

Ciencia Nicolaita 87

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Respuesta dinámica de Torres Auto-soportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico

Dynamic response of Self-supporting Towers using synthetic histories of hurricane and atmospheric wind

Hugo Hernández Barrios* y Carlos M. Patlán Manjarrez

Para citar este artículo: Hernández Barrios Hugo y Patlán Manjarrez Carlos M., 2023. Respuesta dinámica de Torres Auto-soportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico. Ciencia Nicolaita no. 87, 7-28. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi87.626>



Historial del artículo:

Recibido: 2 de mayo de 2022

Aceptado: 6 de octubre de 2022

Publicado en línea: abril de 2023



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: hugo.hernandez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Respuesta dinámica de Torres Autoportadas utilizando registros sintéticos de viento huracanado y atmosférico

Dynamic response of Self-supporting Towers using synthetic histories of hurricane and atmospheric wind

Hugo Hernández Barrios* y Carlos M. Patlán Manjarrez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Morelia, Michoacán, México

Resumen

En las últimas décadas, debido a los fuertes vientos huracanados en México, se han colapsado varias torres autoportadas para telecomunicaciones, causando pérdidas económicas y sociales importantes. Las torres autoportadas de telecomunicaciones son altamente sensibles a los efectos dinámicos de las cargas de viento. El objetivo de este trabajo es comparar la respuesta dinámica de torres autoportadas en términos de desplazamientos, utilizando historias de viento sintéticas, de viento atmosférico y de huracán. Las historias sintéticas de viento atmosférico se simularon aplicando el método espectral de dos y cuatro parámetros, y la metodología denominada Viento Sintético. Las historias de viento de huracán se realizaron por medio de la técnica de Montecarlo.

Palabras clave: torres autoportadas, diseño eólico, vientos huracanados, simulación de series de tiempo, análisis dinámico

Abstract

In recent decades, due to strong hurricane winds in Mexico, several self-supporting towers for telecommunications have collapsed, causing significant economic and social losses. Self-supporting telecommunications towers are highly sensitive to the dynamic effects of wind loads. The objective of this work is to compare the dynamic response of self-supporting towers in terms of displacements, using synthetic wind histories of atmospheric and hurricane winds. Synthetic atmospheric wind histories were simulated by applying the spectral method of two and four parameters, and the methodology called synthetic wind. The hurricane wind histories were made using the Monte Carlo technique.

Keywords: self-supported tower, wind design, hurricane winds, wind series simulations, dynamic analysis

Introducción

En la última década, en la República Mexicana, se ha incrementado el uso de sistemas de telefonía, radio y telecomunicación. Las torres de telecomunicación componen el 90% de la infraestructura civil de este tipo de sistema, por lo que en caso de desastres naturales es importante que la comunicación no se interrumpa, ya que es el medio para coordinar las tareas de reacción y contrarrestar los efectos de los fenómenos naturales que afectan a una comunidad o ciudad; la infraestructura utilizada en dichos sistemas tiene un carácter vital, no por su costo económico, sino por su importancia social. En México no existen códigos exclusivos para el diseño eólico de este tipo de estructuras; sin embargo, los lineamientos que existen desde 1993 y hasta la fecha (MDOC, 1993, 2008 y 2020), sugieren que este tipo de estructuras, por ser inmuebles de telecomunicaciones principales, se clasifiquen como del grupo A o importantes. A nivel internacional los códigos de diseño eólico AS 3995-1994, TIA-222-G-1-2019 y S37-01 CSA-2006, sugieren que estas estructuras pueden clasificarse como principales o secundarias cuando son de apoyo a las principales.

Las torres de telecomunicación comúnmente construidas en México, son del tipo autosoportadas, es decir, estas están formadas por marcos de celosías con perfiles estructurales de acero. En la práctica profesional la altura de las torres va de los 19 m a los 85 m y, por lo general, se construyen en tramos de 6 m. En Hernández-Barrios, De León y Valdés (2013) se revisa-

ron 214 proyectos estructurales de torres autosoportadas, construidas en diversas zonas de México y calculadas por cinco diferentes despachos especializados en cálculo estructural. La relación del número de torres analizadas y su altura se muestran en la Figura 1, siendo la altura más empleada la de 30 m.

La configuración estructural de las torres de celosías construidas en México, son de dos tipos: 1) cuadradas con sección constante para alturas de hasta de 40 m y con sección variable cuando se trata de alturas que pueden alcanzar hasta los 100 m; y 2) triangulares con alturas que van desde los 19.0 m a los 60.0 m (Figura 2).

Debido a sus características estructurales, las torres de celosías autosoportadas tienen propiedades dinámicas que las hacen más susceptibles a los efectos eólicos que a las cargas sísmicas (Smith, 2007). La demanda de la excitación eólica en México se ha incrementado ya que registros de velocidades de viento obtenidos recientemente, indican un incremento del orden del 30% con respecto a las registradas hace 25 años, principalmente en las zonas de generación de huracanes. Este incremento de velocidades se debe principalmente al aumento de la temperatura en los mares y en las capas atmosféricas, causado por el calentamiento global de la Tierra (Hernández-Barrios, 2010).

En la Tabla 1 se muestran las velocidades medias del viento registradas en el MDOC-1993 y en el

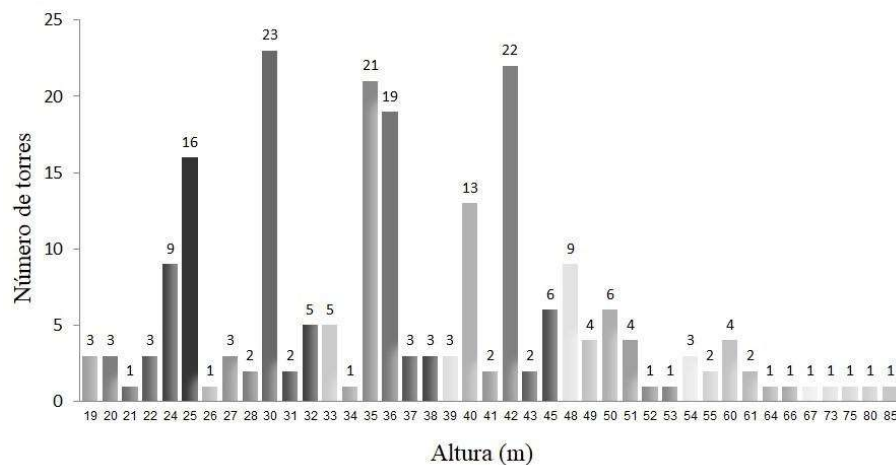


Figura 1. Altura de las torres autosoportadas, comúnmente diseñadas en México.

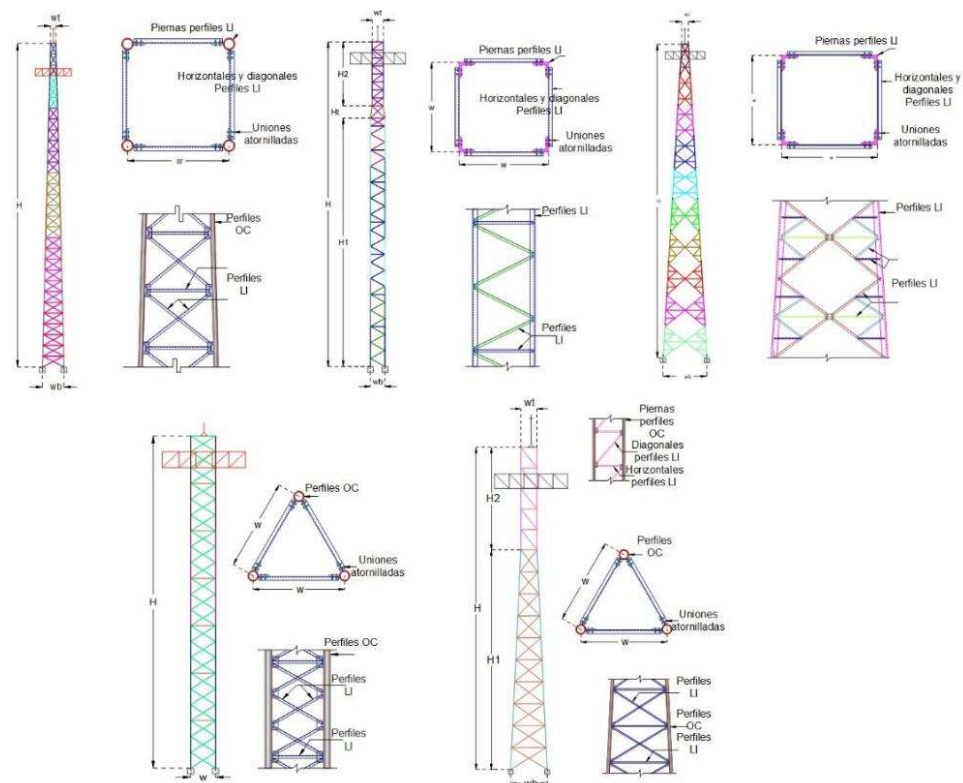


Figura 2. Configuración estructural de las torres de celosías construidas en México.

