



Medición del viento y su aplicación en la ingeniería estructural

Daniel Johanning Cordero, Asistente de Ingeniería
Rolando Castillo Barahona, Coordinador

Programa de Ingeniería Estructural

Correo electrónico: rolando.castillo@ucr.ac.cr



Fuente: <http://www.geography.hunter.cuny.edu/>

Introducción

La medición del viento sobre la superficie terrestre tiene muchas aplicaciones prácticas. El hecho de contar con información histórica, en tiempo real, de la velocidad del viento (tanto magnitud como dirección) permite realizar estudios de gran utilidad como por ejemplo: el monitoreo y pronóstico de las condiciones climáticas, la estimación de la dispersión de agentes contaminantes en el aire, el cálculo de la energía eólica producida por una turbina, o bien, la determinación de las fuerzas de viento y su efecto sobre las estructuras. (WMO, 2010). En lo que respecta al campo de la ingeniería estructural, esta última aplicación es la de mayor interés.

La medición del viento sobre la superficie no es una tarea sencilla de realizar. Esto debido principalmente a que el comportamiento del viento se ve afectado por varios factores, entre los que destacan: la altura sobre el nivel del terreno, la rugosidad de la superficie y la topografía de la zona. Además, debido a las obstrucciones que usualmente se encuentran a lo largo de la trayectoria del viento, es común que éste presente un comportamiento turbulento que se manifiesta por medio de fluctuaciones tanto en su velocidad como en su dirección, lo que complica aún más su medición.

El presente boletín tiene el objetivo de brindar al lector una noción básica sobre el procedimiento utilizado para realizar mediciones del viento. Primero

se presenta una descripción de los instrumentos de medición utilizados con mayor frecuencia alrededor del mundo. Seguidamente, se explica la forma en que se recomienda procesar los datos con el fin de obtener información más manejable. Luego se hace énfasis en la información requerida para aplicaciones estructurales y finalmente, se mencionan los requisitos para la ubicación de los equipos de medición.

Instrumentos para la medición del viento

La velocidad del viento generalmente se maneja como un vector bidimensional, es decir, incluye magnitud⁽¹⁾ (velocidad, rapidez o intensidad del viento) y dirección la cual se mide con respecto al Norte geográfico. La componente vertical del vector generalmente se ignora, evitando así el uso de un vector tridimensional (JMA, 2013). En la mayoría de los casos, la medición de ambas componentes del vector se realiza de forma independiente y para cada una existen instrumentos específicos.

El instrumento utilizado para la medición de la dirección del viento se conoce como veleta. Una veleta, como la mostrada en la Figura 1, es un objeto que puede rotar libremente alrededor de un eje vertical, y generalmente consiste de una punta y una cola. La cola, al tener una superficie mayor, presenta una mayor resistencia al viento, lo que provoca que la punta de la veleta se alinee con la dirección del viento. (Nilsson, 2010). Las veletas se conectan a un generador de señales que se encarga de convertir el ángulo de incidencia del viento en una señal eléctrica, lo que permite la medición de la dirección del viento (JMA, 2013).

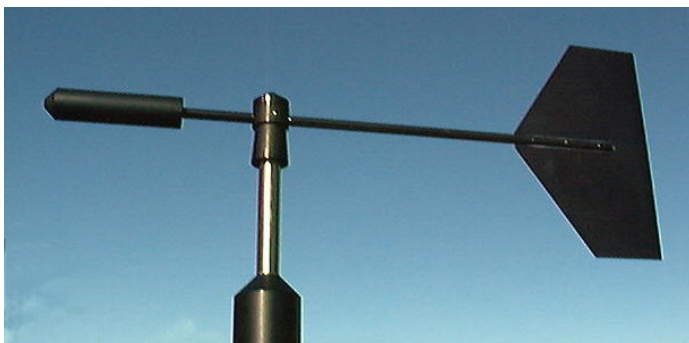


Figura 1. Veleta para la medición de la dirección del viento

Fuente: <http://www.trutrack.com/>

Por otro lado, la medición de la velocidad del viento se realiza con instrumentos conocidos como anemómetros. Estos

instrumentos consisten de dos componentes: un sensor, el cual detecta los cambios en la velocidad del viento, y un generador de señales, que produce señales eléctricas las cuales varían según la magnitud del cambio en la velocidad detectada por el sensor (JMA, 2013).

