

CUANTIFICACION DE LA DISPERSION AL ANALIZAR VELOCIDADES DE VIENTO ATMOSFERICO MEDIAS HORARIA ANUAL MEDIANTE EL ANÁLISIS PROBABILISTICO DE REGISTROS CORTOS.

De Bortoli¹, M. E.; Canavesio², O.; Benitez¹, F.; Makuch¹, F.
Facultad Regional Resistencia, Universidad Tecnológica Nacional (UTN). C.P. 3500 – Resistencia – Chaco - Argentina
Facultad de Ingeniería, (UNNE) C.P. 3500 – Resistencia – Chaco - Argentina
Tel. 03722-41114 –e-mail: m_debortoli@yahoo.com.ar

RESUMEN: El viento es un escurrimiento turbulento, y por lo tanto aleatorio. Los parámetros que caracterizan su comportamiento se obtienen mediante conceptos de estadística y probabilidad. Para determinar la velocidad del viento en un lugar de referencia, el mayor inconveniente es el escaso tiempo destinado a registrar la velocidad, que se restringe a pocos meses, o en su defecto se obtiene mediante datos disponibles en la zona, desconociendo el grado de confiabilidad que merece esta información. En ambos casos, la velocidad del viento así determinada introducirá errores en la evaluación del parámetro donde intervenga esta variable. En el presente trabajo se cuantifica la dispersión de la velocidad, al predecir a un nivel de probabilidad fijo y aumentando el tiempo de registro de las velocidades medias horarias, mediante el procesamiento de datos ofrecidos por "Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut", correspondiente al Aeropuerto Schiphol.

Palabras clave: viento atmosférico, velocidad media horaria, aleatorio, probabilidad.

INTRODUCCION

El viento es aire en movimiento. La radiación solar es fuente de energía de la atmósfera y genera un sistema de circulación de masas de aire provocado por el calentamiento no uniforme de la superficie terrestre, disminuyendo la densidad del aire en proximidad del ecuador respecto al polo. Esta diferencia de densidad en el aire origina el viento.

Suponiendo que la superficie terrestre es plana y sin desniveles, las corrientes de aire de menor densidad se desplazarían del ecuador hacia el polo, y el aire más denso desde los polos hacia el ecuador, generándose una región de recirculación de flujo. Considerando además el fenómeno de rotación de la tierra, el retraso producido por la fricción, la turbulencia, los obstáculos montañosos, las diferentes características del suelo que componen la superficie terrestre (agua, arena, bosques) y las variaciones del estado del agua en la atmósfera, se obtendrían desplazamientos de masas de aire característicos que constituyen el viento climático.

Para establecer las características del viento en una región se utilizan anemómetros especialmente diseñados, que miden la velocidad a determinada altura y del procesamiento de la señal correspondiente, se obtienen las propiedades estadísticas que caracterizan el viento medido. Dichas propiedades se vinculan con el espectro de Van der Hoven, que permite visualizar el registro temporal en el dominio de las frecuencias y exhibe las características del viento vinculadas a escalas de los desplazamientos intervinientes. Una división general del espectro constituye la macro y micro meteorología.

La macro meteorología se caracteriza por el desplazamiento de masas de aire cuya escala en proyección horizontal comprende cientos de kilómetros, y la micro meteorología por las propiedades que transmiten al flujo las rugosidades superficiales naturales y artificiales. La región de la atmósfera donde las propiedades del desplazamiento de las masas de aire dependen de las características de las rugosidades superficiales naturales y artificiales constituye la capa límite atmosférica, comprendiendo la capa inferior de la atmósfera desde el suelo hasta la denominada altura gradiente, donde la velocidad del viento no es modificada por la rugosidad superficial del terreno.

El desplazamiento del aire en el interior de la capa límite atmosférica constituye un flujo turbulento, y por lo tanto un proceso aleatorio. Para describir el comportamiento de una variable aleatoria temporal mediante parámetros estadísticos medios obtenidos de muestras, es necesario disponer de registros representativos del fenómeno y que sean estadísticamente independientes. La primera condición se logra con muestras cuya duración sea mayor al tiempo de promediado de las propiedades que se desea obtener, y la segunda requiere que los fenómenos físicos presentes en las muestras y que definen el comportamiento de la variable de medición, esté contenido en el registro y no influyan en las muestras siguientes.