MDOC-2020 en algunas ciudades de México en las que se registran un incremento —datos más detallados en Hernández-Barrios (2010) y en Soto (2022)—, para un periodo de retorno de 50 años y su incremento en términos de porcentaje; mientras que en la Tabla 2 se muestran las mismas relaciones, pero para un periodo de retorno de 200 años. En la Tabla 1 se observa cómo en Tepic, Nayarit, el incremento de velocidades medias es del 30% para un periodo de retorno de 50 años; en tanto que en la Tabla 2, para Cozumel, Quintana Roo, es del 33% para un periodo de retorno de 200 años.

Año con año, durante los meses de mayo a diciembre, la República mexicana se ve afectada por la incidencia de fuertes vientos en las zonas costeras del Golfo de México y del Pacífico. Después de haber realizado un análisis estadístico de la incidencia de los ciclones tropicales en México desde 1950 hasta 2021, en los cuales se han reportado 232 huracanes, se identifica una alta incidencia en el estado de Quintana Roo, y para el caso de Michoacán, una incidencia media alta, con la presencia de un gran número de huracanes categoría 2, según se observa en la Figura 3 (Soto, 2022).

Tabla 1
Velocidades medias registradas en las versiones MDOC-93-20, periodo de retorno 50 años

División política	Ciudad	MDOC-2020	MDOC-1993	Incremento (%)
		Velocidad (km/h)		
Nayarit	Tepic	132.50	102.00	29.90
Quintana Roo	Cozumel	198.70	158.00	25.76
Coahuila	Piedras Negras	193.60	155.00	24.90
San Luis Potosí	Río Verde	137.12	111.00	23.53
Michoacán	Morelia	108.10	92.00	17.50

Tabla 2

Velocidades medias registradas en las versiones MDOC-93-20, periodo de retorno de 200 años

División política	Ciudad	MDOC-2020	MDOC-1993	Incremento (%)
		Velocidad (km/h)		
Nayarit	Tepic	148.80	115.00	29.39
Quintana Roo	Cozumel	245.50	185.00	32.70
Coahuila	Piedras Negras	209.10	168.00	24.46
San Luis Potosí	Río Verde	155.12	130.00	19.32
Michoacán	Morelia	120.50	102.00	18.14

**Figura 3.** Susceptibilidad de incidencia de huracanes en México por estado (Soto, 2022).

Además de la incidencia y del incremento de número de ciclones tropicales en México que afectan principalmente a los municipios de las costas, es importante remarcar que en la parte centro del país conocida como Franja Volcánica Transmexicana, o también llamada eje Neovolcánico Transversal o simplemente Eje Volcánico (Figura 4) en la que se ubican 14 estados y viven más de 50 millones de personas, se pueden registrar velocidades regionales de diseño del mismo orden que las que se han presentado en la costa Michoacana.

En la Figura 4 se muestran las velocidades regionales de viento medidas a 10 m de altura en terreno categoría 2 (terreno plano y libre de obstrucciones) para un periodo de retorno de 200 años y promediadas a 10 minutos (Soto, 2022). Es importante considerar que el tiempo de promediación de un registro eólico, es un parámetro clave de diseño y que las velocidades de viento registradas por los organismos internacionales para la medición de huracanes, la consideran en un minuto como viento sostenido, y para comparar

con las velocidades de viento registradas en el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (MDOC, 2020), habrá que hacer la equivalencia mostrada en la Tabla 3. Por lo que según la Figura 4, en algunos estados del centro de México, es posible que se presenten velocidades de diseño típicas de un huracán categoría 1-alto y categoría 2-bajo.

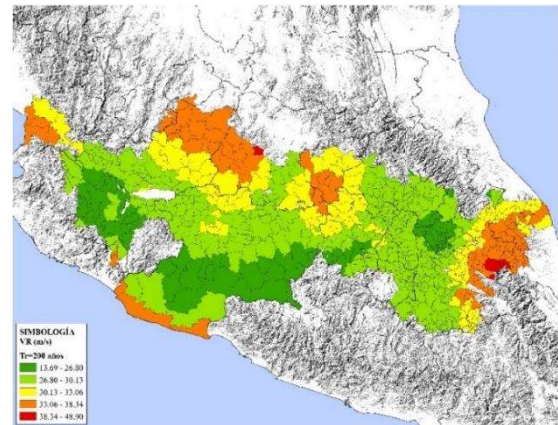
**Figura 4.** Velocidades regionales en el Eje Volcánico y en Michoacán (Soto, 2022).

Tabla 3
Velocidades de viento para ciclones tropicales según la escala de Saffir-Simpson.

Ciclón Tropical	Velocidad sostenida, tiempo de promediación					
	1 min			10 min	3 s (MDOC 2020)	
	nodos	m/s	km/h	m/s	m/s	km/h
Depresión tropical	34≤	≤ 17.8	≤ 64.0	≤ 15.5	≤ 23.13	≤ 83.0
Tormenta tropical	35-63	17.8-32.8	64.00-118	15.6-28.9	23.14 - 43.2	83.1 - 145
Categoría 1	64-82	32.9-42.2	118 - 154	29.0-37.1	43.3 - 55.4	146 - 190
Categoría 2	83-95	42.7-48.9	154 -178	37.2-43.0	55.5 - 64.2	191 -219
Categoría 3	96-112	49.3-57.6	178 -210	43.1-50.7	64.3 -75.7	220 -259
Categoría 4	113-136	58.1-70.0	210 -250	50.8- 61.5	75.8 - 91.8	260-308
Categoría 5	≥ 137	≥ 70.0	≥ 250	≥61.6	≥91.9	≥309.7

Por otro lado, la zona geográfica donde se ha documentado la mayor cantidad de tornados en México, se extiende desde el sur de Veracruz hasta Nayarit (León-Cruz, 2019), a lo largo de la Franja Volcánica Transmexicana. Entre los años 2000 y 2012, los municipios del Estado de México fueron los lugares de mayor incidencia de tornados (Macías y Avendaño, 2013). En la Figura 5 (Soto, 2022) se observa la incidencia de tornados en diversos estados que pertenecen a la Franja Volcánica Transmexicana, incluyendo a Michoacán. Las velocidades registradas han sido equivalentes a un Tornado EF2 (escala de Fujita mejorada) que son comparables a las que presenta un huracán categoría 3 (escala Saffir-Simpson).

Probablemente, una gran cantidad de torres de celosías autoportadas han colapsado (Figura 6) debido a las altas velocidades del viento atmosférico, el incremento del número de ciclones tropicales y la aparición de tornados en zonas geográficas en las que no era

común su incidencia, aunado a las metodologías simplificadas de diseño proporcionadas por los códigos.

El objetivo de este trabajo es realizar la respuesta dinámica empleando un software comercial (SAP 2000; ver Figura 14) ampliamente usado en México por los despachos de cálculo, lo que lo hace de aplicación práctica convencional. Se realizaron simulaciones de ráfagas de viento atmosférico y simulaciones de ráfagas de huracán; para ambos casos se considerará la hipótesis de estacionariedad de la excitación (Tianyou y Wang, 2016).

Expresiones simplificadas de diseño

En México, el Manual de Diseño de Obras Civiles Diseño por Viento (MDOC, 2020) es el documento que sirve como guía de diseño para este tipo de estructuras. En la edición anterior de dicho manual (MDOC, 2008), el primer autor de este trabajo actualizó el procedimiento de diseño para el cálculo de la respuesta dinámica equivalente de torres de celosías. El procedimiento propuesto se basó en el criterio del Factor de Amplificación Dinámico (FAD), adaptando las expresiones sugeridas por las normas japonesas de diseño eólico de estructuras (AIJ, 2005) para un tiempo de promediación de la velocidad de 3 s. La mayoría de los códigos de diseño eólico en el mundo (Hernández-Barrios, 2009) proponen calcular la respuesta dinámica de estructuras con base en un método simplificado, en el que existe un solo factor de respuesta o factor de amplificación en todos los puntos de la estructura considerada como un oscilador de un grado

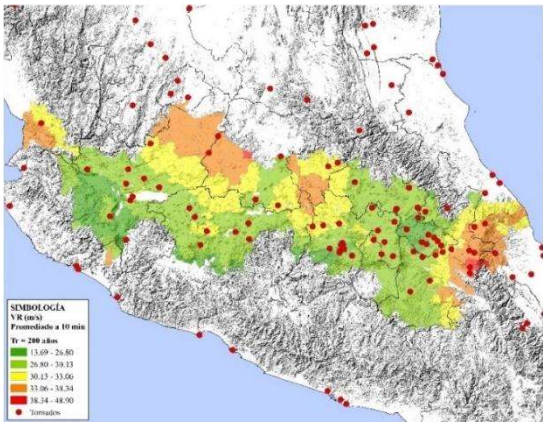


Figura 5. Incidencia de tornados en la Franja Volcánica Transmexicana (Soto, 2022).



