

Necesidad de revisión de cargas y factores parciales de la NSR-10 para el diseño de estructuras sometidas a acciones de viento

Orlando Daniel Arroyo Amell¹ y Lilibeth Ramos Castillo ²

Recepción: 15-09-2013 | Aceptación: 20-05-2014 | En línea: 30-01-2015

doi:10.17230/ingciencia.11.21.9

Resumen

Este artículo expone la necesidad de adelantar la revisión de los factores parciales, así como de los valores de velocidad de diseño para las cargas de viento provistos por la NSR-10. Empleando métodos de confiabilidad y la información disponible sobre la velocidad del viento en Colombia se demuestra que los diseños que se obtienen al emplear los factores parciales y el mapa de amenaza eólica prescritos por la NSR-10 carecen de uniformidad en su nivel de seguridad (índice de confiabilidad). También se prueba que no es posible determinar un factor parcial γ_W para la carga de viento que al ser usado junto con el mapa eólico de la normativa actual garantice uniformidad en la seguridad de las estructuras. Además de esto, se exponen argumentos técnicos y socioeconómicos a favor de una revisión conjunta de las velocidades y factores parciales que considere las características eólicas y la realidad colombiana y que conduzca al reajuste de estos valores.

Palabras clave: confiabilidad estructural; calibración de factores parciales; índice de confiabilidad; códigos de diseño; cargas de viento; NSR-10

¹ Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, odarroyo@uc.cl.

² Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, lramos1@uc.cl.

Need for Review of the Loads and Partial Safety Factors of the NSR-10 for the Design of Structures to Withstand Wind Effects

Abstract

This article discusses the need for review of the partial safety factors, as well as the design wind speeds for wind loads provided by the NSR-10. By using reliability methods and available information about the wind speed in Colombia, it is shown that the designs obtained by using the partial safety factors and wind hazard map of Colombia prescribed by the NSR-10 lack uniformity on its security level (reliability index). It is also proven that it is not possible to find a partial safety factor for winds loads capable of ensuring uniformity on the safety level of structures when used with the wind map of current legislation. Finally, technical and socio-economical considerations are given in favor of a joint review of wind speed and partial safety factors, more consistent with wind characteristics and the socioeconomical situation in Colombia.

Key words: structural reliability; calibration of partial safety factors; reliability index; design codes; wind loads; NSR-10

1 Introducción

Los códigos de diseño estructural deben proporcionar tres elementos fundamentales: 1. Valores nominales de cargas para el diseño, 2. Metodologías para el avalúo y análisis de los efectos de las solicitudes sobre las estructuras y 3. Metodologías para el diseño de elementos estructurales. Para el caso del avalúo de las cargas de viento propuesto por la NSR-10, los valores nominales para las velocidades de diseño fueron tomados del prefacio la NSR-98 [1], magnitudes establecidas a partir de estudios adelantados por Consultoría Colombiana Ltda [2] y Fedestructuras [3] en 1987.

Al momento de su publicación, la NSR-10 estableció como metodologías para el análisis y diseño de estructuras sometidas a cargas de viento el procedimiento establecido en el ASCE 7-05 [4] de la American Society of Civil Engineers (ASCE); sin embargo, mediante el Decreto 092 de 2011 [5], modifico su metodología de diseño y adoptó los factores parciales del ASCE 7-10 [6]. Estos factores son incompatibles con la metodología de análisis de cargas (mantenida luego del decreto) puesto que para ser empleados se requieren mapas de amenaza eólica que incorporen el nivel de importancia

de la estructura, es decir, deben utilizarse con velocidades de viento con periodos de retorno distintos al de las velocidades de la normativa colombiana.

Éstas inconsistencias de la NSR-10 entre los tres aspectos involucrados en el diseño estructural para cargas de viento plantean dudas acerca del nivel de seguridad que puede obtenerse a partir del uso de la norma, las cuales se acentúan aún más si consideramos que estudios recientes [7],[8] han demostrado que en países con relaciones μ_V/V_N entre la media de la velocidad máxima anual del viento μ_V y el valor nominal de diseño V_N diferentes a las que se presentan en Estados Unidos, requieren que los comités encargados de sus normativas de diseño adelanten la recalibración de los factores parciales y/o la revisión de las velocidades nominales de diseño.

Para revisar la pertinencia de los factores parciales de la combinación B.2.4-4 y el mapa de amenaza eólica de la NSR-10, este artículo se divide en cinco secciones. En la sección 2 se exponen los principios de calibración de factores parciales. En la sección 3 se exponen los resultados obtenidos del análisis de información acerca del viento realizados por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), los cuales son empleados en la sección 4 para construir un modelo de probabilidad y calcular los índices de confiabilidad que se obtienen al emplear las velocidades de viento y factores parciales especificados en la NSR-10. En la secciones 5 y 6 se analizan y discuten los resultados y se presentan conclusiones y recomendaciones.

2 Confiabilidad estructural y calibración de factores parciales

La probabilidad de que la resistencia de una estructura (R) exceda la solicitud a la cual se encuentra sometida (S) se conoce como confiabilidad estructural. Matemáticamente ésta se calcula a partir de

$$C = P(R \geq S) = 1 - \Phi(-\beta) \quad (1)$$

Donde Φ es la función de probabilidad acumulada de la distribución normal estándar y β es una medida invariante de la seguridad de la estructura

conocida como índice de confiabilidad. Se recomienda a los lectores no familiarizados con el tema la lectura de la referencia [9].