A lo largo de la historia se han ideado diversos métodos para medir la velocidad del viento, lo que ha resultado en distintos tipos de anemómetros. Éstos se describen brevemente a continuación.

Los anemómetros utilizados con mayor frecuencia son los anemómetros rotatorios. El sensor de este tipo de anemómetros consiste de un componente rotatorio o rotor, el cual gira en forma proporcional a la velocidad del viento cuando éste incide sobre el instrumento (WMO, 2010).

Los anemómetros rotatorios pueden clasificarse en anemómetros de copa y en anemómetros de hélice, esto según el tipo de rotor utilizado. Los anemómetros de copa, como el mostrado en la Figura 2, generalmente consisten de tres copas que rotan alrededor de un eje vertical (normal a la dirección del viento). Al incidir el viento sobre el instrumento, se genera una diferencia de presión entre el lado cóncavo y el lado convexo de las copas, lo cual causa que rote desde el lado convexo de una copa hacia el lado cóncavo de la copa adyacente (JMA, 2013).



Figura 2. Anemómetro de 3 copas

Fuente: <http://weather.thefuntimesguide.com/2010/12/anemometer.php>

Los anemómetros de hélice, por otro lado, presentan un rotor similar a una hélice, como se puede observar en la Figura 3. A diferencia de los anemómetros de copa, el eje de rotación en los anemómetros de hélice es paralelo a la dirección del viento. Una ventaja de este tipo de anemómetros es que son capaces de girar de modo que la hélice siempre apunte en la dirección del viento. Esto los hace capaz de medir también la dirección del viento y no solo su velocidad, por lo que cumplen una función

⁽¹⁾ En el resto del boletín, se usará el término “velocidad” para referirse a la magnitud del vector, es decir, a la rapidez o intensidad del viento.

similar a la de una veleta. Debido a esto, los anemómetros de hélice también se conocen como anemómetros de veleta.



Figura 3. Anemómetro de hélice
Fuente: <http://sensor.nevada.edu/>

Existen también otros tipos de anemómetros que no son rotatorios, sino que utilizan otros métodos y principios físicos para medir la velocidad del viento pero son utilizados con menos frecuencia. A continuación se describen brevemente algunos ejemplos.

El anemómetro sónico, como el mostrado en la Figura 4, es un instrumento que cuenta con dispositivos transmisores y receptores de ondas ultrasónicas. Las señales son enviadas entre los dispositivos y se mide su tiempo de propagación. La velocidad de las ondas cambia ligeramente con la presencia del viento, por lo que es posible relacionar la velocidad del viento con el tiempo de propagación de las señales emitidas (JMA, 2013).



Figura 4. Anemómetro sónico
<http://www.basesperimentale.le.isac.cnri.it/>

El anemómetro de presión o de tubo Pitot, como el mostrado en la Figura 5, es un instrumento que mide la sobrepresión en un tubo que se mantiene alineado con la dirección del viento mediante una veleta. Esta situación permite que el viento sople directamente dentro del tubo permitiendo con ello obtener la

velocidad del viento a partir de las presiones medidas dentro del tubo, ya que existe una relación cuadrática entre velocidad y presión (WMO, 2010).



Figura 5. Anemómetro de presión o tubo Pitot
<http://www.accuweather.com/>

El anemómetro de hilo caliente, como el mostrado en la Figura 6, es un instrumento que utiliza un hilo de metal caliente como sensor. Al ser expuesto al viento, el hilo se enfría ligeramente, lo que produce un cambio en la resistencia del metal. Este cambio permite encontrar la velocidad del viento ya que existe una relación entre la resistencia del metal y la velocidad. Dado que el sensor de estos anemómetros es pequeño, éstos son apropiados para medir la velocidad del viento en espacios confinados (JMA, 2013).