Figura 6. Fallas estructurales de torres de celosías autosoportadas.

de libertad. Holmes (1994, 1996a, 1996b) propone una metodología más detallada para calcular la respuesta dinámica de este tipo de estructuras, en la cual se calculan tres diferentes factores de respuesta de ráfaga que varían con la altura de la estructura: 1) G_p para la fuerza cortante; 2) G_m para el momento flexionante; y 3) G_x para el desplazamiento. Para torres de comunicación autosoportadas, existen algunos códigos de diseño especializados (AS 3995-1994, TIA-222-G-1-2019, S37-01 CSA-2006) que proponen calcular el factor de amplificación de manera diferente. En la referencia TIA-222-G-1 (2019) se proponen calcular el factor de ráfaga, G_h , con:

$$G_h = 0.85 + 0.15 \left[\frac{H}{45.7} - 3.0 \right] \quad (1)$$

Donde H es la altura de la torre en metros y el valor del factor de ráfaga se encuentra entre 0.85 y 1.0.

En el código canadiense S37-2018 CSA (2018) se define un factor de ráfaga estático independiente de la altura, y propone un valor de $C_g=2$ para torres de celosías autosoportadas, valor que está basado en una velocidad media horaria.

El coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico, es la suma del coeficiente de amortiguamiento estructural más el coeficiente de amortiguamiento ae-

rodinámico. El amortiguamiento aerodinámico aumenta con la velocidad media y contribuye grandemente en el amortiguamiento total de la estructura. Para estructuras formadas por celosías, el amortiguamiento aerodinámico comúnmente es alto debido a la poca masa de la estructura; y a altas velocidades puede ser mayor que el amortiguamiento estructural. En Holmes (1994) se usa un valor del coeficiente de amortiguamiento aerodinámico del orden de tres veces el valor del coeficiente de amortiguamiento estructural. La mayoría de los códigos de diseño proponen valores del 1% y del 2% de amortiguamiento estructural con respecto al crítico, para torres soldadas y atornilladas, respectivamente. Sin embargo, algunos códigos sugieren despreciar el amortiguamiento aerodinámico y considerar el estructural del orden de 5% (AS/NZN 1170.2). Experimentalmente, Glanville (1997) encontró valores del amortiguamiento estructural con respecto al crítico, relativamente bajos, del orden de 0.3 y 1.1%.

Perfil de velocidad media del viento sinóptico

Actualmente existen tres modelos que permiten obtener el perfil teórico de velocidades medias del viento: ley de potencia, ley logarítmica y ley logarítmica corregida. Los códigos de diseño eólico suelen utilizar la ley de potencia y la ley logarítmica para el

cálculo del perfil de velocidades medias del viento; sin embargo, es recomendable utilizar el perfil logarítmico corregido de Harris y Deaves (1980), ya que este modelo contempla la altura de la capa límite atmosférica del sitio de interés. Las ecuaciones para cada perfil de velocidades son:

Para la ley de potencia,

$$\bar{U}(z) = \bar{U}(z_r) \left(\frac{z - z_d}{z_r} \right)^a \quad (2)$$

Donde Z_r es la altura de referencia ($Z_r = 10$ m) y a es el exponente propuesto por Counihan el cual está definido como:

$$a = 0.096 \log_{10} z_o + 0.016 (\log_{10} z_o)^2 + 0.24 \quad (3)$$

Para la ley logarítmica,

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) \quad (4)$$

Para la ley logarítmica corregida,

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z - z_d}{z_o} \right) + 5.75b - 1.88b^2 - 1.33b^3 + 0.25b^4 \right] \quad (5)$$

Donde κ es la constante de Von Kármán ($\kappa \approx 0.4$) y u^* es la velocidad de fricción del viento, la cual está definida como

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_s}{\rho_a}} = \bar{U}(z_r) \sqrt{r_D} \quad (6)$$

Donde τ_s es el esfuerzo cortante de la superficie del terreno y r_D es el coeficiente de arrastre de la superficie del terreno, el cual a su vez está dado por

$$r_D = \left[\frac{\kappa}{\ln(z_r / z_o)} \right]^2 \quad (7)$$

Por último, el parámetro b queda definido como

$$b = \frac{z - z_d}{z_g} \quad (8)$$

Donde la altura gradiente está dada por

$$z_g = \frac{u^*}{6 f_c} \quad (9)$$

Donde f_c es el coeficiente de Coriolis en s^{-1} , el cual a su vez queda definido como

$$f_c = 2 \Omega \sin(\zeta) \quad (10)$$

Donde Ω es la velocidad angular de la Tierra ($\Omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$) y ζ es la latitud del sitio de interés en grados decimales.

En la Figura 7 se muestra la comparación de los tres modelos de los perfiles de velocidad media, considerando un sitio con latitud de 21.10° y una velocidad media del viento a 10 m de altura de 32 m/s y cuatro diferentes valores de la longitud de rugosidad del terreno, z_o . La velocidad media del viento por debajo de z_r puede considerarse como constante.

En la Figura 7 se observa que la ley de potencia y la ley logarítmica tienden a subestimar la velocidad media del viento conforme la altura se incrementa. Por lo tanto, se recomienda usar siempre la ley logarítmica corregida para el perfil teórico de velocidades medias del viento.

Simulación de ráfagas de viento sinóptico

La simulación de las historias de viento atmosférico se realizó por medio de tres metodologías: 1) Técnica Espectral de dos parámetros; 2) Técnica Espectral de cuatro parámetros; y 3) Técnica denominada Viento Sintético. Para realizar las simulaciones de ráfagas de huracán se utilizaron las expresiones recomendadas por Tamura *et al.* (2012). Una vez realizadas las simulaciones de ráfagas de viento en cada punto de interés de la torre, éstas se aplicarán en cada área expuesta de la torre (Figura 8).

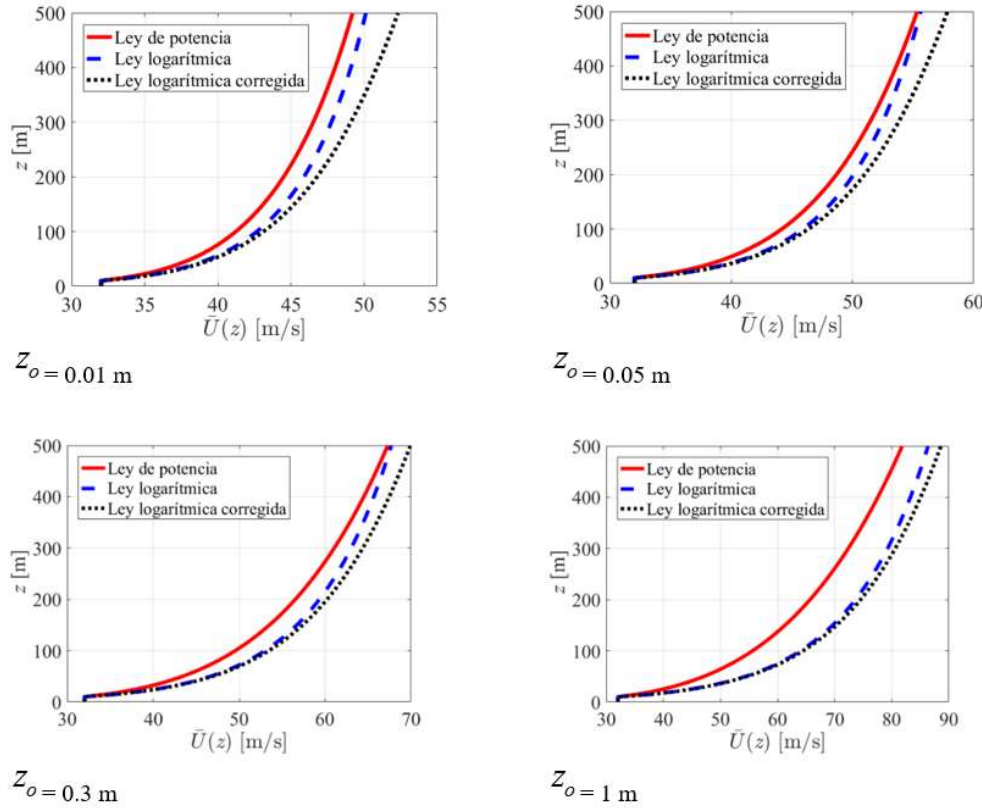


Figura 7. Comparación de $\bar{U}(z)$ para diferentes valores de Z_o

Simulación de historias de viento atmosférico

Las fluctuaciones de la velocidad del viento reflejan la superposición de los innumerables torbellinos o vórtices en un flujo de aire que producen la turbulencia y cuyo movimiento puede ser descrito como oscilatorio armónico de una frecuencia dada. Uno de los métodos numéricos más recurrentes para describir la velocidad fluctuante del viento, consiste en simularlo por medio de la suma de funciones que traducen movimientos armónicos de diferentes frecuencias y amplitudes, con ángulos de fase aleatorios. Este tratamiento matemático se conoce como el método de WAWS (Weighted Amplitude Wave Superposition) o descomposición espectral.