Los factores parciales constituyen una forma práctica de manejar el problema de la confiabilidad estructural. Al emplearlos, ingenieros no familiarizados con el tema o que no disponen de la información estadística necesaria pueden garantizar un nivel de seguridad estructural [10]. El formato de factores parciales empleando en la NSR-10 para el diseño mediante resistencia última se expresa matemáticamente como:

$$\sum \gamma_i Q_i < \phi R_n \quad (2)$$

En esta ecuación, R_n es la resistencia nominal correspondiente al estado límite de interés y Q_i son las cargas nominales. Las magnitudes de estas variables son proporcionadas por los códigos de diseño y resultan familiares para gran cantidad de ingenieros. Los factores ϕ y γ_i son los factores parciales de resistencia y carga, los cuales reflejan: 1. la incertidumbre en las cargas y la resistencia y 2. las consecuencias de la falla de la estructura. Estos factores se escogen por medio de un proceso de optimización en donde son seleccionados aquellos que generen diseños con índices de confiabilidad más cercanos a un valor objetivo β_{obj} previamente establecido. Este proceso se conoce como *calibración de factores parciales*. En éste artículo se empleó el método FORM para el cálculo del índice de confiabilidad [9] y una penalización asimétrica ponderada para verificar la uniformidad en los niveles de seguridad que proporcionan los factores parciales [11]. Los índices de confiabilidad objetivo fueron adaptados de [12], los cuales son un estándar internacional a nivel de códigos de diseño. Los factores parciales de la NSR-10, adoptados del ASCE 7-10 se encuentran calibrados para $\beta_{obj} = 2,5$ para combinaciones que involucran cargas de viento.

3 Información acerca del viento en Colombia

3.1 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. En 1976

a través del Decreto No. 2259 del 22 de Octubre 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 44000 registros nacionales, así como documentos de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) y otros organismos internacionales.

3.2 Velocidades de viento en Colombia

El Reglamento de construcción sismoresistente (NSR-10) distingue 5 tipos de regiones con velocidades nominales de diseño que van desde 17 m/s (60 km/h) en la región 1 hasta 36 m/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 torres de líneas de transmisión [2], los cuales fueron tomados posteriormente como referencia para el desarrollo del capítulo B.6 de esta normativa [3]. Para buena parte del territorio colombiano la NSR-10 recomienda (ver [1] Figura B.6.4-1) una velocidad de 28 m/s (100km/h), valor fijado inicialmente en el artículo B.6.4.2 del Código Colombiano de Construcción Sismoresistente (CCCSR) [13] 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.

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 [14] 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 emplearon 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 (ver anexos del Atlas). En éste se aprecia que para un porcentaje significativo del territorio nacional se registran velocidades medias inferiores a 5 m/s, alcanzando velocidades de 11 m/s en la península de la Guajira. Igualmente, el documento contiene un 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 2.2 m/s con sesgos en el intervalo de 0 a 2. Para propósitos del presente artículo se escogieron 5 estaciones: Apto. C. Daza (N. de Santander, Región 1), Turipana (Córdoba, Región 2), Puerto Bolívar (La Guajira, Región 3), Carmen de Bolívar (Bolívar, Región 4) y Repelón (Atlántico, Región 5).

4 Análisis de confiabilidad: verificación del índice de confiabilidad objetivo de la NSR-10 para cargas de viento

4.1 Análisis de cargas de viento en la NSR-10

El procedimiento de análisis de viento de la NSR-10 fue actualizado con respecto al presentado en la NSR-98, adoptándose las disposiciones del ASCE 7-05 [4]. La combinación B.2.4-4 (tomada del ASCE 7-10 [6]), que actualmente es empleada para el diseño de elementos sometidos a cargas de viento y cuya pertinencia es objeto de revisión en el presente estudio estipula:

$$\phi R_n \geq 1,2D_n + 1,0W_n + 1,0L_n \quad (3)$$

Donde ϕ es el factor parcial de resistencia y R_n , D_n , W_n y L_n son los valores nominales de resistencia, carga muerta, carga de viento y carga viva. Conviene mencionar que al momento de ser publicada la NSR-10 en Marzo de ése año, se estipuló un factor parcial para carga de viento $\gamma_w = 1,6$, cambiado a $\gamma_w = 1,0$ por medio del Decreto 092 de Enero de 2011 [5], coincidiendo con el del ASCE 7-10.

Sin embargo, en el ASCE la reducción de $\gamma_W = 1,6$ (ASCE 7-05) a $\gamma_W = 1,0$ (ASCE 7-10) se realizó de manera conjunta con otros dos cambios significativos que no fueron considerados en la NSR-10: 1. Se pasó de un

único mapa de velocidades de viento a tres mapas con distintos periodos de retorno y 2. Se actualizó la metodología de análisis de cargas de viento acorde a estos mapas. Nótese que a diferencia de los realizado en Colombia, el cambio del γ_W en el ASCE fue el resultado de un proceso de análisis que inició en 1999 [15] y concluyó en el año 2010 [16], y en la cual fue necesario obtener nuevas velocidades de diseño y desarrollar una nueva metodología de análisis.