Figura 6. Anemómetro de hilo caliente
<http://www.sperdirect.com/>

Procesamiento de los datos

La velocidad y la dirección del viento rara vez son constantes, sino que presentan fluctuaciones debidas a los obstáculos presentes en la trayectoria del viento. Para no pasar por alto estas fluctuaciones y evitar así la pérdida de información,

los instrumentos de medición deben ser capaces de tomar muestras de la velocidad y la dirección del viento en intervalos bastante frecuentes, incluso menores a un segundo en el caso de los instrumentos más sofisticados (Burt, 2012).

Evidentemente, el hecho de tomar mediciones muy frecuentes genera una cantidad muy grande de datos, y almacenar toda esta información puede ser difícil. Por lo tanto, con el fin de facilitar el manejo y el almacenamiento de las mediciones realizadas, es necesario llevar a cabo un procesamiento de los datos. Este procesamiento consiste en la obtención de valores promedio, valores máximos y desviaciones estándar a partir de los datos inicialmente registrados. Para lograrlo, un sistema de medición de viento debe contar no solo con un sensor, sino también con un sistema de registro y procesamiento de datos (WMO, 2010).

La Organización Meteorológica Mundial, o WMO (World Meteorological Organization) por sus siglas en inglés, menciona tres parámetros clave a obtener mediante el procesamiento de los datos: la velocidad y dirección promedio, la velocidad de ráfaga y la desviación estándar de las fluctuaciones (WMO, 1987). Cada uno de estos parámetros se describe a continuación.

Velocidad y dirección promedio del viento

Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO), la velocidad promedio del viento se obtiene al promediar las velocidades del viento registradas durante un intervalo específico, por ejemplo, 1 minuto, 10 minutos o 1 hora. A este intervalo se le conoce como el intervalo de promedio. La velocidad promedio en un intervalo de 10 minutos, por ejemplo, se denomina “velocidad promedio en 10 minutos”.

Es posible elegir cualquier intervalo para promediar la velocidad del viento. Sin embargo, es necesario tener presente que intervalos de promedio cortos usualmente producen valores más erráticos o con una mayor varianza, ya que en estos casos las fluctuaciones por turbulencia se toman en consideración (WMO, 2008).

El intervalo de promedio de 10 minutos es el intervalo estándar para obtener la velocidad promedio del viento, según lo establece la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Se eligió este intervalo ya que representa una duración apropiada para incorporar muchas de las fluctuaciones del viento sin producir valores erráticos (WMO, 2008). Debido a esto es que

gran parte de las instituciones meteorológicas alrededor del mundo utilizan la velocidad promedio de 10 minutos para reportar la velocidad del viento e inclusive para clasificar los ciclones tropicales.

El registro de la dirección promedio del viento también es importante. En la ingeniería estructural, por ejemplo, la sensibilidad de una estructura sujeta a fuerzas de viento dependerá en gran parte de la dirección de incidencia del viento. Se recomienda utilizar también un intervalo de 10 minutos para obtener la dirección promedio del viento, de modo que haya consistencia con el mismo intervalo utilizado para determinar la velocidad promedio de viento.

Velocidad de ráfaga

La velocidad de ráfaga se define como la mayor velocidad promedio entre un grupo de velocidades promedio registradas con un intervalo de promedio usualmente corto (por ejemplo, 3 segundos o 1 minuto) dentro de un período de observación determinado. Este período de observación debe ser mayor al intervalo de promedio de la velocidad de ráfaga (WMO, 2008).

Por ejemplo, si se calcula la velocidad promedio del viento en intervalos de 1 minuto durante un período de observación de 10 minutos, se obtendrían 10 valores de velocidad promedio. La mayor velocidad promedio entre estos 10 valores se conoce como la “velocidad de ráfaga de 1 minuto para un período de observación de 10 minutos”.