Metodología espectral de dos parámetros

Para el cálculo de las velocidades de viento que representan las ráfagas, $\tilde{v}(z, t)$, si se considera que las

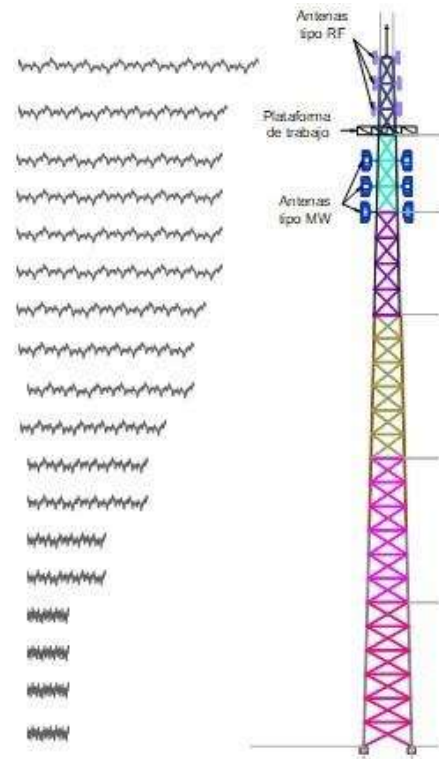


Figura 8. Aplicación de las historias de viento, modelo de la torre.

historias de velocidades están correlacionadas en diferentes puntos de la estructura (Shinozuka y Jan, 1972), las fluctuaciones de la velocidad del viento se expresan por medio de la sumatoria de N funciones armónicas de diferentes frecuencias y amplitudes que son funciones de la densidad espectral de potencia, por medio de la expresión,

$$\tilde{v}(z, t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2S_v(z, f_n) \Delta f} [\cos(2\pi f_n t + \phi_n)] \quad (11)$$

Donde $S_v(z, f_n)$ es el espectro de potencia del viento.

La Ecuación 2 se puede escribir,

$$\tilde{v}(z, t) = \sum_{n=1}^N A_n [\cos(2\pi f_n t + \phi_n)] \quad (12)$$

Donde ϕ_n es ángulo de fase aleatorio de la función armónica n de valor comprendido entre $[0, 2\pi]$ rad y la amplitud A_n está referida como,

$$A_n = \sqrt{2S_v(f_n, z) \Delta f} \quad (13)$$

Donde el intervalo de frecuencias se obtiene dividiendo una banda de frecuencias de interés, de los valores comprendidos entre f_1 y f_N , entre $N - 1$ intervalos de igual frecuencia.

$$\Delta f = \frac{f_n - f_1}{N - 1} \quad (14)$$

Las frecuencias referidas en este trabajo están comprendidas en el intervalo de f_n en $[0.01; 7.00]$ Hz. La discretización en el dominio de las frecuencias se efectúa considerando N número de frecuencias f_n , que van de $i = 1, \dots, N$, o de forma equivalente en el intervalo de frecuencias Δf adoptado, tal que $N = 2^m$. En este trabajo se tomó $m = 12$. El valor del intervalo debe satisfacer la relación $2^m = \frac{f_N - f_i}{\Delta f} + 1$. Las series se obtienen para un intervalo T de 600 s, es decir, de 10 minutos y el intervalo de tiempo es $\Delta t = \frac{T}{2^{m-1}}$.

Para considerar las velocidades del viento entre dos puntos extremos que no estén correlacionadas,

Shinozuka y Jan (1972) propusieron un proceso numérico para simular las velocidades fluctuantes del tiempo que contempla la correlación temporal y la espacial. En este proceso la velocidad fluctuante del viento descrita en M puntos del espacio por un vector $\tilde{v}_j(t)$, para el cual $j = 1, 2, \dots, M$, se puede representar como,

$$\tilde{v}_j(t) = \begin{Bmatrix} \tilde{v}_1(t) \\ \tilde{v}_2(t) \\ \vdots \\ \tilde{v}_M(t) \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Se requiere la descomposición de la matriz de densidad espectral cruzada $S(f_n) = [S_{vj} v_k(f_n)]_{M \times M}$ representada por,

$$S(f) = \begin{bmatrix} S_{v_1 v_1}(f_n) & S_{v_1 v_2}(f_n) & \dots & S_{v_1 v_M}(f_n) \\ S_{v_2 v_1}(f_n) & S_{v_2 v_2}(f_n) & \dots & S_{v_2 v_M}(f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{v_M v_1}(f_n) & S_{v_M v_2}(f_n) & \dots & S_{v_M v_M}(f_n) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Los elementos de $S_{vj} v_k(f_n)$ para $j, S_{vj} v_k(f_n), j \neq k$ están dados por la ecuación,

$$S_{vj} v_k(f_n) = \sqrt{S_v(z_j, f_n) S_v(z_k, f_n)} \text{Coh}(P_j, P_k; f_n) \quad (17)$$

y representa la densidad espectral cruzada para la frecuencia f_n de dos procesos $\tilde{v}_j(t)$ y $\tilde{v}_k(t)$ en los puntos $P_j(x_j, y_j, z_j)$ y $P_k(x_k, y_k, z_k)$, respectivamente. Los elementos de la diagonal principal $j, k = 1, 2, \dots, M, j = k$, representan la función de densidad espectral del proceso $\tilde{v}_j(t)$ para la frecuencia f_n , y se obtienen con,

$$S_{vj} v_j(f_n) = \sqrt{S_v(z_j, f_n) S_v(z_j, f_n)} \text{Coh}(P_j, P_j; f_n) = S_v(z_j; f_n) \quad (18)$$



La Ecuación 17 se puede ver que es igual a la Ecuación 18 cuando $j = k$, tal que $\text{Coh}(P_j, P_j; f_n) = 1.0$. Suponiendo que se admitieran N número de frecuencias f_n para generar $\tilde{v}_j(t)$ será necesario definir N matrices cuadradas de $M \times M$,

$$S(f_n) = \left[S_{v_j v_k}(f_n) \right]_{M \times M} \quad (19)$$

Existen dos métodos para realizar la descomposición de la matriz $S(f_n)$: 1) Descomposición de Cholesky y (2) Descomposición POD o descomposición de Karhunen-Loeve (Chen y Kareem, 2005; Thai y Tamura, 2008; Thai, 2009). En este trabajo se utilizó la descomposición de Cholesky, para la cual se usa el modelo numérico de Shinozuka y Jan (1972) para simular la componente fluctuante de velocidades de viento en los puntos $j = 1, 2, 3, \dots, M$,

$$\tilde{v}_j(t) = \sum_{k=1}^j \sum_{n=1}^N \left[H_{jk}(f_{kn}) \right] \left[2\sqrt{\Delta f} \right] \cos \left[2\pi f_{kn} t + \theta_{jk}(f_{kn}) + \phi_{kn} \right] \quad (20)$$

Donde Δf es el intervalo de frecuencias considerado, ϕ_{kn} es el ángulo de fase comprendido entre 0 y 2π , y H_{jk} es el elemento genérico de la matriz triangular inferior,

$$H(f_{kn}) = \left[H_{jk}(f_{kn}) \right]_{M \times M} \quad (21)$$

La cual es obtenida de,

$$S(f_n) = H(f_{kn}) \bar{H}^T(f_n) \quad (22)$$

En la que $\bar{H}^T(f_n)$ es la matriz traspuesta conjugada de $H(f_{kn})$.

La Ecuación 22 representa la descomposición de Cholesky de la matriz de densidad espectral cruzada $S(f_n)$. El ángulo de fase está definido por,

$$\theta_{jk}(f_{kn}) = \tan^{-1} \frac{\Im \{ H_{jk}(f_{kn}) \}}{\Re \{ H_{jk}(f_{kn}) \}} \quad (23)$$

Y las frecuencias

$$f_{kn} = \left(n + \frac{k}{M} - 1 \right) \Delta f \quad (24)$$

Para $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

Metodología espectral de cuatro parámetros

La técnica de cuatro parámetros o modelo de la velocidad del viento a pequeña escala, es un proceso estocástico que supone que en cada instante la velocidad del viento, $v_w(t)$, está formada por la suma de cuatro componentes,

$$v_w(t) = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (25)$$

Siendo v_{wa} el valor de la velocidad promedio y corresponde al promedio aritmético de la velocidad del viento registrada durante un cierto periodo; $v_{wr}(t)$ la componente rampa que representa un incremento continuo de la velocidad del viento; $v_{wg}(t)$ es la componente de la ráfaga del viento; y $v_{wt}(t)$ es la componente de la turbulencia.

La componente de rampa, $v_{wr}(t)$, se emplea para la simulación de cambios en la velocidad del viento, cuyo comportamiento puede ser considerado de manera aproximada como lineal (ascenso y descenso). Esta rampa es caracterizada por tres parámetros: la amplitud de la rampa, $\hat{A}_r \left(\frac{m}{s} \right)$; el tiempo de inicio de la rampa, $T_{sr}(s)$; y el tiempo final de la rampa, $T_{er}(s)$. La formulación matemática de la componente de rampa de la velocidad del viento se describe con:

$$t < T_{sr} \text{ para } v_{wr} = 0$$

$$T_{sr} \leq t \leq T_{er} \text{ para } v_{wr} = \hat{A}_r \frac{(t - T_{sr})}{(T_{er} - T_{sr})} \quad (26)$$

$$T_{er} < t \text{ para } v_{wr} = \hat{A}_r$$

Las ráfagas representadas por fluctuaciones rápidas en la velocidad del viento, $v_{wg}(t)$, tienen cierta variación en los picos y la parte estable de la curva, es decir, un cambio temporal en la velocidad del viento.