4.2 Distribución de probabilidad de la presión de viento

Los valores de velocidad de viento se convierten en presión de viento empleando la expresión

$$W = \frac{1}{2} \rho c V^2 \quad (4)$$

Donde W es la presión de viento, ρ es la densidad del aire, V es la velocidad del viento y c es un coeficiente aerodinámico que toma en consideración la forma, turbulencia y exposición. Considerando la naturaleza cuadrática de la relación, el coeficiente de variación de la presión V_W puede obtenerse por medio de una aproximación de segundo orden [17]:

$$V_W^2 = V_f^2 + V_t^2 + V_e^2 + 4V_V^2 \quad (5)$$

Los tres primeros términos de la ecuación (5) representan el coeficiente de variación asociado a la forma, ráfaga y exposición, y su suma ha sido estimada en 0.045 [17]. En ausencia de un registro más detallado, para el presente estudio los valores del coeficiente de variación de la velocidad V_V para las 5 estaciones seleccionadas se obtuvieron a partir de los valores reportados en la referencia [14]. Estudios previos [12] han encontrado que la incorporación de la incertidumbre de los coeficientes aerodinámicos conduce al ajuste estadístico de la presión de viento mediante una distribución Gumbel, cuyas funciones de densidad y probabilidad acumulada son:

$$f(x) = \frac{1}{\beta} \exp \left[\frac{x - \alpha}{\beta} - \exp \left(\frac{x - \alpha}{\beta} \right) \right] \quad (6)$$

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \exp \left(\frac{x - \alpha}{\beta} \right) \right] \quad (7)$$

Los parámetros α y β de la distribución pueden obtenerse a partir de sus relaciones con la media μ y la desviación estándar σ de la variable x :

$$\mu = \alpha - \gamma\beta \quad (8)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{6}\pi^2\beta^2 \quad (9)$$

4.3 Metodología de verificación

Para revisar la pertinencia de un conjunto de factores parciales se requiere calcular la confiabilidad que estos generan para distintos escenarios de carga. Con tal propósito, se asigna un valor unitario a la carga muerta nominal (D_n) y se construye el problema de confiabilidad considerando relaciones entre ésta y las demás cargas involucradas en la combinación. Por ejemplo, tomando relaciones $\frac{W_n}{D_n} = 0,5$ y $\frac{L_n}{D_n} = 0,5$ y asignando $D_n = 1$ y a $\phi = 0,9$, a partir de los factores parciales de carga indicados por la NSR-10 para viento en la ecuación (3) se despeja $R_n = 2,22$. Luego se procede a calcular las medias y la desviaciones estándar de éstas variables y se evalúa la confiabilidad.

Las relaciones entre los valores nominales y las medias, así como la información estadística para la resistencia y las cargas viva y muerta fueron tomados a partir de valores obtenidos por Ellingwood et al [12], los cuales son considerados como un referente internacional con variaciones mínimas entre distintos países, dada la naturaleza de éstas variables.

Para la carga de viento se consideró la información de velocidades del registro meteorológico de cinco estaciones distribuidas en el territorio colombiano, pertenecientes a cada una de las regiones especificadas en el mapa eólico de la NSR-10: Aeropuerto C. Daza (región 1), Turipaná (región 2), La Selva (región 3), Carmen de Bolívar (región 4) y Repelón (región 5). A partir de la información acerca de las distribuciones de probabilidad para

los valores de las medias horarias multianuales reportadas en [14] se emplearon simulaciones de MonteCarlo para calcular el valor con probabilidad anual de excedencia de 2%, que corresponde a un periodo de retorno de 50 años. Este valor fue transformado en velocidad de ráfaga de 3s (μ_V) a partir del procedimiento descrito por Valencia [18]. La relación $\frac{\mu_W}{W_n}$ puede obtenerse a partir de $\left(\frac{\mu_V}{V_n}\right)^2$ y $\sigma_W = V_W \mu_W$ (con V_W obtenido de Ec. 5). Para todos los casos, V_n se calcula a partir de la velocidad establecida en la NSR-10. La Tabla 1 resume la información estadística empleada para el análisis de confiabilidad. Se especifican los valores para cada una de las estaciones consideradas:

Tabla 1: Información estadística de las variables

| Variable | Media | V | Distribución |
|---------------------|-------------|------|--------------|
| Resistencia | $1,05R_n$ | 0.1 | Normal |
| Carga Muerta | $1,05D_n$ | 0.12 | Normal |
| Carga Viva | $1,0L_n$ | 0.25 | Gumbel |
| Carga Viento Reg. 1 | $0,099W_n$ | 0.75 | Gumbel |
| Carga Viento Reg. 2 | $0,0079W_n$ | 0.58 | Gumbel |
| Carga Viento Reg. 3 | $0,098W_n$ | 0.27 | Gumbel |
| Carga Viento Reg. 4 | $0,004W_n$ | 0.29 | Gumbel |
| Carga Viento Reg. 5 | $0,0064W_n$ | 0.39 | Gumbel |

Para tomar en cuenta distintos escenarios potenciales de cargas, se consideraron relaciones de $\frac{W_n}{D_n}$ y $\frac{L_n}{D_n}$ entre 0.25 y 5 [12]. Para evaluar el nivel de aptitud de los factores parciales de la ecuación (3) para producir diseños con índices cercanos al índice de confiabilidad objetivo se empleó una función de penalización asimétrica ponderada [19]:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [1,25(\beta_{obj} - \beta_{ij}) + \exp(-1,25 \cdot (\beta_{obj} - \beta_{ij})) - 1] \cdot w_{ij} \quad (10)$$

Donde β_{obj} es el índice de confiabilidad objetivo, β_{ij} el índice de confiabilidad para la combinación i, j de relaciones de carga, w_{ij} es el peso asignado para dichas relaciones y Ψ es un indicativo de ajuste que disminuye a medida que los índices β_{ij} de un conjunto de factores se encuentran más cerca a β_{obj} . A pesar que existen otras funciones, ésta fue seleccionada

porque aplica mayor penalización a los valores de β_{ij} inferiores a β_{obj} , privilegiando las combinaciones de factores parciales que se encuentran del lado de la seguridad. Se considera que valores de Ψ entre 0 y 100 son aceptables para calibrar factores parciales en combinaciones con tres tipos de carga.

