

CRITERIO ESTADÍSTICO PARA LA SELECCIÓN DE VELOCIDADES DE VIENTO PARA EL DISEÑO DE ARMADURAS DE TECHO

STATISTICAL APPROACH FOR THE SELECTION OF WIND SPEEDS FOR THE DESIGN OF ARMORS OF ROOF

ARROYO, A. ORLANDO^{1*} M.Sc., RAMOS, C. LILIBETH² Est. Ing. Civil

¹ Docente Universidad de Sucre, Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Civil, Colombia. ² Ingeniería Civil, Universidad de Sucre, Colombia.

* Correspondencia: orlando.arroyo@gmail.com

Recibido: 01-09-2011; Aceptado: 19-01-2012.

Resumen

Las armaduras de techo comúnmente utilizadas en estructuras localizadas en zonas a campo abierto deben ser diseñadas para cargas de viento. En el caso colombiano estas cargas se obtienen a partir de velocidades establecidas en el reglamento de diseño NSR-10. Estas velocidades fueron prescritas a partir de estudios realizados en 1987 y no han sido actualizadas desde su inclusión en el Reglamento NSR-98. Este artículo propone un criterio estadístico para la selección de las velocidades de diseño basado en el análisis estadístico mediante una distribución Weibull de la información eólica regional más reciente. Los resultados muestran que las velocidades de viento se reducen significativamente con respecto a las propuestas en la NSR-10, trayendo consigo disminuciones en las cargas de diseño de los elementos estructurales.

Palabras clave: Armaduras de techo, distribución Weibull, NSR-10, velocidad de viento.

Abstract

Roof trusses commonly used in open terrain structures must be designed to withstand wind loads. In Colombia, these loads are obtained based on wind speeds specified on colombian's NSR-10. Those speeds are based on research from 1987, and haven't been updated since its inclusion on NSR-98. This article proposes a statistical criterion for selecting the design speed based on statistical analysis using a Weibull distribution of more recent information about regional wind speeds. Results show that wind speeds are significantly reduced compared to those proposed in the NSR-10, allowing reductions in the design loads of the structural elements.

Keywords: Roof trusses, Weibull distribution, NSR-10, wind speed.

Introducción

Las estructuras que se construyen para centros de investigación biológica, zootécnica y agrícola generalmente utilizan armaduras de techo para soportar la cubierta y las cargas que serán aplicadas sobre la misma. Un porcentaje significativo de estas lo representan las cargas de viento, que en el caso colombiano se evalúan de acuerdo con el título B.6 del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente (NSR-10). Para determinar la magnitud de estas fuerzas se emplean las velocidades básicas del viento provistas por el mapa de amenaza eólica de Colombia (ver NSR-10 figura B.6.4-1), el cual corresponde al mismo incluido en la NSR-98 (ver NSR-10 Cap. Prefacio pp. 58) y que fue desarrollado con base en estudios adelantados por Consultoría Colombiana Ltda. (ISA, 1987) y Fedestructuras (FEDESTRUCTURAS, 1987) a partir de la información meteorológica disponible en 1987.

En la actualidad en Colombia se dispone de un Atlas de Viento y Energía Eólica (UPME e IDEAM, 2004) elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en conjunto con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Este Atlas contiene una serie de mapas con información de la velocidad del viento en el país, los cuales fueron construidos a partir del análisis estadístico de las series de tiempo de 111 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio nacional.

En este artículo se presenta un criterio estadístico para la selección de la velocidad del viento de diseño a partir del análisis de la información disponible en el Atlas citado, que contiene: información acerca de la velocidad del viento en Colombia, presenta el criterio propuesto para la selección de la velocidad del viento, cuyas implicaciones también se señalan, al igual se hace una discusión de resultados y conclusiones.

Resultados y discusión

Información acerca del viento en Colombia

Esquema Institucional: el archivo de información meteorológica de Colombia inició en 1969 con la creación (a partir de las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología) del Sistema Nacional de Meteorología e Hidrología a través del Decreto 2259 del 22 de Octubre de 1976 se creó en Colombia el Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), el cual tuvo entre sus funciones la concepción, diseño, construcción, operación y mantenimiento de las redes de estaciones meteorológicas de

Colombia. La ley 99 de 1993 creó el Ministerio del Medio Ambiente y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que actualmente cuenta con más de 44.000 registros nacionales, así como documentos de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y otros organismos internacionales.