La ráfaga está caracterizada por tres parámetros: la amplitud, $\hat{A}_g\left(\frac{m}{s}\right)$, el tiempo de inicio, $T_{sg}(s)$ y el tiempo final, $T_{eg}(s)$. La formulación matemática de la componente de ráfaga, $v_{wg}(t)$, de la velocidad del viento se describe con:

$$t < T_{sg} \quad \text{para} \quad v_{wg} = 0$$

$$T_{sg} \leq t \leq T_{eg} \quad \text{para} \quad v_{wg} = \hat{A}_g \left\{ 1 - \cos \left[2\pi \frac{(t - T_{sg})}{(T_{eg} - T_{sg})} \right] \right\} \quad (27)$$

$$T_{eg} < t \quad \text{para} \quad v_{wg} = 0$$

La componente de la turbulencia del viento, $v_{wt}(t)$, se obtiene de la misma manera que en el método propuesto por Shinozuka y Jan (1972). La suma de los valores máximos de la componente de rampa, $v_{wr}(t)$, y de la componente de la ráfaga del viento, $v_{wg}(t)$, se considera en este trabajo como:

$$v_{wr}(t) + v_{wg}(t) = 0.50 v_{wa} \quad (28)$$

Además, se consideró que el tiempo de la ráfaga no debe exceder del 60% del tiempo de la señal simulada, y que el periodo de duración de rampa está limitado al 80% del tiempo de estudio. De esta manera, la amplitud de la componente de ráfaga, $v_{wg}(t)$, para la j -ésima señal es del 25% del valor medio de la velocidad, v_{wa} ; mientras que la amplitud de la rampa, $v_{wr}(t)$, para la j -ésima señal es del 25% del valor medio de la velocidad, v_{wa} .

Metodología denominada viento sintético

La importancia de incorporar en este trabajo la técnica de simulación de viento atmosférico denominada Viento Sintético, es que fue la primera técnica sugerida por una norma de diseño eólico en el mundo y es, hasta hoy en día, ampliamente utilizada en Brasil.

Franco (1993) presentó una técnica para determinar la presión del viento, considerando la carga aleatoria con un enfoque probabilístico desarrollado por

Davenport (1962), así como del método de Monte-carlo. Dicha técnica la denominó Viento Sintético y consiste en transformar la carga aleatoria del viento obtenido a través de un espectro de potencia en funciones armónicas de diferentes frecuencias y fases aleatorias, en dichas frecuencias se incluyen la frecuencia fundamental de la estructura a analizar. Franco (1993) empleó el método Viento Sintético para analizar la acción del viento en un edificio de concreto con una altura de 158 m, conocido como la Torre Norte del Centro Empresarial Naciones Unidas, ubicado en São Paulo, Brasil. Los resultados fueron comparados con los obtenidos con la norma brasileña y con el programa de cálculo para estructuras de concreto armado, mostrando buena aproximación entre ambos métodos.

Carril (2000) modeló una torre autosoportada de 100 m de altura y evaluó su comportamiento dinámico ante la acción del viento utilizando tres metodologías: el método de Davenport, el propuesto en la norma brasileña y el método del Viento Sintético; concluyó que los resultados obtenidos mediante el método del Viento Sintético presentan diferencias relativamente grandes en relación con los resultados generados con el procedimiento dinámico de la norma brasileña y el método de Davenport. Reyolando *et al.* (2000) evaluaron el efecto del viento sobre una torre para telecomunicaciones de concreto, aplicando el método estático y el dinámico propuesto en la norma brasileña y por el método del Viento Sintético. Sosa (2006) estudió el comportamiento dinámico de un edificio de concreto armado de 102 m de altura mediante el método del Viento Sintético, el método simplificado de la norma brasileña y el método estático. Encontró que los desplazamientos obtenidos con los tres métodos son similares; sin embargo, las aceleraciones obtenidas mediante el método simplificado resultaron ser hasta 132% más altas que las obtenidas por medio del método del Viento Sintético. Chaves (2009) destaca que el método propuesto por Franco (1993), a pesar de su dificultad computacional, sobresale como la opción más viable para considerar el aspecto de confort de los usuarios.

De acuerdo con Franco (1993), la aproximación de este método se mejora mientras más funciones armónicas se tengan; sin embargo, el procesamiento se complica si la cantidad de armónicos es muy grande, la sugerencia que se hace es que se tome una cantidad

de armónicos $m \geq 11$, considerando que $m = 11$ es una buena aproximación, además se recomienda realizar por lo menos 20 series de simulaciones de la carga dinámica para determinar la respuesta media.

La descripción de la técnica de simulación denominada Viento Sintético, en forma detallada, se encuentra en Hernández-Barrios, Mosqueda y Huergo (2018), por lo que en este trabajo únicamente se registran los resultados de la aplicación de dicha técnica.

Perfil de velocidades medias del viento huracanado

La metodología utilizada en este trabajo es la propuesta por Fernández *et al.* (2020), adecuando el perfil de velocidades medias por el propuesto en Snaiki y Teng (2018). Dicho perfil está dado por:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + \eta_0 \sin \left(\frac{z}{\delta} \right) \exp \left(-\frac{z}{\delta} \right) \right] \quad (29)$$

Siendo z la altura de interés en metros del punto donde se desea calcular la velocidad media; u^* la velocidad de fricción del viento en m/s; η_0 es una constante de valor 9.026; κ es la constante de Von Kármán de valor 0.4; δ es la altura máxima de velocidad de huracán; y z_0 la altura de rugosidad del terreno (Tabla 4). La velocidad de fricción del viento se puede aproximar mediante,

$$u^* \approx \frac{k \bar{U}(z_r)_{D,10 \text{ min}}}{\ln \left(\frac{z_r}{z_0} \right)} \quad (30)$$

Donde $\bar{U}(z_r)_{D,10 \text{ min}}$ es la velocidad de diseño con un tiempo de promediación de 10 minutos en m/s; y z_r es la altura de referencia igual a 10 m.

Simulación de historias de viento huracanado

Actualmente, en ningún código internacional de diseño eólico se contempla explícitamente la utilización de simulaciones de viento huracanado para el cálculo de la respuesta dinámica. Es evidente que en la literatura existe un gran número de propuestas de expresiones para el cálculo del espectro de densidad de potencia del viento, pero para todos los casos, solo es contemplado para viento sinóptico. Los modelos teóricos más comunes se muestran en la Tabla 5 (Huergo, 2021).

Tabla 4
Categoría del terreno y su rugosidad.

Categoría de Terreno	z_0 (m)	Descripción
I	0.01	Lagos o área plana con vegetación despreciable y sin obstáculos.
II	0.05	Área con pocas obstrucciones, como vegetación, hierba y obstáculos aislados (árboles, edificios, etc.).
III	0.30	Área con cobertura regular de vegetación o edificios o con obstáculos aislados (terreno suburbano, bosque permanente).
IV	1.00	Área en la que al menos el 15% de la superficie está cubierta con edificios y su altura promedio supera los 15 m.

Tabla 5
Modelos más comunes del espectro de densidad de potencia del viento.

Modelo	Espectros de potencia de $u(z, t)$
Kolmogorov (1941)	$S_u(z, f) = \frac{0.26 (u^*)^2 [f z / \bar{U}(z)]^{\frac{2}{3}}}{f}$
Von Kármán (1948)	$S_u(z, f) = \frac{4 \sigma_u^2(z) L_u(z) / \bar{U}(z)}{1.339 \left[1 + 39.48 (f L_u(z) / \bar{U}(z))^2 \right]^{5/6}}$
Davenport (1961)	$S_u(z, f) = \frac{2 \sigma_u^2(z) [1200 f / \bar{U}(z)]^2}{3 f (1 + f^2 (1200)^2 / \bar{U}^2(z))^{4/3}}$
Von Kármán modificado por Harris (1968)	$S_u(z, f) = \frac{4 \sigma_u^2(z) L_u(z) / \bar{U}(z)}{\left[1 + 70.8 (f L_u(z) / \bar{U}(z))^2 \right]^{5/6}}$
Harris (1970)	$S_u(z, f) = \frac{2 \sigma_u^2(z) [1800 f / \bar{U}(z)]}{3 f \left[2 + (1800 f / \bar{U}(z))^2 \right]^{5/6}}$
Kaimal (1972)	$S_u(z, f) = \frac{105 (u^*)^2 z / \bar{U}(z)}{\left[1 + 33 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Simiu (1974)	$S_u(z, f) = \frac{200 (u^*)^2 f z / \bar{U}(z)}{f \left[1 + 50 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Högström <i>et al.</i> (1982)	$S_u(z, f) = \frac{86.6 (u^*)^2 f z / \bar{U}(z)}{f \left[1 + 29.6 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Solari (1993)	$S_u(z, f) = \frac{6.868 \sigma_u^2(z) L_u(z) / \bar{U}(z)}{\left[1 + 10.302 (f L_u(z) / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$
Kaimal modificado por Hiriart (2001)	$S_u(z, f) = \frac{100 (u^*)^2 z / \bar{U}(z)}{\left[0.44 + 33 (f z / \bar{U}(z)) \right]^{5/3}}$