El principal inconveniente en un proyecto de investigación es conocer la velocidad media del viento en un lugar determinado. Usualmente, por razones de proyecto, el tiempo destinado a evaluar la velocidad del viento se restringe a pocos meses, o en su defecto, la velocidad se obtiene mediante la búsqueda de datos disponibles en la zona, desconociendo el grado de confiabilidad que merece esta información. En ambos casos, la velocidad del viento así determinada introducirá errores en la evaluación del parámetro al intervenir esta variable.

¹ Investigador, Facultad Regional Resistencia, UTN

² Investigador, Facultad de Ingeniería, UNNE

Al realizar una predicción probabilística anual de la velocidad del viento atmosférico con registros cortos (dos o tres meses) producirá valores de velocidades distintas a la velocidad media disponible en el lugar, pues el viento atmosférico es afectado por las estaciones climáticas producidas durante el año. En el presente trabajo, utilizando conceptos de estadística y probabilidad, se cuantificó la dispersión de las velocidades medias horaria anual de viento atmosférico a ser excedida, al incrementar el tiempo de registro de las velocidades y evaluar a nivel de probabilidad de excedencia constante.

Los registros utilizados se encuentran en Internet en <http://www.knmi.nl/samenw/hydra/register/index.html> correspondiente al Aeropuerto Schiphol, datos brindados por "Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut" (KNMI). Además, se determinó para la estación de monitoreo de referencia, el tiempo mínimo de registro necesario para que los valores de velocidades de viento determinados al nivel de probabilidad de excedencia fijado, se establezcan en un valor aproximadamente constante.

No obstante los resultados obtenidos solo serán representativos para la localidad de referencia, con este trabajo se evidencia la variación introducida en la velocidad del viento al determinar su valor sin considerar todas las variables que componen el fenómeno.

ESCALAS DEL VIENTO ATMOSFERICO

La menor altura donde el viento no es afectado por la rugosidad de la superficie terrestre es la altura gradiente. La capa límite es una región de flujo turbulento entre la superficie de la Tierra y la altura gradiente. La altura gradiente no es un valor constante, algunos autores como Cook la estiman en 2.500 m para vientos atmosféricos fuertes.

La mayoría de los registros de velocidades se obtienen por anemómetros montados a 10 metros desde la superficie terrestre (Cogliati y Mazzeo, 1999). Como son continuos, los datos adquiridos contienen información desde el clima de viento (macro meteorología) hasta el viento en la capa límite atmosférica (micro meteorología). Debido a las diferencias entre las escalas de los desplazamientos de masas de aire que genera el clima (cientos de kilómetros) y la capa límite (desde cientos de metros hasta el milímetro), se supone que los vientos correspondientes a ambas fuentes para su estudio, podrían separarse (Sequi et al., 1999). Un método sugerido es cambiar el registro de velocidad del viento del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. El primer espectro de este tipo fue presentado por Van der Hoven en Brookhaven, Long Island, NY, USA, (Cook, 1985) (Fig. 1).

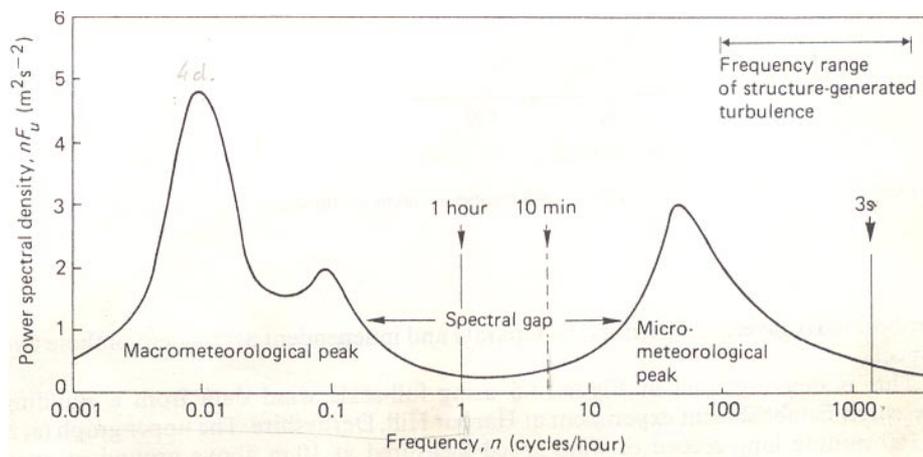


Fig. 1: Espectro meteorológico de Van der Hoven correspondientes a vientos fuertes