En éste artículo se tomó como referencia el valor de $\beta_{obj} = 2,5$ propuesto por Ellingwood et al. [12] para cargas de viento, a pesar que existen estudios que demuestran [20],[21] que el índice de confiabilidad objetivo de un código debe determinarse a partir el índice de calidad de vida del país donde será empleado como norma de diseño. Los pesos w_{ij} fueron adaptados de [12],[7] y se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2: Pesos de las relaciones de carga

| w_{ij} | W_n/D_n | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----|----|-----|----|----|----|----|
| | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 5 | |
| L_n/D_n | 0.25 | 40 | 10 | 20 | 25 | 35 | 7 | 3 |
| | 0.5 | 10 | 20 | 30 | 35 | 45 | 17 | 13 |
| | 1 | 20 | 30 | 40 | 45 | 55 | 27 | 23 |
| | 1.5 | 25 | 35 | 45 | 50 | 60 | 32 | 28 |
| | 2 | 35 | 45 | 55 | 60 | 70 | 42 | 38 |
| | 3 | 7 | 17 | 27 | 32 | 42 | 14 | 10 |
| | 5 | 3 | 13 | 23 | 28 | 38 | 10 | 6 |

4.4 Resultados

Las Tablas 3 a 7 presentan los índices de confiabilidad obtenidos con el método FORM empleando los factores parciales de la NSR-10(Ec. 3).

Tabla 3: Índices de confiabilidad para la estación 1

| β_{ij} | | W_n/D_n | | | | | | | |
|--------------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 5 | |
| L_n/D_n | 0.25 | NSR-10 | 3.16 | 4.08 | 5.21 | 5.80 | 6.09 | 6.34 | 6.49 |
| | | NSR-10* | 2.68 | 3.35 | 4.26 | 4.76 | 4.99 | 5.16 | 5.25 |
| | 0.5 | NSR-10 | 2.77 | 3.59 | 4.72 | 5.44 | 5.86 | 6.23 | 6.44 |
| | | NSR-10* | 2.36 | 2.94 | 3.82 | 4.41 | 4.78 | 5.07 | 5.21 |
| | 1 | NSR-10 | 2.17 | 2.79 | 3.73 | 4.44 | 5.00 | 5.78 | 6.30 |
| | | NSR-10* | 1.88 | 2.31 | 3.00 | 3.55 | 3.99 | 4.65 | 5.10 |
| | 1.5 | NSR-10 | 1.83 | 2.33 | 3.12 | 3.74 | 4.26 | 5.06 | 6.04 |
| | | NSR-10* | 1.61 | 1.94 | 2.51 | 2.98 | 3.37 | 4.02 | 4.85 |
| | 2 | NSR-10 | 1.62 | 2.04 | 2.73 | 3.28 | 3.74 | 4.49 | 5.55 |
| | | NSR-10* | 1.44 | 1.71 | 2.20 | 2.60 | 2.96 | 3.55 | 4.41 |
| | 3 | NSR-10 | 1.38 | 1.70 | 2.24 | 2.69 | 3.08 | 3.73 | 4.72 |
| | | NSR-10* | 1.24 | 1.45 | 1.82 | 2.14 | 2.43 | 2.93 | 3.71 |
| | 5 | NSR-10 | 1.15 | 1.36 | 1.75 | 2.09 | 2.39 | 2.91 | 3.72 |
| | | NSR-10* | 1.06 | 1.19 | 1.45 | 1.68 | 1.90 | 2.28 | 2.90 |

Nota: NSR-10* indica luego del Decreto 092

Tabla 4: Índices de confiabilidad para la estación 2

| β_{ij} | | W_n/D_n | | | | | | | |
|--------------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 5 | |
| L_n/D_n | 0.25 | NSR-10 | 3.24 | 4.23 | 5.50 | 6.26 | 6.76 | 7.37 | 7.96 |
| | | NSR-10* | 2.76 | 3.51 | 4.61 | 5.37 | 5.92 | 6.64 | 7.41 |
| | 0.5 | NSR-10 | 2.83 | 3.70 | 4.93 | 5.76 | 6.34 | 7.07 | 7.76 |
| | | NSR-10* | 2.43 | 3.06 | 4.05 | 4.79 | 5.37 | 6.20 | 7.12 |
| | 1 | NSR-10 | 2.21 | 2.86 | 3.85 | 4.60 | 5.20 | 6.12 | 7.23 |
| | | NSR-10* | 1.92 | 2.38 | 3.13 | 3.73 | 4.24 | 5.05 | 6.20 |
| | 1.5 | NSR-10 | 1.86 | 2.38 | 3.21 | 3.86 | 4.40 | 5.26 | 6.46 |
| | | NSR-10* | 1.64 | 2.00 | 2.61 | 3.11 | 3.55 | 4.26 | 5.34 |
| | 2 | NSR-10 | 1.64 | 2.08 | 2.80 | 3.37 | 3.86 | 4.65 | 5.81 |
| | | NSR-10* | 1.46 | 1.76 | 2.28 | 2.71 | 3.09 | 3.74 | 4.73 |
| | 3 | NSR-10 | 1.39 | 1.73 | 2.29 | 2.76 | 3.17 | 3.85 | 4.89 |
| | | NSR-10* | 1.26 | 1.48 | 1.88 | 2.22 | 2.53 | 3.07 | 3.92 |
| | 5 | NSR-10 | 1.16 | 1.38 | 1.79 | 2.14 | 2.45 | 2.99 | 3.84 |
| | | NSR-10* | 1.07 | 1.22 | 1.49 | 1.74 | 1.97 | 2.37 | 3.04 |