Velocidades de Viento en Colombia

Velocidades de Viento en la NSR-10: el Reglamento de construcción sismoresistente (NSR-10) distingue 5 tipos de regiones con velocidades nominales de diseño que van desde 17m/s (60km/h) en la región 1 hasta 36m/s (130km/h) en la región 5. Estos valores corresponden a los mismos contenidos en la NSR-98, los cuales fueron establecidos a partir de estudios adelantados en 1987 para el diseño de líneas de transmisión (ISA, 1987) y que fueron tomados posteriormente como referencia para el desarrollo del capítulo B.6 de esta normativa (FEDESTRUCTURAS, 1987). Para buena parte del territorio colombiano la NSR-10 recomienda (ver NSR-10 figura B.6.4-1) una velocidad de 28m/s (100km/h), valor fijado inicialmente en el artículo B.6.4.2 del Código Colombiano de Construcción Sismoresistente de 1984 (CCCSR-84) para todo el territorio nacional. La NSR-10 reglamenta mediante el artículo B.6.5.4.2 la posibilidad de utilizar información climática regional para la estimación de la velocidad del viento, estipulando dos condiciones: 1, utilizar procedimientos estadísticos aprobados para el análisis de valores extremos en el tratamiento de los datos; 2, tomar en cuenta la longitud de registros, el error de muestreo, el tiempo promedio, la altura del anemómetro, la calidad de los datos y la exposición del terreno.

Estudios recientes de velocidad del viento: en el año 2004, la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en colaboración con el IDEAM elaboraron el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia [Atlas viento] empleando datos de 111 estaciones de referencia localizadas sobre las zonas Andina y Caribe y 122 datos de frontera localizados en Venezuela, Brasil, Perú, Ecuador, Mar Caribe y Océano Pacífico. En el estudio se utilizaron modelos autoregresivos para completar series temporales incompletas y obtener los parámetros de las distribuciones Weibull que explican la variabilidad del viento en las distintas estaciones meteorológicas.

Producto del procesamiento de la información estadística, el Atlas presenta un conjunto de mapas entre los cuales figura el mapa de distribución multianual de la velocidad media del viento (Anexo). En éste se aprecia que para un porcentaje significativo del territorio nacional se registran velocidades medias inferiores a 5m/s, alcanzando velocidades de 11m/s en la península de la Guajira. Igualmente,

el documento contiene conjunto de mapas que muestran los valores de la desviación estándar y el sesgo de la velocidad del viento para todo el territorio nacional. A partir de éstos es posible observar que para gran parte del territorio colombiano se presentan valores de desviación en el rango de 0 a 2,2m/s con sesgos en el intervalo de 0 a 2.

Criterio Estadístico de selección de la velocidad de viento

Distribución de probabilidad de la velocidad del viento: el desarrollo del Atlas satisface el segundo requisito de B.6.5.4.2, suministrando información acerca de la velocidad media del viento para todo el territorio colombiano. Para satisfacer el primer requisito de B.6.5.4.2 se necesita partir de la distribución de probabilidad de la velocidad del viento. Es de amplia aceptación entre la comunidad científica que el comportamiento de la velocidad del viento puede ajustarse a una distribución de probabilidad Weibull (ELLINGWOOD *et al.*, 1980; SEGURO *et al.*, 2000; BURTON *et al.*, 2001; UPME e IDEAM, 2004; RAMÍREZ Y CARTA, 2005) y que la ocurrencia de un valor extremo de velocidad del viento puede modelarse a partir de la distribución Weibull de dos parámetros (XIAOMA *et al.*, 2006), cuya función de probabilidad acumulada se expresa:

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (1)$$

Donde x es la velocidad del viento, α y β son los parámetros de forma y escala de la distribución, relacionados con la media (μ_x) y desviación estándar (σ_x) de x a partir de:

$$\mu_x = \beta * \tau \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_x = \beta * \sqrt{\tau \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right) - \tau \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)^2} \quad (3)$$

Dividiendo la ecuación (3) entre la ecuación (2), es posible relacionar el parámetro de forma α con el coeficiente de variación de la velocidad del viento x :