De la observación del espectro se extraen tres elementos de análisis: el mayor pico se localiza a una frecuencia de 0.01 ciclo/hora y corresponde a un sistema de clima desarrollado de cuatro días, designado pico macro meteorológico. El segundo pico se ubica en frecuencias más altas y asociadas con la turbulencia de la capa límite, extendido sobre un rango que comprende desde 10 minutos hasta 3 segundos. Este pico es denominado pico micro meteorológico. Entre ambos se desarrolla un valle definido (depresión) sobre un rango de frecuencia de un orden de magnitud, donde se observa una porción de bajo contenido de energía produciendo poca fluctuación en la velocidad del viento. Esta región del espectro es conocida como Valle del Espectro (Spectral gap).

La diferencia entre las escalas del clima y el viento en la capa límite atmosférica se observa en el espectro de Van der Hoven donde el valle del espectro confirma lo supuesto respecto a la escasa interacción entre el clima de viento (pico macro meteorológico) y la capa límite (pico micro meteorológico), permitiendo establecer diferentes criterios de valoración.

Nuestro interés es evaluar las características y efectos del viento en la capa límite, en adelante solo nos referiremos al espectro de Van der Hoven que abarca desde el valle hasta el pico micro meteorológico.

VIENTO EN LA CAPA LIMITE ATMOSFERICA

En la capa límite atmosférica el viento es afectado por la superficie terrestre. Aún para velocidades muy bajas, el número de Reynolds característico del flujo en la capa límite atmosférica es elevado, y el flujo de viento es siempre turbulento (Tennekes and Lumley, 1994).

La hipótesis de Reynolds permite separar a la velocidad del flujo turbulento como la adición de una velocidad media y otra velocidad instantánea (Blessmann, 1986; 1994) que contiene las fluctuaciones del viento en torno a la media. Por lo tanto, es factible pensar la existencia de una serie de parámetros que describirán el comportamiento del flujo medio y otros de la turbulencia y se expresa de la siguiente manera:

$$U(t) = \bar{U} + u(t) \quad (1)$$

donde $U(t)$ es la velocidad del viento instantáneo (Fig. 2.a), \bar{U} la velocidad media (Fig. 2.b) y $u(t)$ la velocidad instantánea descontada la velocidad media (Fig. 2.c).

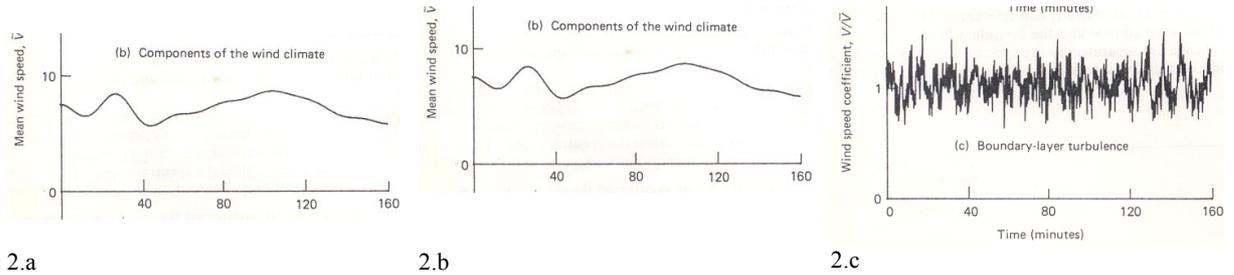


Fig. 2: Registro de velocidades de viento atmosférico. 2.a Viento de registro. 2.b Velocidades medias horarias. 2.c Cociente de las velocidades instantáneas y la velocidad media horaria.