Nota: NSR-10* indica luego del Decreto 092

Tabla 5: Índices de confiabilidad para la estación 3

| β_{ij} | | W_n/D_n | | | | | | | |
|--------------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 5 | |
| L_n/D_n | 0.25 | NSR-10 | 3.16 | 4.09 | 5.29 | 5.99 | 6.46 | 7.02 | 7.55 |
| | | NSR-10* | 2.68 | 3.36 | 4.35 | 5.02 | 5.50 | 6.13 | 6.77 |
| | 0.5 | NSR-10 | 2.77 | 3.59 | 4.76 | 5.53 | 6.07 | 6.74 | 7.37 |
| | | NSR-10* | 2.36 | 2.95 | 3.85 | 4.52 | 5.04 | 5.77 | 6.53 |
| | 1 | NSR-10 | 2.17 | 2.79 | 3.74 | 4.46 | 5.03 | 5.90 | 6.90 |
| | | NSR-10* | 1.88 | 2.30 | 3.00 | 3.56 | 4.03 | 4.78 | 5.81 |
| | 1.5 | NSR-10 | 1.83 | 2.33 | 3.12 | 3.75 | 4.27 | 5.09 | 6.22 |
| | | NSR-10* | 1.60 | 1.94 | 2.51 | 2.98 | 3.39 | 4.06 | 5.06 |
| | 2 | NSR-10 | 1.62 | 2.04 | 2.73 | 3.28 | 3.75 | 4.51 | 5.62 |
| | | NSR-10* | 1.43 | 1.71 | 2.19 | 2.60 | 2.96 | 3.57 | 4.49 |
| | 3 | NSR-10 | 1.37 | 1.69 | 2.24 | 2.69 | 3.08 | 3.74 | 4.74 |
| | | NSR-10* | 1.24 | 1.44 | 1.81 | 2.14 | 2.43 | 2.93 | 3.73 |
| | 5 | NSR-10 | 1.15 | 1.36 | 1.75 | 2.09 | 2.39 | 2.91 | 3.73 |
| | | NSR-10* | 1.06 | 1.19 | 1.45 | 1.68 | 1.89 | 2.28 | 2.91 |

Nota: NSR-10* indica luego del Decreto 092

Tabla 6: Índices de confiabilidad para la estación 4

| β_{ij} | | W_n/D_n | | | | | | | |
|--------------|------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 5 | |
| L_n/D_n | 0.25 | NSR-10 | 3.24 | 4.24 | 5.51 | 6.27 | 6.77 | 7.38 | 7.97 |
| | | NSR-10* | 2.76 | 3.52 | 4.62 | 5.38 | 5.93 | 6.66 | 7.43 |
| | 0.5 | NSR-10 | 2.83 | 3.70 | 4.93 | 5.76 | 6.35 | 7.08 | 7.78 |
| | | NSR-10* | 2.43 | 3.07 | 4.06 | 4.80 | 5.38 | 6.22 | 7.14 |
| | 1 | NSR-10 | 2.21 | 2.86 | 3.85 | 4.60 | 5.21 | 6.12 | 7.24 |
| | | ASCE-10 | 1.92 | 2.38 | 3.14 | 3.74 | 4.25 | 5.06 | 6.21 |
| | 1.5 | NSR-10 | 1.86 | 2.38 | 3.21 | 3.86 | 4.40 | 5.27 | 6.47 |
| | | NSR-10* | 1.64 | 2.00 | 2.61 | 3.12 | 3.55 | 4.27 | 5.35 |
| | 2 | NSR-10 | 1.65 | 2.08 | 2.80 | 3.37 | 3.86 | 4.65 | 5.82 |
| | | NSR-10* | 1.46 | 1.76 | 2.28 | 2.72 | 3.10 | 3.74 | 4.74 |
| | 3 | NSR-10 | 1.39 | 1.73 | 2.29 | 2.77 | 3.17 | 3.85 | 4.89 |
| | | NSR-10* | 1.26 | 1.48 | 1.88 | 2.23 | 2.54 | 3.07 | 3.93 |
| | 5 | NSR-10 | 1.16 | 1.39 | 1.79 | 2.14 | 2.45 | 2.99 | 3.84 |
| | | NSR-10* | 1.07 | 1.22 | 1.49 | 1.74 | 1.97 | 2.38 | 3.05 |