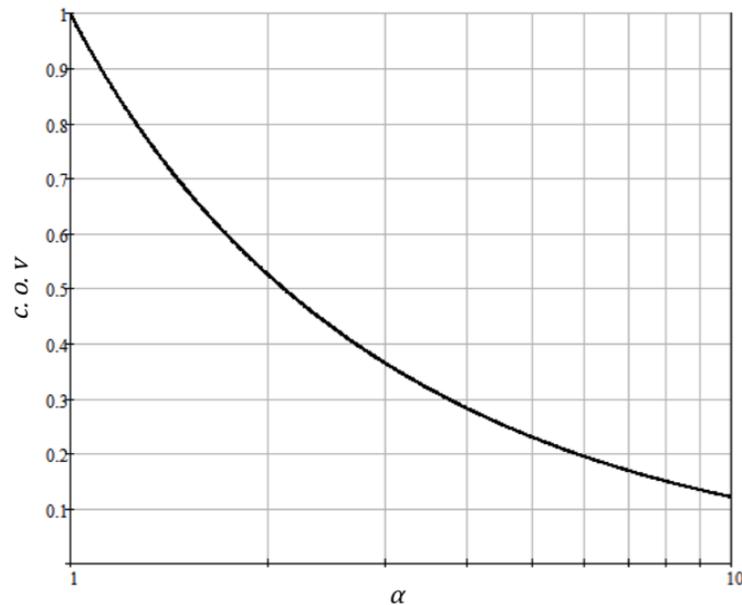


Figura 1. Relación entre el parámetro de forma y el coeficiente de variación.

$$c. o. v = \sqrt{\frac{\tau \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)}{\tau \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)^2} - 1} \quad (4)$$

La gráfica de la ecuación (4) se muestra (Fig. 1), donde se aprecia que el coeficiente de variación es inversamente proporcional al valor de α .

Desarrollo de un criterio estadístico de selección de la velocidad de diseño.

El diseño para cargas de viento de la NSR-10 está basado en las provisiones del ASCE 7-10 (ASCE 7-10), el cual establece que las estructuras deberán diseñarse para una velocidad básica de viento con una probabilidad de excedencia anual del 2%. En este artículo los autores proponen emplear la misma probabilidad de excedencia para seleccionar la velocidad de viento de diseño. Sea p_v , la probabilidad anual de excedencia de un valor de velocidad V determinado, entonces la probabilidad requerida establecida por el ASCE 7-10 es $p_v=1/50$. Por consiguiente, el valor de velocidad de viento para el diseño se obtiene igualando la ecuación (1) a $1-p_v$ y despejando la velocidad x :

$$x = \beta * [\ln(50)]^{1/\alpha} \quad (5)$$

Despejando β de la ecuación (2) y substituyendo en la ecuación (5) se obtiene la velocidad de diseño en términos de la velocidad media y el parámetro α :

$$x = \frac{\mu_x}{\tau \left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)} * [\ln(50)]^{1/\alpha} \quad (6)$$

Considerando que el parámetro α de la distribución puede obtenerse a partir del coeficiente de variación (i.e σ_x/μ_x , ecuación 4) y que la revisión del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia muestra que el mínimo valor de α reportado para distintas estaciones es ligeramente superior a 3, la ecuación (6) puede simplificarse de manera conservadora (del lado de la seguridad) tomando $\alpha = 2.1$, valor que genera un c. o. v =0.5:

$$x = 2.162 * \mu_x \quad (7)$$

Así entonces, la velocidad de diseño V_d para un lugar se obtiene reemplazando la velocidad media μ_x tomada del mapa de velocidad media multianual del Atlas de Viento y Energía Eólica (ver (UPME e IDEAM, 2004) (Capítulo 1, pp. 33) en la ecuación (7).

Aplicación del Criterio: para aplicar el criterio propuesto en el presente artículo se seleccionó una correa de la armadura de techo que se muestra (Fig. 2). El propósito de seleccionar este tipo de elemento es determinar las implicaciones del criterio propuesto sobre los valores del efecto que genera el viento sobre la cercha. Para ello se estudiaron cuatro casos de carga para la ciudad de Barranquilla: 1. Cubierta de inclinación 15° y exposición tipo B, 2. Cubierta de inclinación 30° y exposición tipo B, 3. Cubierta de inclinación 15° y exposición tipo D y 4. Cubierta de inclinación 30° y exposición tipo D. La velocidad media anual de viento para Barranquilla es de 6m/s (ver [Atlas viento]), por consiguiente, la velocidad de diseño de acuerdo con el criterio propuesto (ecuación 7) es 12,96m/s.