Para el análisis de estructuras sujetas al empuje del viento, la tendencia ha sido utilizar la velocidad de ráfaga de 3 segundos como velocidad de diseño, ya que se encontró que las ráfagas de esta duración son las que tienen mayor potencial para provocar daños a estructuras urbanas y suburbanas. Además, es conveniente utilizar un período de observación de 10 minutos, de modo que haya consistencia con el intervalo utilizado para estimar la velocidad de viento promedio (WMO, 1987).

Conversión entre velocidades promedio y velocidades de ráfaga

En ocasiones puede ser necesario realizar conversiones entre una velocidad promedio y una velocidad de ráfaga, o bien, entre dos velocidades de ráfaga con intervalos de promedio distintos.

Los resultados de los estudios meteorológicos de Durst (1960) demuestran que, bajo las mismas condiciones de viento y para un mismo período de observación, las velocidades de ráfaga tienden a presentar valores más altos conforme menor sea el intervalo elegido para promediar las velocidades. Por ejemplo, si a partir de los datos registrados durante 1 hora en una estación de viento determinada se obtiene tanto la velocidad de ráfaga de 3 segundos como la velocidad de ráfaga de 1 minuto, probablemente la velocidad de ráfaga de 3 segundos presentará un valor mayor.

La curva Durst (ver Figura 7) es un grafico muy útil para realizar conversiones entre la velocidad promedio en 1 hora y la velocidad de ráfaga con intervalo de promedio "t" que ocurre dentro de ese mismo período de observación de 1 hora. En esta curva, el eje horizontal (abscisa) muestra, en escala logarítmica, el intervalo de promedio "t" de la velocidad de ráfaga (en segundos) y el eje vertical (ordenada) muestra, en escala natural, el factor de conversión entre la velocidad de ráfaga de período "t" con respecto a la velocidad promedio en 1 hora (3600 segundos).

Al utilizarse la curva Durst para realizar conversiones, debe tenerse en cuenta las siguientes limitaciones:

- La curva Durst aplica solo para mediciones de viento obtenidas en zonas sin obstáculos y donde la topografía es plana (Durst, 1960).
- La curva no se debe utilizar para convertir la velocidad promedio en 1 hora a otra velocidad promedio, ya que solo relaciona la velocidad promedio en 1 hora con velocidades de ráfaga.

A continuación se incluyen dos ejemplos que ilustran el uso de la curva Durst.

Ejemplo 1: Conversión de la velocidad promedio en 1 hora a la velocidad de ráfaga de 3 segundos

Supóngase que un ingeniero requiere conocer la velocidad de ráfaga de 3 segundos en una zona determinada, pero la estación de viento de esa zona registra únicamente velocidades promedio en 1 hora.