Nota: NSR-10* indica luego del Decreto 092

Tabla 7: Índices de confiabilidad para la estación 5

| β_{ij} | | W_n/D_n | | | | | | |
|--------------|---------|-----------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0.25 | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 | 3 | 5 |
| 0.25 | NSR-10 | 3.24 | 4.23 | 5.51 | 6.27 | 6.77 | 7.38 | 7.96 |
| | NSR-10* | 2.76 | 3.52 | 4.62 | 5.38 | 5.92 | 6.65 | 7.42 |
| 0.5 | NSR-10 | 2.83 | 3.70 | 4.93 | 5.76 | 6.34 | 7.07 | 7.77 |
| | NSR-10* | 2.43 | 3.07 | 4.05 | 4.79 | 5.37 | 6.21 | 7.12 |
| 1 | NSR-10 | 2.21 | 2.86 | 3.85 | 4.60 | 5.20 | 6.12 | 7.23 |
| | NSR-10* | 1.92 | 2.38 | 3.13 | 3.74 | 4.24 | 5.06 | 6.20 |
| 1.5 | NSR-10 | 1.86 | 2.38 | 3.21 | 3.86 | 4.40 | 5.26 | 6.46 |
| | NSR-10* | 1.64 | 2.00 | 2.61 | 3.11 | 3.55 | 4.27 | 5.35 |
| 2 | NSR-10 | 1.65 | 2.08 | 2.80 | 3.37 | 3.86 | 4.65 | 5.81 |
| | NSR-10* | 1.46 | 1.76 | 2.28 | 2.71 | 3.10 | 3.74 | 4.73 |
| 3 | NSR-10 | 1.39 | 1.73 | 2.29 | 2.76 | 3.17 | 3.85 | 4.89 |
| | NSR-10* | 1.26 | 1.48 | 1.88 | 2.23 | 2.54 | 3.07 | 3.92 |
| 5 | NSR-10 | 1.16 | 1.39 | 1.79 | 2.14 | 2.45 | 2.99 | 3.84 |
| | NSR-10* | 1.07 | 1.22 | 1.49 | 1.74 | 1.97 | 2.37 | 3.04 |

Nota: NSR-10* indica luego del Decreto 092

5 Análisis y discusión de resultados

La revisión de las Tablas 3 a 7 permite establecer, en primera instancia, que los índices de confiabilidad que se obtienen al emplear las velocidades de diseño y factores parciales de la NSR-10 se desvían significativamente del índice objetivo para una cantidad importante de situaciones, entre las cuales se encuentra aquellas que presentan los mayores pesos de acuerdo con la Tabla 1. Igualmente se aprecia que para relaciones bajas de $\frac{W_n}{D_n}$ existen situaciones en las cuales el índice de confiabilidad se encuentra cerca de 1, mientras que para relaciones altas se presentan valores cercanos a 8; siendo los primeros inaceptables desde el punto de vista de la seguridad y los segundos desde una perspectiva económica.

En segunda instancia, resulta de especial interés la gran sensibilidad que posee el índice a las relaciones $\frac{W_n}{D_n}$ y $\frac{L_n}{D_n}$, distinguiéndose de manera clara dos tendencias: 1. Un aumento a medida que la relación $\frac{W_n}{D_n}$ incrementa y 2. Una disminución a medida que $\frac{L_n}{D_n}$ aumenta. La primera tendencia se explica con base en las relaciones entre las medias y los valores nominales de la Tabla 1, en las cuales se aprecia que $\frac{\mu_R}{R_n} \gg \frac{\mu_W}{W_n}$, por consiguiente y, como se muestra en la Figura 1, a medida que se va incrementando la relación $\frac{W_n}{D_n}$, la media de la resistencia (μ_R) va aumentando con una pendiente mucho mayor que la media de la carga de viento (μ_W), lo cual genera un aumento en el índice de confiabilidad.

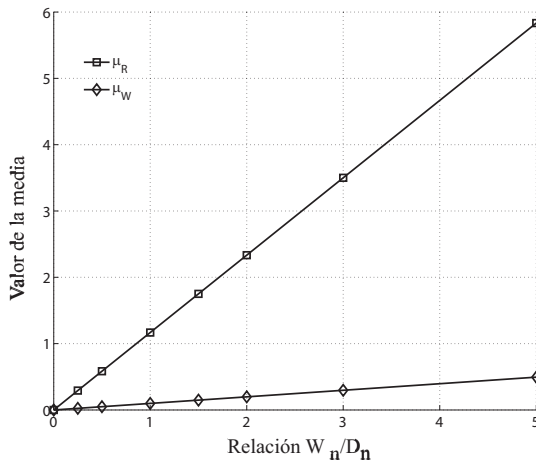


Figura 1: Contribución marginal de $\frac{W_n}{D_n}$ a μ_R y μ_W

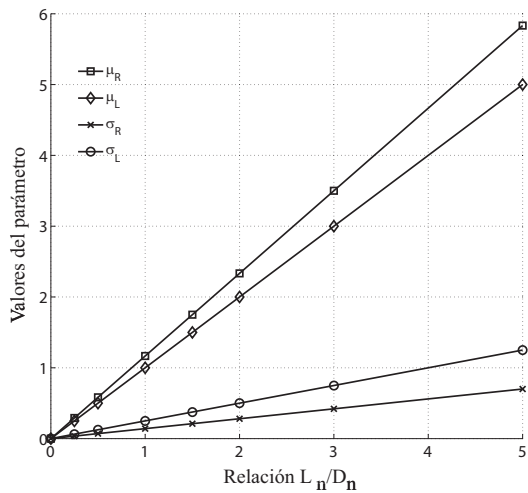


Figura 2: Contribución marginal de $\frac{L_n}{D_n}$ a los estadísticos de resistencia y carga viva

La segunda tendencia se explica tomando en cuenta que $\frac{\mu_R}{R_n} \approx \frac{\mu_L}{L_n}$ y $V_L = 2,5V_R$, lo cual implica que a medida que la relación $\frac{L_n}{D_n}$ va aumentando

la diferencia entre la desviación estándar de la carga viva y la resistencia es mayor, trayendo consigo una disminución en el índice de confiabilidad. Estas tendencias se muestran en la Figura 2.