FUNCION DE DENSIDAD Y DISTRIBUCION DE PROBABILIDAD DE LAS VELOCIDADES MEDIA HORARIA ANUAL DEL VIENTO ATMOSFERICO A TRAVES DEL PROCESAMIENTO DE SU REGISTRO

La función de Weibull es utilizada para describir la densidad de probabilidad de velocidades medias horaria de viento. La expresión dada por Weibull (Bendat and Piersol, 1967) forma una familia de curvas de diferentes formas, y se expresa así:

$$p_x = ckx^{k-1}e^{-cx^k} \quad (2)$$

donde x es la variable, c es un parámetro de dispersión y k un parámetro de forma.

Todas las curvas de la distribución de Weibull se limitan a valores positivos de la variable y tienen la propiedad de converger en una curva asintótica exponencial para grandes valores de la variable.

La probabilidad que una observación adquiera un valor menor a uno preestablecido (x) es dado por la integral de la ecuación anterior entre los rangos $-\infty$ y el valor en cuestión x , siendo el valor de la integral menor a la unidad. Su expresión es

$$P = \int_{-\infty}^x p_x dx \quad (3)$$

Dicha integral representa la suma de valores de probabilidad menores al valor de la variable indicada (área izquierda del valor de x). La función de distribución acumulativa de Weibull es dada por:

$$P_x = 1 - e^{-cx^k} \quad (4)$$

y representa la probabilidad que una variable de referencia no sea superada ante la ocurrencia de un nuevo evento.

La expresión dada por Weibull forma una familia de curvas de diferentes formas, siendo la función Exponencial y la de Rayleigh dos casos especiales, con la constante $k=1$ y $k=2$ respectivamente. La función de distribución de Rayleigh para el análisis de viento medio horario anual es descrita por la siguiente expresión, donde V' es la desviación estándar de V , y $k=2$:

$$P_V = 1 - e^{(-V^2/2V'^2)} \quad (5)$$

El presente trabajo está referido al análisis de la distribución de probabilidades de velocidades medias horarias, y es relevante destacar que las velocidades de vientos obtenidos del registro están correlacionados entre horas adyacentes, debido a los

picos de bajas frecuencias observados en el espectro de Van der Hoven, en oposición el principio de independencia estadística. Los picos presentes en el espectro significan que a esa frecuencia, el viento posee alto contenido de energía, provocando variaciones en las velocidades del viento atmosférico.

El alto contenido de energía correspondiente a la frecuencia de 0.1 ciclo/hora indica que cada 12 horas se producen variaciones en las velocidades medias, y como la curva en el espectro es acampanada, las velocidades medias incrementan paulatinamente en las horas adyacentes, implicando que si el viento es fuerte en una hora determinada, es probable que fuera fuerte para algunas horas anteriores y/o posteriores a la muestra obtenida.

Para que cada evento posea la misma probabilidad de adquirir cualquier valor (independencia estadística) deberían desecharse las velocidades medias horaria inmediatas anteriores y posteriores a ese evento característico. La forma del espectro de Van der Hoven es característica cuando se producen tormentas fuertes, y la turbulencia atmosférica es de origen mecánico. Cuando las velocidades medias disminuyen, los picos del espectro se suavizan, denotando una tendencia a converger el fondo del valle y los picos hacia una línea aproximadamente horizontal. Como este trabajo considera todas las velocidades medias horaria anual como registro en forma continua, sin considerar la intensidad del viento, se considera a cada velocidad como un evento con igual posibilidad de ocurrir cada una de ellas, como si el espectro fuera similar al de un “ruido blanco”.

Además, al promediar las velocidades medias sobre un intervalo de tiempo de una hora, las correlaciones entre las escalas de desplazamientos en la cresta derecha del espectro (altas frecuencias), son anuladas o minimizadas con el promediado temporal. Como consecuencia, las correlaciones estadísticas entre fluctuaciones de velocidades correspondiente al concepto de ráfagas (frecuencias de fluctuación mayor a 1 Hz) son desechadas. La independencia estadística se mantiene respecto a las altas frecuencias.