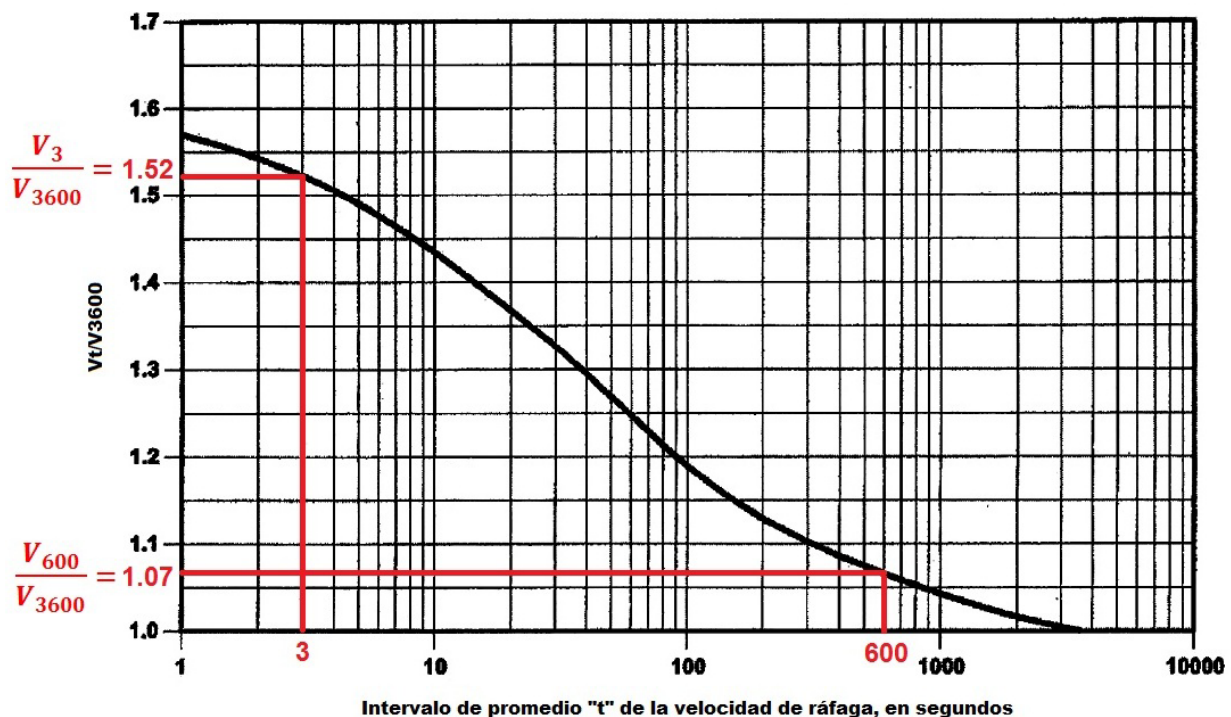


Figura 7. Curva Durst donde se relacionan velocidades de ráfaga con diferentes intervalos de promedio "t" relativo a la velocidad promedio en 1 hora.

Fuente: ASCE 7-10 (2010) Modificado por: Programa de Ingeniería Estructural

El factor de conversión requerido se puede obtener directamente de la curva Durst (ver Figura 7).

De la curva se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{V_3}{V_{3600}} = 1.52$$

Por lo tanto, la velocidad de ráfaga de 3 segundos será 1.52 veces mayor que la velocidad promedio de 1 hora.

Ejemplo 2: Conversión de una velocidad de ráfaga de 10 minutos a una velocidad de ráfaga de 3 segundos

Supóngase que a partir de los datos registrados en una estación de viento se determina que la velocidad de ráfaga de 10 minutos (= 600 segundos) en un periodo de observación de 1 hora (= 3600 segundos) fue de 45 km/h. Sin embargo, se requiere conocer cuál fue la velocidad de ráfaga de 3 segundos que se presentó en ese mismo período de observación.

Según la curva de Durst (ver Figura 7), los factores de conversión para 3 segundos y 600 segundos con respecto a la velocidad promedio en 1 hora son:

$$\frac{V_3}{V_{3600}} = 1.52 \qquad \frac{V_{600}}{V_{3600}} = 1.07$$

La relación entre estos dos valores da como resultado el factor de conversión requerido:

$$\frac{V_3}{V_{600}} = \frac{V_3/V_{3600}}{V_{600}/V_{3600}} = \frac{1.52}{1.07} = 1.42$$

Por lo tanto, la velocidad de ráfaga de 3 segundos será 1.42 veces mayor que la velocidad de ráfaga de 10 minutos (= 600 segundos). Esto es:

$$V_3 = 1.42 \cdot V_{600} = 1.42 \cdot (45 \text{ km/h}) = \mathbf{63.9 \text{ km/h}}$$

Desviación estándar de las fluctuaciones

La interacción del viento con los diferentes obstáculos presentes en la superficie terrestre produce fluctuaciones tanto en su velocidad como en su dirección. A este comportamiento se le conoce como turbulencia. La medición de la turbulencia es importante ya que ésta influye en varios campos de la ingeniería de viento. Una forma útil de caracterizar la intensidad

de la turbulencia del viento es mediante las desviaciones estándar tanto de la velocidad como de la dirección del viento, razón por la cual se recomienda calcular y registrar estos parámetros (WMO, 1987).