Al aplicar la ecuación 10 a los valores obtenidos en las Tablas 3 a 7 se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla 8: Valores de Ψ para las estaciones analizadas

| Estación | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|--------|------|--------|--------|--------|
| Ψ | 1120.9 | 1427 | 1264.7 | 1433.3 | 1429.4 |

El análisis de los valores Ψ obtenidos permite establecer que los factores parciales de la NSR-10 para cargas de viento no resultan apropiados para Colombia, e incluso hacen razonable pensar que con las actuales velocidades nominales de diseño no es posible determinar un γ_W que garantice un nivel adecuado de uniformidad en el índice de confiabilidad objetivo (i.e valores de Ψ alrededor de 50). Para probar esta afirmación los autores variaron el factor γ_W de la ecuación 3 dentro del rango para el cual se especifican los factores parciales, obteniendo el respectivo valor de Ψ para la estación ubicada en la zona 1, tal como como se muestra en la Figura 3.

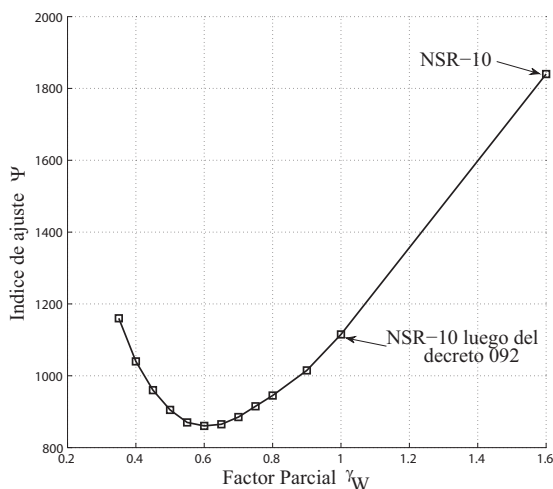


Figura 3: Valores de Ψ para diferentes γ_W

Los resultados muestran que un factor $\gamma_W = 0,60$ proporciona el menor valor de $\Psi = 860,36$, el cual continúa siendo alto e implica que los índices de confiabilidad que se obtienen a partir de su aplicación presentan el mismo comportamiento descrito para los obtenidos con $\gamma_W = 1$ y $\gamma_W = 1,6$.

El hecho que el valor óptimo de Ψ para una serie de valores γ_W típicos para factores parciales de carga de viento sea elevado, se explica a partir de las bajas relaciones $\frac{\mu W}{W_n}$ que se presentan entre los valores medios de las velocidades máximas obtenidos a partir del Atlas eólico de Colombia [14] y los valores nominales especificados en la NSR-10. Esto evidencia la necesidad de adelantar una revisión de las velocidades nominales de diseño W_n del mapa de amenaza eólica y calibrar de manera apropiada los factores parciales asociados.

Con base en los resultados obtenidos, conviene formularse las siguientes preguntas acerca de los hechos a partir de los cuales fueron establecidos los factores parciales y las velocidades de diseño de la NSR-10:

- ¿Es pertinente emplear para el diseño de todo tipo de edificaciones las velocidades de viento que fueron prescritas en 1987 para diseñar torres de líneas de transmisión, estructuras sobre las cuales el viento impone una gran demanda a nivel estructural y cuya falla acarrea pérdidas y consecuencias de gran envergadura?
- ¿Es pertinente modificar los factores parciales y las metodologías de avalúo de cargas sin ajustar los valores nominales de diseño?

La primera pregunta puede enfocarse desde dos perspectivas diferentes:

1. Desde el procedimiento de desarrollo de códigos: en la formulación de valores nominales de cargas y la calibración de factores parciales de un código de diseño debe tomarse en cuenta el tipo de estructuras para las cuales será prescrito [12],[11]. El mapa de amenaza eólica de la NSR-10 no cumple con estas características [2].
2. Desde la perspectiva del riesgo aceptable de una estructura: Diversos autores han formulado planteamientos con base en consideraciones socioeconómicas [22],[21], los cuales tienen en común el principio que toda estructura trae consigo un riesgo para la vida humana, y que es la

sociedad como un conjunto quien puede y debe decidir la forma como maneja dicho riesgo. Tomando como premisa que sólo una sociedad que invierte de manera eficiente en el control del riesgo puede mejorar su calidad de vida y su seguridad [23], corresponde a las comisiones encargadas de definir cualquier medida de control del riesgo ir más allá del análisis técnico, considerar las condiciones socioeconómicas de un país y el impacto que dicha medida tiene sobre el desarrollo de la nación a largo plazo. La revisión y actualización de las medidas de control del riesgo es una labor que debe adelantarse para responder a cambios en las necesidades de un país. Las consecuencias de la falla de una línea de transmisión difieren significativamente en su magnitud de las que se generan por la falla de otros tipos de estructuras.

La segunda pregunta resulta más sencilla de dilucidar si se toma como referencia los cambios introducidos para el avalúo de cargas de viento en el estándar ASCE 7-10 con respecto al ASCE 7-05, en donde es posible apreciar que de manera integral se redujo el factor parcial para el viento, se modificaron las velocidades de diseño y se cambió ligeramente la metodología de avalúo de cargas de viento.