METODOLOGIA Y RESULTADOS

Para la evaluación probabilística de la velocidad de viento media horaria se tomaron registros del año 1999. Las muestras horarias continuas se dividieron en registros correspondientes a 3, 6, 9 12 y 24 meses respectivamente. Luego, se presentó cada registro en forma de histograma. Un histograma representa el número de ocurrencia de eventos de la variable divididos en intervalos, generalmente iguales, de ancho conveniente. Si al número de ocurrencia en cada intervalo se divide por el tamaño de la muestra, estos valores representan una medida de la probabilidad y significa la posibilidad que un nuevo evento tome el valor contenido en ese intervalo. En Figs. 3 y 4 se muestran los histogramas y las probabilidades acumuladas para las muestras respectivas.

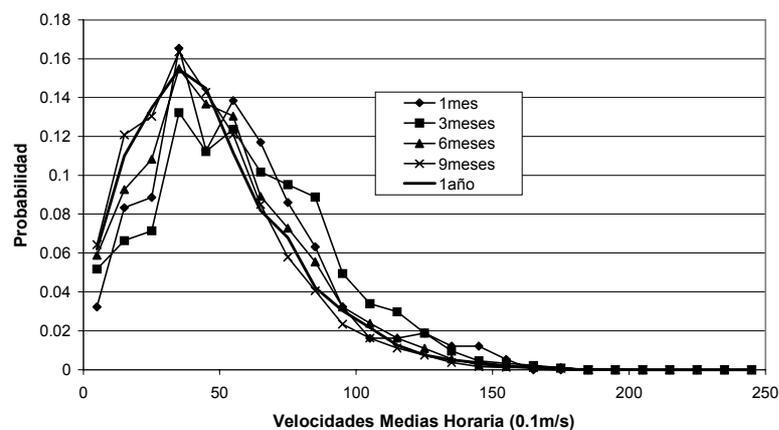


Fig. 3: Histograma de velocidades medias horarias de tiempo de adquisición variables

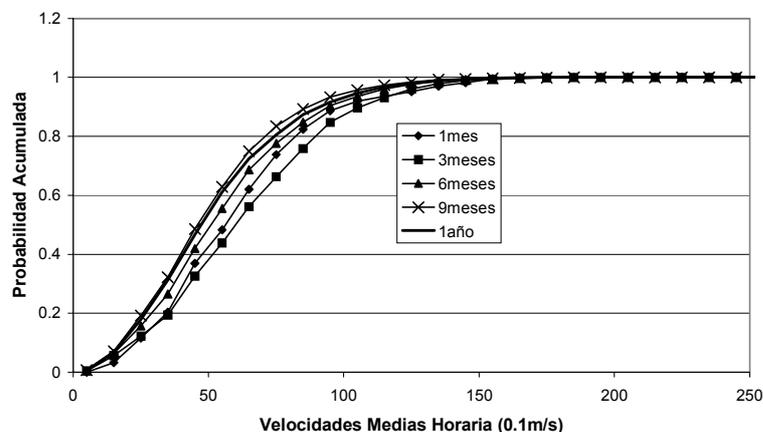


Fig. 4: Curva de distribución de las velocidades medias horarias

No obstante las curvas obtenidas con registros de 1, 3, 6, 9 meses no son representativos de una muestra anual, el histograma de distribución se ajustó a una función derivada de la expresión de distribución de Weibull, determinándose las constantes c y k en la expresión (4). Aplicando logaritmo, y despejando la velocidad, finalmente se obtiene

$$\ln V = -\ln c + \frac{1}{k} \ln(-\ln(1 - P)) \quad (6)$$

Las constantes obtenidas en cada muestra, contrastaron con los logrados en registros de 12 (año 1999) y 24 meses (muestra compuesta por años 1998 y 1999) (Tabla N° 1). Además para cada una de las muestras se determinó su varianza respectiva. En Fig. 5 se presenta las probabilidades acumuladas obtenidas de los histogramas de las muestras y las funciones de distribución de la expresión de Rayleigh (5) correspondientes a registros de duración de 1 mes y 1 año con las varianzas de Tabla 1 respectivamente.

Tabla 1: Valores de las varianzas y las constantes c y k de las muestras obtenidas por ajuste de curva.