En este trabajo se utilizará el espectro de densidad de potencia de Von Kármán, el cual es definido como el que mejor representa la acción de huracanes (Tamura *et al.*, 2012; Fernández *et al.*, 2020):

$$S_u(\omega) = \frac{4 \sigma_u^2 \frac{f L_u}{h}}{n \left[1 + 70.8 \left(\frac{f L_u}{h} \right)^2 \right]^{5/6}} \quad (31)$$

Donde $f = \frac{nh}{\bar{U}}$ es la coordenada de Monin; $n = \frac{2\pi}{\omega}$ es la frecuencia en Hz; L_u es la longitud de escala integral de la turbulencia; y σ_u^2 es la varianza de la componente turbulenta. La longitud de escala integral (Solari y Piccardo, 2001) se determina mediante:

$$L_u = 300 \left(\frac{h}{200} \right)^v \quad (32)$$

Siendo

$$v = 0.67 + 0.05 \ln(z_o) \quad (33)$$

La varianza está dada por:

$$\sigma_u^2 = \beta (u^*)^2 \quad (34)$$

Donde:

$$\beta = (2.72 - 0.25 \log(z_o))^2 \quad (35)$$

La velocidad total del viento a la altura z , es la suma de la velocidad media más la ráfaga, es decir:

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (36)$$

Donde $U(z, t)$ es la velocidad total del viento a la altura z ; y $u(z, t)$ la velocidad de la ráfaga del viento obtenida con,

$$u_i(t_j) \cong \sqrt{\Delta\omega} \sum_{m=1}^i \sum_{k=1}^{N_\omega} |H_{im}(\omega_{mk})| \cos(\omega_{mk} t_j + \phi_{mk}) \quad (37)$$

Donde $\Delta\omega = \omega_u/N_\omega$; ω_u es la frecuencia de corte de la simulación; $N_\omega = N_T = T/\Delta t$ es el número de puntos de la simulación; T es la duración total de la simulación; Δt es el intervalo de muestreo del registro simulado; ω_{mk} es la frecuencia angular de interés; y ϕ_{mk} es el ángulo de fase generado pseudoaleatoriamente entre $[0, 2\pi]$. Empleando la descomposición de Cholesky, de la matriz del espectro de densidad cruzada, se puede conocer la matriz $H(\omega)$.

$$S_{u_i u_i}(\omega) = H(\omega) H^*(\omega)^T \quad (38)$$

Las simulaciones de la ráfaga requieren considerar la coherencia espacial, esto se realiza mediante el espectro de densidad cruzada,

$$S_{u_i u_2}(\omega) = \sqrt{S_{u_i}(\omega) S_{u_2}(\omega)} \exp(-f_{12}(\omega)) \quad (39)$$

Donde

$$f_{12}(\omega) = \frac{2n\sqrt{k_z^2 \Delta z^2}}{[(\bar{U}(z_1) + \bar{U}(z_2))]} \quad (40)$$

Siendo $f_{12}(\omega)$ la función de coherencia; Δz la distancia vertical entre los puntos z_1 y z_2 ; y k_z el coeficiente de decaimiento igual a 10.

Ejemplo de aplicación

Como ejemplo de aplicación se consideró una torre de celosía autosoportada para telecomunicaciones construida con perfiles estructurales de acero. La geometría general de la torre se muestra en la Figura 9. La altura total de la torre es de 100.3 m, con sección transversal cuadrada con una base de 9.5 m de lado y un remate de 1.80 m. Para realizar el modelo se consideraron tres tramos y cada uno se dividió en secciones (Figura 9).

Los perfiles estructurales utilizados, los coeficientes de arrastre, C_d , y las áreas de contacto en la dirección perpendicular al viento, $A(m^2)$, para cada sección en la que se dividió la torre, se describen en la Tabla 6. Para el análisis se despreció la masa de las antenas de microondas.

En la Tabla 7 se resumen las tres primeras frecuencias de vibrar obtenidas mediante un software comercial (SAP, 2000; ver Figura 14).

Las formas modales asociadas a los tres primeros modos de vibrar se muestran en la Figura 10.

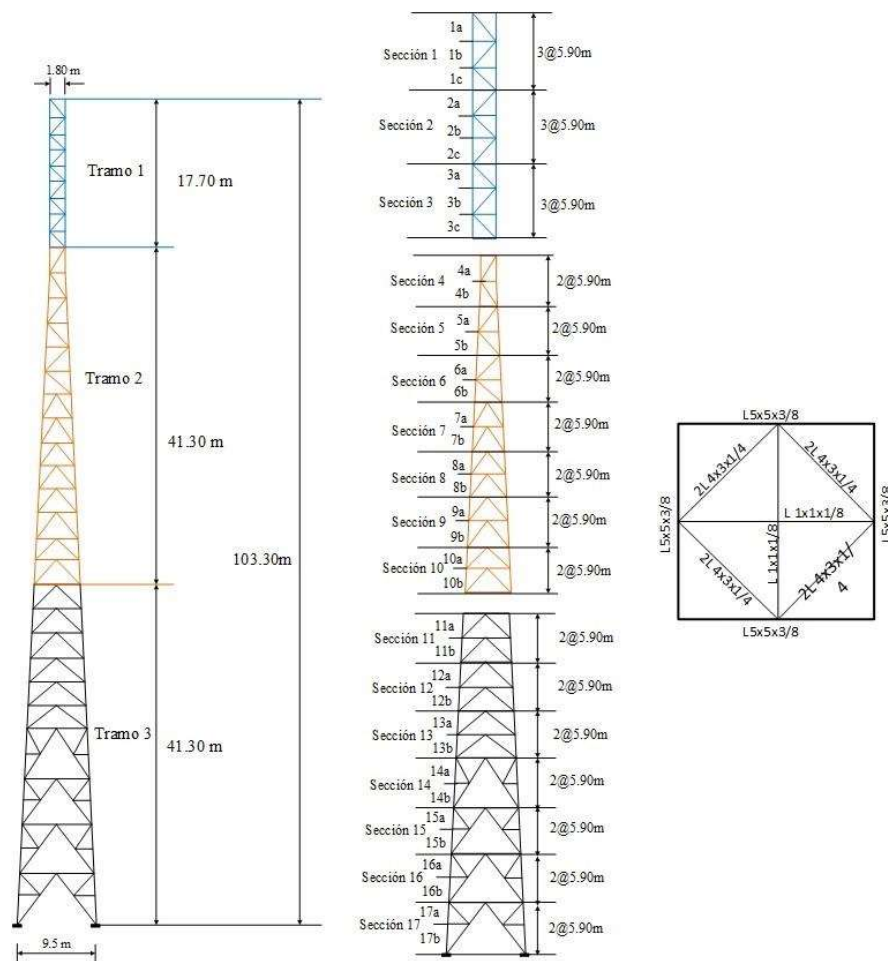


Figura 9. Geometría general de la torre autoportada de celosías.

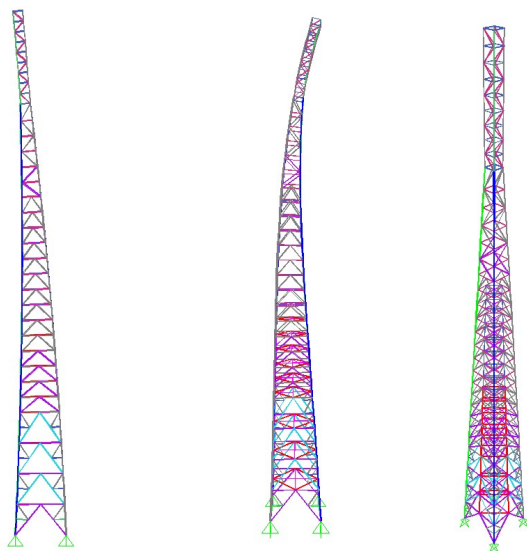


Figura 10. Primeras dos formas modales de la torre autoportada en estudio.

Resultados: viento sinóptico

Para realizar las simulaciones de viento atmosférico se consideró una velocidad media del viento a 10 m de altura promediada a 10 minutos de 23.74 m/s (85 km/h), velocidad que corresponde a un terreno tipo III con una longitud de rugosidad del terreno de 0.3 m. Para las tres técnicas de simulación empleadas en este trabajo, se consideró el espectro de potencia de velocidad de Davenport y un coeficiente de decaimiento de $C_z=7$ y $C_y=12$.