6 Conclusiones

Información eólica reciente revela que las velocidades del viento a lo largo del territorio colombiano difieren significativamente de las velocidades de diseño prescritas en el mapa de amenaza eólica de la NSR-10, el cual no ha sido modificado desde 1987. En consecuencia, la aplicación de esta norma en el diseño para cargas de viento trae consigo problemas de uniformidad en el índice de confiabilidad (nivel de seguridad) que se obtiene para distintos tipos de estructuras y situaciones de carga. Los resultados obtenidos muestran la existencia de situaciones que van desde lo inaceptable desde el punto de vista de la seguridad, hasta lo inaceptable financieramente. Por consiguiente, se concluye que no es pertinente aplicar los factores parciales de la combinación B.2.4-4 conjuntamente con el mapa de amenaza eólica de la NSR-10

Así mismo, el análisis muestra que la falta de uniformidad puede reducirse si se emplea el factor $\gamma_W = 0,6$; sin embargo, para lograr niveles

de seguridad más homogéneos es necesario adelantar de manera integral la calibración de nuevos factores parciales de carga y la elaboración de un nuevo mapa de amenaza eólica con base en registros actualizados de velocidad del viento en Colombia. Al momento de adelantar dicha labor, los autores recomiendan tomar en consideración que el proceso de formulación de un código va más allá de un análisis técnico y sugieren la definición un nivel de seguridad (β_{obj}) acorde con las necesidades y expectativas sociales y económicas del país.

Referencias

- [1] C. asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes, “Reglamento colombiano de construcción sismoresistente nsr-10,” 2010. [Online]. Available: <http://www.actiweb.es/jorgeluisguesso/archivo1.pdf> 178, 181
- [2] I. I. E. S.A., “Normalizado de estructuras metálicas – información meteorológica básica para el diseño de líneas de transmisión, documento ne-86-02,” 1987. 178, 181, 191
- [3] F. Federación Colombiana de Fabricantes de Estructuras Metálicas, “Criterios de cargas de viento para el diseño de construcciones,” 1987. 178, 181
- [4] A. S. 7, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, 2005. 178, 182
- [5] C. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, “Decreto 092 de 2011,” 2011. [Online]. Available: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=41340#0> 178, 182
- [6] A. S. 7, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers, 2010. 178, 182
- [7] A. T. Beck and A. C. d. Souza Jr, “A first attempt towards reliability-based calibration of brazilian structural design codes,” *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 32, no. 2, pp. 119–127, 2010. 179, 186
- [8] N. Lakshmanan, S. Gomathinayagam, P. Harikrishna, A. Abraham, and S. C. Ganapathi, “Basic wind speed map of india with longterm hourly wind data,” *Current Science*, vol. 96, no. 7, pp. 911–922, 2009. [Online]. Available: <http://indiaenvironmentportal.org.in/files/wind%20speed%20data.pdf> 179

- [9] M. Sánchez, *Introducción a la Confiabilidad y la Evaluación de Riesgos: Teoría y aplicaciones en Ingeniería*, 1st ed. Ediciones Uniandes, 2005. 180
- [10] B. Ellingwood and T. V. Galambos, “Probability-based criteria for structural design,” *Structural Safety*, vol. 1, no. 1, pp. 15–26, 1982–1983. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0167473082900121> 180
- [11] N. Gayton, A. Mohamed, J. Sorensen, M. Pendola, and M. Lemaire, “Calibration methods for reliability-based design codes,” *Structural Safety*, vol. 26, no. 1, pp. 91 – 121, 2004. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167473003000249> 180, 191
- [12] E. Bruce, G. Theodore, M. James, and C. Cornell, *Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58: Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures*, ser. National Bureau of Standards special publication. U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1980, no. no. 577. [Online]. Available: <http://books.google.com.co/books?id=KvchPLsPwZ8C> 180, 183, 184, 185, 186, 191
- [13] C. asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes, “Código colombiano de construcción sismoresistente,” 1984. 181
- [14] I. de Hidrología, M. y Estudios Ambientales (IDEAM), and U. de Planeación Minero Energética (UPME), “Atlas de viento y energía eólica de colombia,” 2006. 181, 183, 185, 191
- [15] B. Ellingwood and P. Tekie, “Wind load statistics for probability-based structural design,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 125, no. 4, pp. 453–463, 1999. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:4\(453\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:4(453)) 183
- [16] P. Vickery, D. Wadhera, J. Galsworthy, J. Peterka, P. Irwin, and L. Griffis, “Ultimate wind load design gust wind speeds in the united states for use in asce-7,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 136, no. 5, pp. 613–625, 2010. [Online]. Available: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000145](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000145) 183
- [17] A. publication for the Joint Committee on Structural Safety (JCSS), *Probabilistic Assessment of Existing Structures*, ser. RILEM Publications. RILEM, 2001. [Online]. Available: <http://books.google.com.co/books?id=aTTWQM7ZvY8C> 183

- [18] G. V. Clement, *Acción del viento sobre las estructuras*. Universidad Nacional de Colombia, 2002. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books?id=mds_dE6ICUoC 185
- [19] N. C. Lind, “Reliability-based structural codes, practical calibration,” *In Safety of structures under dynamic loading*, pp. 149–160, 1977. 185
- [20] O. Ditlevsen, “Structural reliability codes for probabilistic design—a debate paper based on elementary reliability and decision analysis concepts,” *Structural Safety*, vol. 19, no. 3, pp. 253 – 270, 1997, devoted to the work of the Joint Committee on Structural Safety. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016747309700009X> 186
- [21] R. Rackwitz, “Optimization—the basis of code-making and reliability verification,” *Structural Safety*, vol. 22, no. 1, pp. 27 – 60, 2000. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167473099000375> 186, 191
- [22] M. Sanchez and R. Rackwitz, “Optimization and the life quality index as an alternative for the development of new design regulations,” *Structural Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 19–30, 2002. 191
- [23] R. Rackwitz, “Optimization and risk acceptability based on the life quality index,” *Structural Safety*, vol. 24, no. 2–4, pp. 297 – 331, 2002. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167473002000292> 192