Recomendaciones de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) en cuanto al procesamiento y registro de datos

Con el fin de contar con información suficiente para las distintas aplicaciones de las mediciones de viento, la WMO recomienda que una estación de viento sea capaz de registrar, cada 10 minutos, los siguientes datos (WMO, 1987):

- La velocidad y dirección promedio del viento.
- La velocidad de ráfaga, preferiblemente de 3 segundos, donde los 10 minutos corresponden al período de observación.
- La desviación estándar tanto de la velocidad como de la dirección del viento.

Ubicación de instrumentos de medición

La velocidad del viento se vé notablemente afectada por diferentes factores, entre los que destacan: la altura sobre el nivel del terreno, la rugosidad de la superficie y la topografía de la zona. Es por ello que la ubicación de los instrumentos de medición debe elegirse con sumo cuidado, verificando que la zona cumpla con ciertas condiciones, las cuales se describen de forma general a continuación.

En el caso de la altura, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) especifica que la altura estándar para realizar la medición de la velocidad del viento es de 10 metros sobre el terreno, esto con el fin de que las mediciones del viento obtenidas en estaciones distintas sean comparables entre sí (WMO, 2010).

En el caso de la ubicación geográfica, lo ideal es que el anemómetro se coloque en una zona donde los efectos de rugosidad y topografía no sean significativos. Esto implica que los anemómetros no deben colocarse cerca de irregularidades topográficas como barrancos, montañas o pendientes pronunciadas. Asimismo, no conviene colocarlos en terrenos de alta rugosidad que presenten gran cantidad de obstáculos, por ejemplo, en centros urbanos o en zonas boscosas.



Figura 8. Anemómetro colocado a 10 metros de altura en terreno regular con baja rugosidad

Fuente: <http://www.hko.gov.hk/>

La Figura 8 muestra un anemómetro que cumple con las condiciones recomendadas en cuanto a altura y ubicación geográfica. Sin embargo, zonas completamente planas y sin obstáculos no son muy comunes, por lo que las mediciones normalmente se verán afectadas por la rugosidad o la topografía local. Para solucionar este problema, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) permite realizar correcciones a las mediciones de un anemómetro con el fin de estandarizarlas a terreno plano y abierto con una baja rugosidad.⁽²⁾ Lo que se busca con esto es que la medición del viento sea representativa de una zona limitada como mínimo por un radio de unos cuantos kilómetros alrededor del anemómetro, y no solo de sus alrededores inmediatos. Es importante aclarar que estas correcciones no deben realizarse a mediciones que se alejen mucho del valor promedio de la región por haberse obtenido en zonas irregulares o altamente rugosas (WMO, 2010).

El terreno alrededor de una estación de viento no necesariamente presentará las mismas características en toda el área donde se supone que la medición será representativa. Esto es debido a variaciones en la rugosidad o la topografía que existen de un lugar a otro (WMO, 1987). Por lo tanto, una vez obtenidos los valores estandarizados, éstos deben ajustarse a la ubicación específica donde se utilizará la información.

En el caso del análisis y el diseño estructural por viento, los códigos de viento generalmente incluyen mapas geográficos que indican las velocidades de diseño que son representativas de cada región. En varios códigos de viento internacionales, incluido el ASCE 7-10, las velocidades del viento mostradas en estos mapas representan velocidades de ráfaga de 3 segundos calculadas para diferentes períodos de retorno. Estas velocidades se obtienen a partir de un análisis estadístico de los datos registrados en diferentes estaciones de viento. Adicionalmente, los códigos de viento por lo general incluyen factores de corrección por rugosidad y topografía que permiten adaptar las velocidades de diseño a las características locales del terreno donde se construirá la estructura.

⁽²⁾Para mayor información referirse al documento "WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation", sección I.5 "Measurement of Surface Wind". (2010).