El peso de la cubierta es de $0,2 \frac{kN}{m^2}$ y la carga viva es cubierta de $0,35 \frac{kN}{m^2}$. Para el cálculo de las presiones netas de viento se empleó la figura B.6.4-2 y la ecuación B.6.4-1 de la NSR-10. Dado que en esta tabla no figura la velocidad propuesta, las presiones fueron calculadas tomando en cuenta que éstas son proporcionales al cuadrado de la velocidad del viento. Se calculó la carga distribuida sobre la correa para las combinaciones B.2.4-2, B.2.4-3, B.2.4-4 y B.2.4-6 de la NSR-10, modificadas de acuerdo con el Decreto 092 del 17 de Enero de 2011:

$$S = 1.2 D + 0.5 Lr \tag{8}$$

$$S = 1.2 D + 1.6 Lr + 0.5 W \tag{9}$$

$$S = 1.2 D + 1 W + 0.5 Lr \tag{10}$$

$$S = 0.9 D + 1 W \tag{11}$$

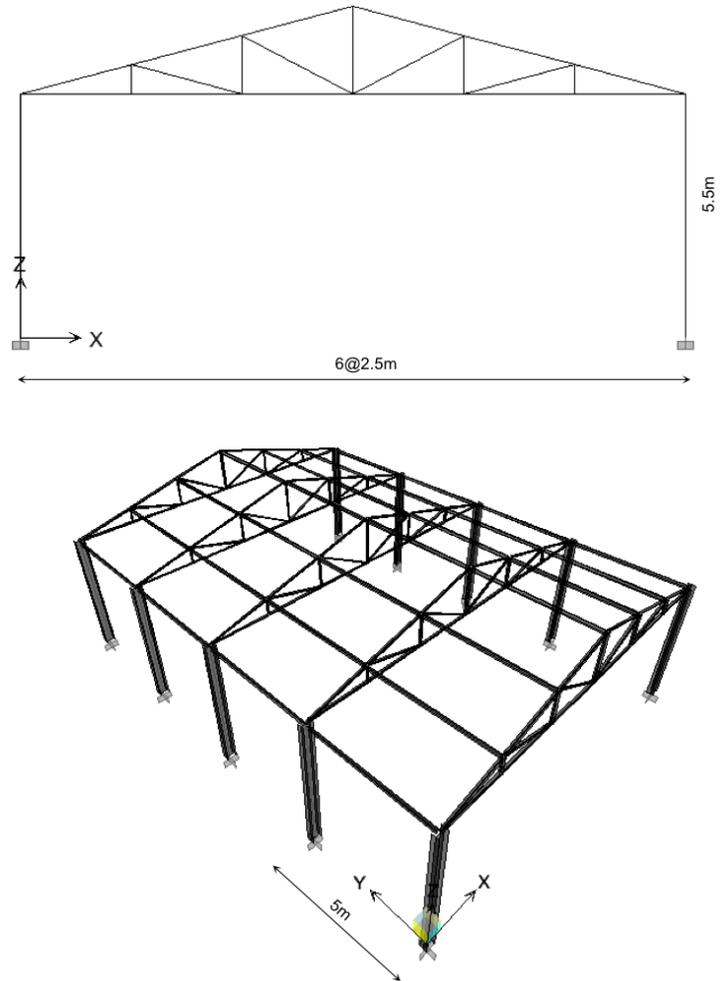


Figura 2. Estructura típica instalación

Donde D representa las cargas muertas sobre la estructura, Lr la carga viva sobre la cubierta y W la carga de viento. Los valores de carga distribuida (en kN/m) sobre la correa, tomando el valor de presión de viento que genera el valor más crítico en las ecuaciones (8, 9, 10 y 11) se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Estudio de casos presentados

Caso	Ec. 8	Ec. 9	Ec. 10	Ec. 11	Diseño
1 – NSR-10	1,04	1,63	0,29	-1,05	UPN 100
1 - CE	1,04	1,95	0,94	0,26	UPN 100
2 – NSR-10	1,04	2,28	1,59	-0,3	UPN 120
2 - CE	1,04	2,04	1,11	0,35	UPN 100
3 – NSR-10	1,04	1,85	-0,35	-1,91	UPN 100
3 - CE	1,04	1,95	-0,93	0,14	UPN 100
4 – NSR-10	1,04	2,43	1,90	-0,35	UPN 120
4 - CE	1,04	2,06	1,15	0,35	UPN 100