Para la simulación de las historias de tiempo empleando de la técnica de cuatro parámetros se consideró:

$$0.25v_{wr}(t) + 0.25v_{wg}(t) = 0.50v_{wa} \quad (41)$$

Para cada una de las $j = 1, 2, 3 \dots 37$ simulaciones.



Tabla 6
Propiedades estructurales de cada sección de la torre.

Altura (m)	Sec.	Perfil (mm)	Cd	Á(m ²)	Altura (m)	Sec.	Perfil (mm)	Cd	Á(m ²)
100.3	1a		2.5	0.531	53.1	9a		3.10	2.28
	1b	L 64 x 64 x 4.7	3.15	0.531		9b	2L 102 x 102 x 9.5	3.10	2.28
	1c		3.15	0.531	47.2	10a		3.15	2.3775
94.4	2a		3.05	0.602		10b	2L 102 x 102 x 9.5	3.15	2.3775
	2b	L 76 x 76 x 6.4	3.05	0.602	41.3	11a		3.11	2.765
	2c		3.05	0.602		11b	2L 127 x 127 x 9.5	3.11	2.765
88.5	3a		2.90	0.708	35.4	12a		3.05	3.247
	3b	L 102 x 102 x 6.4	2.90	0.708		12b	2L 127 x 127 x 9.5	3.05	3.247
	3c		2.38	1.239	29.5	13a		3.10	3.341
82.6	4a		2.78	1.4145		13b	2L 127 x 127 x 9.5	3.10	3.341
	4b	2L 102 x 102 x 6.4	2.78	1.4145	23.6	14a		3.15	3.353
76.7	5a		2.78	1.78		14b	2L 152 x 152 x 9.5	3.15	3.353
	5b	2L 102 x 102 x 6.4	2.78	1.78	17.7	15a		3.15	3.59
70.8	6a		2.86	1.967		15b	2L 152 x 152 x 9.5	3.15	3.59
	6b	2L 102 x 102 x 6.4	2.86	1.967	11.8	16a		3.20	3.59
64.9	7a		2.90	2.2		16b	2L 152 x 152 x 9.5	3.20	3.58
	7b	2L 102 x 102 x 7.9	2.90	2.2	5.9	17a		3.20	3.808
59.0	8a		3.02	2.23		17b	2L 152 x 152 x 9.5	3.20	3.808
	8b	2L 102 x 102 x 9.5	3.02	2.23					

En el análisis dinámico, paso a paso se adoptó un amortiguamiento proporcional del 1% y la respuesta dinámica de la torre fue calculada para las tres metodologías de simulaciones. En la Figura 11 se muestran las historias de desplazamientos en la parte superior de la torre obtenidas con las tres metodologías de simulación empleadas en este trabajo.

Se realizó la simulación de 10 series para cada metodología de simulación. Una vez realizados todos los análisis, la respuesta característica se puede calcular con:

1) Por medio de una distribución de extremos de Gumbel (Carril, 2000) que admite una curva exponencial para la distribución de probabilidad, considerando

un índice de confianza del 95%, es decir, una probabilidad del 5% de ser excedida; se considera como valor característico la variable seleccionada aquel valor que más se aproxime al valor obtenido de x_c ,

Tabla 7
Periodos y frecuencias de vibrar.

Modo	Frecuencia (Hz)	Periodo (s)
1	0.7448	1.3422
2	2.3581	0.4206
3	4.4604	0.2242

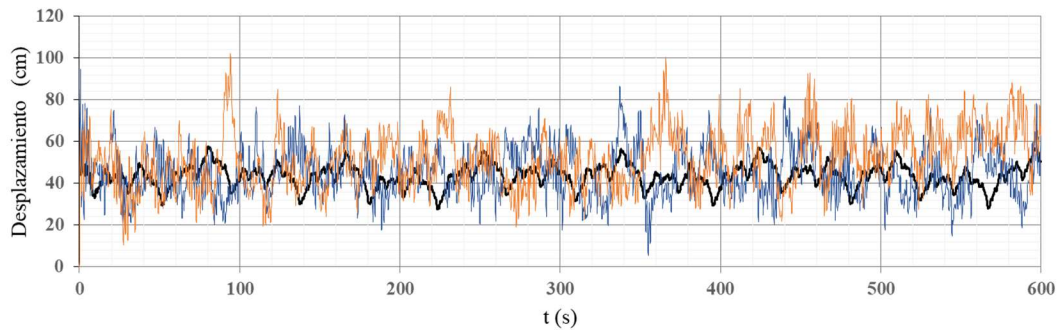


Figura 11. Comparación de la historia de desplazamientos en la parte superior de la torre:

— Viento sintético, — dos parámetros, — cuatro parámetros.

$$x_c = \bar{x} + \frac{w}{\tilde{\alpha}} \quad (42)$$

Donde,

$$w = -\ln[-\ln(0.95)] = 2.970195249 \quad (43)$$

La medida de dispersión,

$$\tilde{\alpha} = \frac{\pi}{\sigma\sqrt{6}} \quad (44)$$

Donde σ es la desviación estándar y la moda es,

$$\bar{x} = \mu - \frac{\gamma}{\tilde{\alpha}} \quad (45)$$

Donde la media es μ y la constante de Euler $\gamma = 0.5772157$.

2) Por medio de una distribución Gaussiana con una probabilidad del 95% de ocurrencia, es decir, del 5% de ser excedida,

$$x_{m\acute{a}x} = \mu + 1.65\sigma \quad (46)$$

Donde $x_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo probable de la variable aleatoria.

Utilizando la terminología empleada en el MDOC-2020, la relación entre la respuesta máxima y la media se conoce como Factor de Amplificación Dinámica (FAD). En la Tabla 8 se muestran los resultados de los desplazamientos medios probables, X_{medio} (m); los desplazamientos máximos dinámicos probables, $X_{m\acute{a}x}$ (m); y el FAD asociado a ellos.

En la Tabla 8 se puede ver que los desplazamientos medios obtenidos con las tres metodologías son similares. Por otro lado, la respuesta máxima probable se obtiene con la técnica de cuatro parámetros (1.11 m); sin embargo, el FAD mayor se obtiene para la metodología de dos parámetros (2.60). El FAD obtenido con la metodología de Viento Sintético es del orden del 51% menos comparado con el FAD obtenido con la metodología de los dos parámetros, y del orden del 56% menos comparado con el obtenido con la metodología de cuatro parámetros. De forma general, y considerando que la metodología de cuatro parámetros da valores medios y máximos, mayores que las otras dos metodologías, se puede considerar que del lado de la seguridad, es la metodología ingenierilmente la recomendable.

Tabla 8
Desplazamientos medios y máximos dinámicos, así como su FAD.

Metodología	$X_{m\acute{a}x}(m)$	$X_{medio}(m)$	FAD
Dos parámetros	1.07	0.41	2.60
Cuatro parámetros	1.11	0.47	2.36
Viento sintético	0.53	0.40	1.33

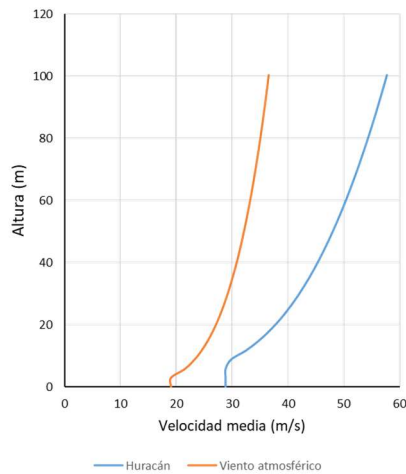


Figura 12. Comparación de perfiles teóricos de velocidad media.

Resultados: huracanado

Para las simulaciones de viento huracanado se consideró una velocidad de 30 m/s (108 km/h), a 10 m de altura promediada a 10 minutos y una altura gradiente $\delta=862.45$ m. En la Figura 12 se muestra la comparación de los perfiles de velocidad media para viento atmosférico considerado con la ley logarítmica corregida y con la expresión (29).

En la Figura 13 se muestran las historias de viento simuladas por la técnica espectral con cuatro parámetros para el caso de huracanes. Las velocidades se calcularon en un punto ubicado a una altura de 40 m.

En la Figura 14 se muestran las historias de desplazamientos en la parte superior de la torre, obtenidas considerando en las simulaciones del viento sinóptico

una velocidad media a 10 m de altura de 23.74 m/s y para el viento huracanado de 30 m/s.

En la Tabla 9 se muestran los desplazamientos medios y máximos probables calculados con historias de tiempo simuladas considerando viento huracanado.

El FAD obtenido para una carga de huracán es del 4.25, es decir, la respuesta máxima probable es del orden de 4.25 veces la respuesta media. Es lógico que el modelo elástico de la torre no refleja el comportamiento real que se obtendría ante una carga de huracán, como la contemplada en este trabajo, ya que es probable que incurriera en el intervalo inelástico primero, y se formarían articulaciones plásticas antes del colapso. Este tema será abordado en investigaciones futuras por los autores de este trabajo.

Conclusiones

Las torres autosoportadas para telecomunicaciones son estructuras altamente sensibles a las cargas eólicas y, debido a su importancia económica y social, se clasifican como estructuras que deben permanecer en operación después de la ocurrencia de algún evento extraordinario de la naturaleza, como son vientos atmosféricos fuertes o ciclones tropicales.