Conclusiones

Los equipos más utilizados para realizar las mediciones de viento son los anemómetros rotatorios, para medir la velocidad del viento, y las veletas, para medir su dirección.

A la hora de realizar mediciones del viento, es necesario elegir con criterio la ubicación de los equipos de medición. La Organización Meteorológica Mundial (WMO) recomienda ubicar los instrumentos a 10 metros de altura sobre el terreno en zonas donde los efectos de la rugosidad y la topografía no sean significativos, ya que la altura, la rugosidad y la topografía afectan directamente el comportamiento del viento.

En lo que respecta al procesamiento y registro de los datos, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) recomienda calcular y registrar, cada 10 minutos, la velocidad y dirección promedio, la velocidad de ráfaga de 3 segundos y las desviaciones estándar de la velocidad y la dirección del viento. Esta información es muy útil en varias aplicaciones.

Las velocidades de ráfaga de 3 segundos son de particular importancia en la ingeniería estructural, ya que son las que tienen mayor potencial para provocar daños en la mayoría de las estructuras. Debido a esto, los mapas de viento que se incluyen en la normativa internacional para diseño por viento por lo general muestran las velocidades de ráfaga de 3 segundos calculadas para diferentes períodos de retorno.

Tener un mejor entendimiento acerca del comportamiento del viento y la forma en que éste se mide puede ser de gran ayuda para el ingeniero estructural, ya que le permite tener criterio a la hora de realizar el análisis y diseño de elementos o sistemas estructurales donde el viento rige el diseño.

Bibliografía:

- American Society of Civil Engineers, ASCE. (2010). *ASCE 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston, Virginia, EE.UU.
- Architectural Institute of Japan, AIJ. (2006). *Recommendations of Loads on Buildings, Ch. 6 Wind Loads*. Architectural Institute of Japan. Tokio, Japón.
- Burt, S. (2012). *The Weather Observer's Handbook*. Cambridge University Press, Nueva York.
- Dregger, P. (2005). *How to Approximate Wind Velocities at Roof Level*. The Wind Investigator. California, EE.UU.
- Durst, C. S. (1960). *Wind Speeds Over Short Periods of Time*. The Meteorological Magazine, Vol. 86, No. 1056.
- Hunter, R.S. (1999). *Recommended Practices for Wind Turbine Testing – 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry*. Renewable Energy Systems Ltd. Glasgow, Reino Unido.
- Indian Institute of Technology Kanpur, IITK. (1987). *IS:875 (Part 3): Wind Loads on Buildings and Structures*. Indian Institute of Technology. Kanpur, India.
- Japan Meteorological Agency, JMA. (2013). *Lecture Notes of the JMA/WMO Training Workshop on Calibration and Maintenance of Meteorological Instruments of RAIL, Ch. 4 Measurement of Surface Wind*. Japan Meteorological Agency. Tokio, Japón.
- Nilsson, A. (2010). *The Sodar as a Screening Instrument*. Universidad de Uppsala. Uppsala, Suecia.
- Solari, G. & Kareem, A. (1998). *On the formulation of the ASCE 7-98 Gust Effect Factor*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 77&78, p. 673-684.
- World Meteorological Organization, WMO. (1987). *Instruments and Observing Methods: The Measurement of Gustiness at Routine Wind Stations – A Review*. A.C.M. Beljaars. Ginebra, Suiza
- World Meteorological Organization, WMO. (2008). *Guidelines for Converting Between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions*. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.
- World Meteorological Organization, WMO. (2010). *WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 1.5 Measurement of Surface Wind*. World Meteorological Organization. Ginebra, Suiza.v

Diseño y Diagramación: Euro Rincón Montero,
Centro de Transferencia Tecnológica

Palabras clave: Ingeniería Estructural.



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES



Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica
Programa de Ingeniería Estructural

Tel. (506) 2511-2500 / Fax (506) 2511-4440 / Código Postal 11501-2060
E-mail: direccion@lanamme.ucr.ac.cr / Sitio web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>