	Duración de los registros de las velocidades medias horarias (año 1999)				
	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
K	2.09	1.98	1.92	1.87	1.96
C	69.29	69.98	62.17	57.20	60.77
Varianza	31.40	32.88	30.38	28.49	29.75

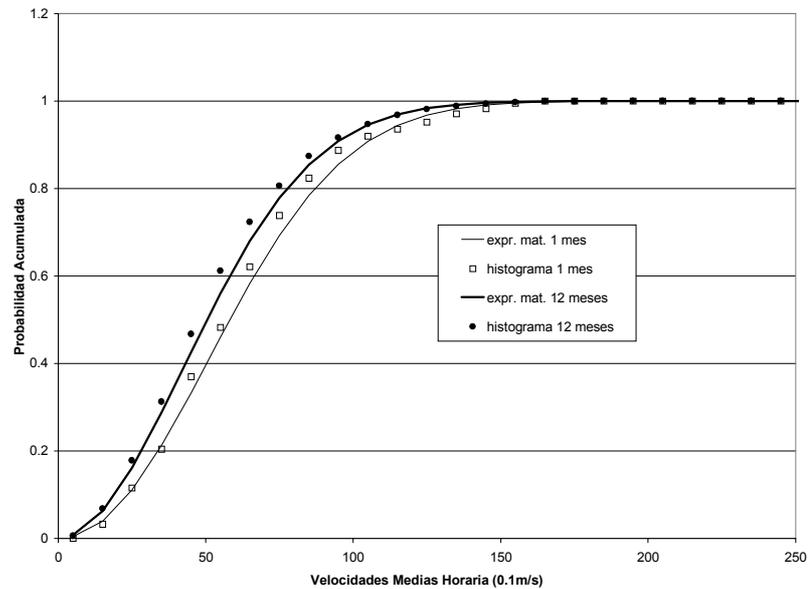


Fig. 5: Probabilidad acumulada obtenido de los registros y de la expresión de Rayleigh para muestras de 1 y 12 meses respectivamente

En Fig. 6 se presentan tres histogramas correspondientes a los años 1998, 1999 y 2000 donde se observa la regularidad de las probabilidades acumuladas y la convergencia hacia la curva propuesta por Rayleigh.

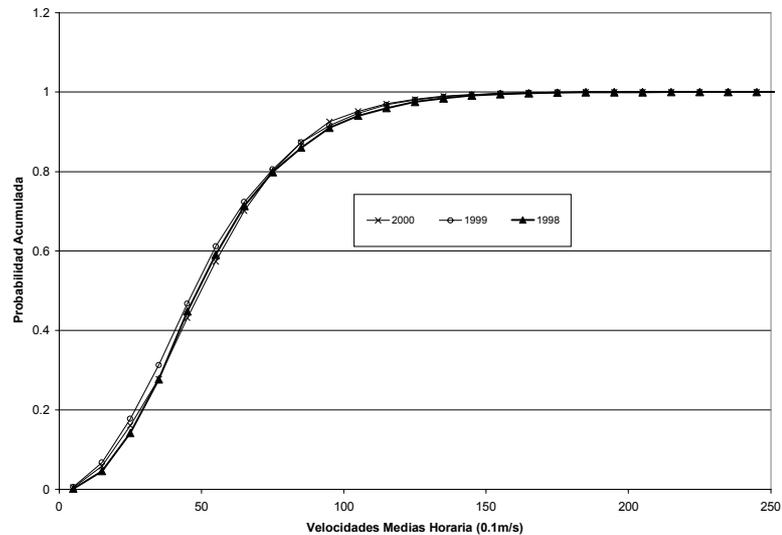


Fig. 6: Probabilidades acumuladas correspondientes a los años 1998, 1999 y 2000.

Por último, en Tabla 2 se muestra las velocidades medias horarias obtenidas con una probabilidad constante de 95% de no ser superada.

