el AEG que forma parte de la Central Eléctrica Escuela, debido a que no se cuenta con mediciones meteorológicas en el lugar. Se establece una adecuada concordancia entre lo medido y los resultados del modelo y además se considera que éstos son una buena aproximación al patrón climático de vientos.

A 10 m de altura los valores medios anuales de velocidad y de densidad de potencia son 4,0 m/s y 94,0 Watt/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Entre 10 m y 50 m de altura, las calmas ocurren con una frecuencia media anual de 3 %. Los vientos provenientes de 210° y 240° tienen una frecuencia de ocurrencia de 42 %. Los vientos más fuertes, de 6 m/s a 10 m de altura y de 6,8 m/s a 50 m, provienen de 240°. También son los más energéticos: 33,9 a 49,35 Watt/m<sup>2</sup>, entre 10 y 50 m de altura, respectivamente.

Los vientos extremos a 10 m de altura, de intervalos de 10 minutos, que tienen un período de retorno de 50 años calculados con distintos modelos no sobrepasan los 23 m/s, sin

embargo, en Neuquén Aero se ha medido 25,3 m/s. Este hecho puede deberse a que el modelo subestima (en 13%) los valores de velocidad en la dirección de mayor ocurrencia y mayor intensidad (240°). Otro aspecto que se debe considerar es que la velocidad extrema medida podría ser superada en un período de 50 años.

Las ráfagas extremas a 10 m de altura, de intervalos de 3 segundos, que tienen un período de retorno de 50 años, calculadas con los dos modelos presentan el valor máximo de 31,5 m/s.

Se considera que las variaciones angulares mayores a 65°, que se registraron en un lapso corto de tiempo de 10 minutos y que tienen una ocurrencia del 10 % de las veces durante eventos de tormentas de viento, es un valor importante.

Las características del viento en el predio de la FIUNCo difieren del comportamiento que describe la bibliografía basada en situaciones del Hemisferio Norte. Esta particularidad se produce porque si bien la velocidad media es baja, las ráfagas son intensas y las variaciones angulares del viento en períodos cortos son bastante altas.

Los resultados obtenidos han originado un estudio de convertidores eólicos de hasta 50kW con dos líneas de trabajo: convertidores eólicos de eje horizontal con control stall y convertidores eólicos de eje vertical tipo Darrieus con control aerodinámico de frenado. Los primeros si bien no poseen una potencia de salida muy constante luego de alcanzada la velocidad nominal, la simpleza y robustez del control stall permite sobrellevar las ráfagas, pero no las variaciones de orientación del viento. Para el caso de los Darrieus, al ser omnidireccionales no tendrían problemas de variación de orientación con las ráfagas pero hay que adicionar un sistema de frenado aerodinámico en las aspas para limitar la potencia luego de la velocidad nominal.

También hay consideraciones de operación y ubicación de las turbinas que se desprenden de los datos obtenidos como ser: (a) orientar convenientemente las turbinas de eje horizontal y vertical a instalar, reduciendo la distancia en un plano ortogonal a los 240°; (b) la velocidad de arranque se puede considerar entre 2 a 2,5 m/s hasta tamaños medianos de turbinas (50kW).

## REFERENCES

- Barros, V., Evaluación del potencial eólico en la Patagonia, *Meteorológica*, XIV, N° 1 y 2, 473-484, 1983.
- European Wind Turbine Standards II -EWTS II, Published by ECN Solar & Wind Energy, Petten, The Netherlands, 1998.
- Frank, H.P. y Landberg, L., Modelling the wind climate of Ireland. *Boundary-Layer Meteorology*, 85: 359-377, 1997.
- International Electrotechnical Commission –IEC, International Standard IEC 1400-1; Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements, first edition, 1994.
- Lassig, J.L. y Palese, C., Mapa eólico a 50 metros de altura en la zona norte de la provincia del Neuquén, *Actas Congreso de Métodos Numéricos*, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 16 págs., 2011.
- Lassig, J.L., Importancia de la cuantificación de las ráfagas en los mapas de potencial eólico, *Anales II Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica*, Mar del Plata, Argentina, 1-5, 1995.
- Lassig, J.L., Palese, C. y Apcarian, A., Vientos extremos en la provincia de Neuquén, *Meteorológica*, 36, 83-93, 2011.
- Palese, C., Apcarian, A. y Lassig, J.L., Mapa de rugosidad aerodinámica superficial de la ciudad de Neuquén, *Actas Primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería del Viento*, 8 pág., 2008.
- Palese, C., Gardiol, J.M. y Lassig, J.L., Mapas de velocidad media del viento en el Centro-

- Este de la provincia de Neuquén, *Meteorológica*, 34, 17-27, 2009.
- Palese, C., Lassig, J.L., Pedro, G., Mattio, H., Mapa eólico de la Provincia del Neuquén *Revista HIDRORED Red Latinoamericana de Micro Hidroenergía*; II, 03-11, 2007.
- Potts, J.R., Pierson S.W., Maticen P.P., Harnel J.R. y Babau V.C., Wind energy resource assessment of western and central Massachusetts. *Actas de la Conferencia de American Institute of Aeronautics and Astronautics*, AIAA-2001-0060: 11pg, 2001.
- Reid, S., Modelling of channelled winds in high wind areas of New Zealand. *Weather Climate* 17 (1): 3–22, 1997.
- Rohatgi, J. y Vaughn N., *Wind Characteristics: An analysis for the generation of wind power*, Burges Publishing. W, 250 pág., 1994.
- Sutton, O.G., *Micrometeorology*, McGraw Hill, 1953.
- Tammelin, B., *Finnish Wind Atlas*. Finnish Meteorological Institute (In Finnish). 355 pg., 1991