Los resultados obtenidos pueden analizarse de acuerdo con la pendiente seleccionada. Para una pendiente de 15° (i.e pendiente representativa de las menores de 30°) se observa un ligero incremento de la carga gravitacional de diseño (ecuación 10), que en el caso de la correa analizada no repercute en un incremento en el perfil seleccionado. Para la ecuación 11, la cual pretende estimar el efecto de un posible levantamiento de la estructura, se aprecia que para las velocidades seleccionadas de acuerdo con el criterio propuesto en el presente artículo, la fuerza de succión del viento no es suficiente para generar cargas en dirección ascendente. Para esta misma situación las velocidades de la NSR-10 generan fuerzas de succión que oscilan entre el 60% y el 103% de la carga gravitacional. Si bien es cierto que para elementos sometidos a flexión como correas la dirección de la fuerza de diseño no es relevante, si resulta significativo al momento de diseñar elementos pertenecientes a la cercha.

Para pendientes en las cuales el viento presiona hacia abajo la estructura (i.e pendientes mayores a 30°), las cargas de diseño obtenidas de la ecuación 10 empleando las velocidades propuestas son menores que las cargas que se generan a partir de las velocidades de la NSR-10. La diferencia entre estas fuerzas se incrementa al pasar de una estructura con exposición tipo B a tipo D.

Conclusiones

Un criterio estadístico basado en información eólica regional de Colombia y el análisis mediante la distribución Weibull para los valores máximos de velocidad ha sido propuesto. Los resultados preliminares del análisis revelan que al utilizarlo para estructuras con pendientes menores a 30° los efectos de succión del viento disminuyen significativamente, dando mayor importancia a las cargas

gravitacionales para el diseño de elementos de cerchas y correas. Para pendientes superiores a 30° , los resultados muestran una disminución entre el 10% y el 20% en el valor de las cargas de diseño, lo cual necesariamente puede verse reflejado en el costo final de la estructura.

Los resultados de este artículo son de carácter preliminar y se requiere una mayor investigación de las implicaciones del criterio a partir de su aplicación para más tipos de estructuras, así como para diferentes localidades de nuestro país. Se invita a diseñadores estructurales, directores de centros de investigación ubicados en áreas rurales y todos aquellos involucrados en proyectos que involucren el diseño de armaduras a utilizar y promover el criterio descrito para el diseño.

Referencias

ASCE STANDARD 7. 2010. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineering. United States of America.

BURTON T, SHARPE D, JENKINS N, BOSSANYI E. 2001. *Wind energy handbook*. Wiley & Sons, West Sussex, England.

CÓDIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE. 1984. Asocia. Bogotá, Colombia.

ELLINGWOOD, B., GALAMBOS, T.V., MACGREGOR, J.G. AND CORNELL, C.A., 1980. *Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58. Bulding Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures*. U.S. Department of Commerce / National Bureau of Standards.

FEDESTRUCTURAS - Federación Colombiana de Fabricantes de Estructuras Metálicas. 1987. *Criterios de Cargas de Viento para el Diseño de Construcciones*. Bogotá. Federación Colombiana de Estructuras Metálicas. Bogotá, Colombia.

ISA - INTERCONEXIÓN ELÉCTRICA S.A.1987. *Normalizado de Estructuras Metálicas – Información Meteorológica Básica para el Diseño de Líneas de Transmisión*. Documento NE-86-02. Bogotá, Colombia.

RAMÍREZ, P.; CARTA, J.A. 2005. Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind speed probability density

distribution: a case study. *Energy Conversion and Management* 46 (15-16): 2419-2438.

REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE NSR-10. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, Colombia.

SEGURO, J.V., LAMBERT, T.W. 2000. *Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 85(1):75-84.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA (UPME), INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). 2004. *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Bogotá, Colombia.

XIAOA, Y.Q.; LI, Q.S.; LI, Z.N; Y.W. 2006. Chow and G.Q. Li. Probability distributions of extreme wind speed and its occurrence interval. *Engineering Structures* 28(8):1173-1181.