Tabla 2: Velocidades medias horarias con un nivel de probabilidad fijo de 95% de no ser superadas

	Duración de los registros de las velocidades medias horarias (año 1999) Prob. 95 %				
	1 mes	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Velocidades (m/s)	11.7	12.18	11.02	10.3	10.65

DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

Se realizó un análisis estadístico y probabilístico de un registro de velocidades medias horaria anual de viento atmosférico correspondiente a registros de duración de tiempo en aumento (1, 3, 6, 9 y 12 meses). Posteriormente, para demostrar la convergencia de los valores experimentales a la expresión teórica de Rayleigh, se analizaron muestras anuales de viento atmosférico (1998, 1999 y 2000). Además se cuantifico la variación obtenida en la velocidad al predecir a un nivel de probabilidad constante que la misma no será excedida ante la ocurrencia de un nuevo evento.

De los resultados se observa que cuando el tiempo de registro de velocidades superan los 6 meses, las constantes determinadas por el método propuesto por Gumbel (Tabla 1), tienden a estabilizarse en torno al valor real dado por la muestra completa (12 meses). A la misma conclusión se arriba al predecir las velocidades a nivel de probabilidad constante (Tabla 2).

En Figura 4 y 5 se observa que para una velocidad media horaria de viento constante y tiempos de registros cortos, la probabilidad de excedencia se obtiene por exceso, y en Figura 5 también se observa que las expresiones propuestas por Rayleigh sugieren probabilidades de excedencia menores que las obtenidas de los registros.

La Figura 6 exhibe la convergencia de las probabilidades acumuladas de las velocidades de viento atmosférico para tiempos de registros mayores a 1 año. Esto demuestra que para obtener resultados mediante análisis estadístico y probabilístico es necesario disponer de muestras representativas del proceso aleatorio que se analiza.

De lo expuesto se infiere que si por razones del proyecto de investigación es menester disponer de la velocidad media horaria anual del viento atmosférico en un lugar determinado con cierto nivel de precisión, es indispensable realizar un relevamiento de las velocidades medias del lugar durante un tiempo mayor o similar a las exigencias del proyecto. Si no se dispone del instrumental o tiempo para realizar el trabajo experimental, y la velocidad media se obtiene por información del lugar, es preciso conocer el nivel de probabilidad adoptado en la determinación de la velocidad del viento.

REFERENCIAS

- N. J. Cook, (1985). The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification. Building Research Establishment. 1985, Londres, Inglaterra.
- Julius S. Bendat, Allan G. Piersol, (1967). Measurement and Analysis of Random Data, 1967, John Wiley & Sons, Inc., EEUU.
- Joaquim Blessmann, (1986). O vento na Engenharia Estrutural, 1ª Parte. Curso de Pós-graduação em engenharia civil, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 1986, Porto Alegre, Brasil.
- Joaquim Blessmann, (1994). O vento na Engenharia Estrutural, 2ª Parte. Curso de Pós-graduação em engenharia civil, Universidad Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, 1994, Porto Alegre, Brasil.
- H. Tennekes and J. L. Lumley, (1994). A first course in turbulence. The MIT Press, Cambridge, 1994.
- Juan R Sequi, Rafael R. Herrera, Carlos D. Rodríguez, Juan C. Marchioli, Alberto D. Fernández (1999). Disponibilidad eólica en Los Varela - Dpto. Ambato- Catamarca. ASADES Vol. N 3, 1999. Pág. 6.01-6.04.
- Marisa Cogliati, Nicolás A. Mazzeo (1999). Climatología del viento en el Alto Valle del Río Negro. ASADES Vol. N 3, 1999. Pág. 6.13-6.16.

ABSTRACT

Wind is a turbulent flow and therefore random in nature. Parameters characterizing its behavior are obtained applying probabilistic and statistical concepts. The main problem facing during wind velocity determination at a reference point is mainly related to the short time available for data monitoring. Data is in general obtained from measurements over periods of a few months or from local available sources. Either case the degree of confiability of this information is unknown affecting assessments of any kind in witch velocity is one of the variables. The present work quantifies the dispersion of the velocity by predicting a fixed probability level and augmenting the measurements period of hourly mean velocities. Raw data analyzed corresponds to the monitoring station at Schiphol airport and public available from the web of the "Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut".

Keywords: atmospheric winds, hourly mean wind velocity, random, probability.