Para obtener la carga eólica, en este trabajo se realizaron simulaciones de historias de viento atmosférico por medio de dos metodologías espectrales conocidas como de dos y cuatro parámetros, así como la metodología ampliamente utilizada en Suramérica, denominada Viento Sintético. Para el caso de simulaciones de vientos huracanados, se utilizó la técnica de Montecarlo y parámetros de ciclones tropicales sugeridos en la bibliografía especializada. Se realizaron 10

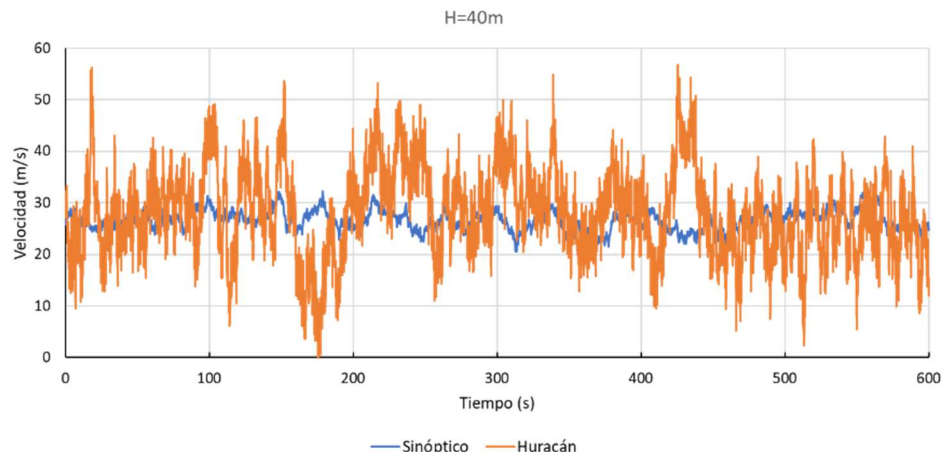


Figura 13. Historia de fuerzas sintéticas, viento sinóptico y huracán a 40 m de altura.

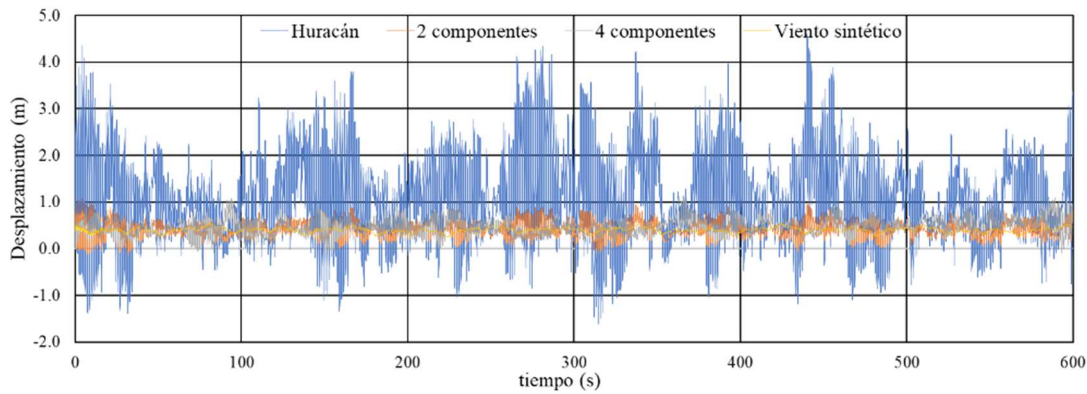


Figura 14. Respuesta dinámica de desplazamientos en la parte superior de la torre.

Tabla 9
Desplazamientos medios y máximos dinámicos, así como su FAD.

Metodología	$X_{\text{máx}}(\text{m})$	$X_{\text{medio}}(\text{m})$	FAD
Huracán	4.60	1.08	4.25

series de simulaciones para elaborar los análisis dinámicos, uno para cada técnica de simulación, con lo cual se pretende considerar la forma modal y los modos superiores de vibrar de la estructura, evitando utilizar la metodología simplificada recomendada en los códigos de diseño y que en ocasiones no reflejan las características estructurales necesarias para evitar colapsos.

Como ejemplo de aplicación se utilizó una torre de celosías de 103 m de alto con características estructurales comúnmente utilizadas en México. Los resultados obtenidos muestran que la mejor técnica para hacer simulaciones de viento atmosférico es la metodología espectral de dos o cuatro parámetros y que es posible obtener la respuesta máxima dinámica de una torre ante cargas de huracán, procedimiento no establecido en ningún código de diseño. Con lo anterior se contribuye con el diseño de estructuras resilientes y sustentables ante los efectos adversos de los cambios climáticos, al conocer el estado de carga que hará que probablemente las torres autosoportadas incursionen en el intervalo inelástico para que se diseñe adecuadamente y se mantenga funcionando durante la ocurrencia de una carga eólica extrema.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la Facultad de Ingeniería Civil, que por medio de la Coordinación de la Investigación

Científica, otorgaron el apoyo necesario para la realización de este trabajo. Asimismo, se agradece al CONACYT por el apoyo otorgado para la realización de estudios de posgrado del autor Carlos M. Patlán M. Especial agradecimiento para el Dr. Iván Huergo Ríos, quien apoyó con los análisis estructurales.

Referencias

- AIJ, 2005, Recommendations for Load on Buildings, Chapter 6, Wind Loads, *Architectural Institute of Japan*.
- AS/NZS 1170.2:2021, 2021, Structural Design Actions, Part. 2, Wind actions, *Australian/New Zealand Standard*. ISBN 978-0-7337-9805-4.
- AS 3995-1994, 1994, Australian Standard, Design of Steel lattice towers and masts. ISBN 0 7262 8945 6.
- Carril, C., 2000, Análise numérica e experimental de efeito para telecomunicações: Tesis Doctoral, *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo.
- Chaves, J., 2009, Análise dinâmica de pórticos metálicos contraventados: Tesis de Maestría, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, *Universidade de Brasília*, Brasília.
- Chen, J. and Liang, L., 2012, Investigation on Dynamic Response of Steel Tower Structure under Time-history Wind Load: *Applied Mechanics and Materials*, 166-169, 699-707. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.699](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.166-169.699)



- Chen, X. and Kareem, A., 2005, Proper orthogonal decomposition-based modeling analysis and simulation of dynamic wind load effects on structures: *Journal of Engineering Mechanics*, 131(4), 325-339. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2005\)131:4\(325\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:4(325))
- Davenport, A.G., 1962, The response of slender line-like structures to a gusty Wind: *Proc. Institution of Civil Engineers*, 23, 389-408.
- Fernández, L., Chavero, B., Martín, R. and Elena, P., 2020, Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197. <http://doi.org/10.1016/j.jwea.2019.104078>
- Franco, R., 1993, Direct along wind dynamic analysis of tall structures, Departamento de Ingeniería de Estructuras y Cimentaciones, Boletín técnico de la *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*, São Paulo.
- Glanville, M.J. and Kwok, K.C., 1997, Wind-induced deflection of freestanding lattice towers: *Engineering Structures*, 19(1), 79-91. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00025-9)
- Harris, R.I. and Deaves, D.M., 1980, The structure of strong winds, Wind Engineering in the Eighties: Proceeding of the CIRIA, Conference held on 12-13 November 1980: *London, Construction Industry Research and Information Association*, paper 4.
- Hernández-Barrios, H., Muñoz-Black, C. and López-López, A., 2009, Along-wind response in prismatic structures, design statements in Mexico: *11th Americas Conference on Wind Engineering*, San Juan Puerto Rico, June 22-26.
- Hernández-Barrios, H., 2010, El impacto del cambio climático en el diseño eólico de estructuras civiles en México: *México, 6to. Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología, COECyT, Michoacán*, artículo 434.
- Hernández-Barrios, H., De León-Escobedo D. and Valdés-Vázquez, G., 2013, Simplified expresion to predict the Dynamic response of self-supporting tower: *Structure and Infrastructure Engineering*. <http://dx.doi.org/10.1080/15732479.2012.759239>
- Hernández-Barrios, H., Mosqueda, S. and Huergo, R.I., 2018, Respuesta eólica de Estructuras tipo punto ante Viento Sintético: *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, SMIE, noviembre, Campeche, Campeche, México*.
- Holmes, J.D., 1994, Along-wind response of lattice towers: part I-derivation of expression for gust response factors: *Engineering Structures*, 16(4), 287-292. [https://doi.org/10.1016/041-0296\(94\)90069-8](https://doi.org/10.1016/041-0296(94)90069-8)
- Holmes, J.D., 1996a, Along-wind response of lattice towers-II. Aerodynamic damping and deflections: *Engineering Structures*, 18(7), 483-488. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00131-X](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00131-X)
- Holmes, J.D., 1996b, Along-wind response of lattice towers-III. Effective load distributions: *Engineering Structures*, 18(7), 489-494. [https://doi.org/10.1016/0141-0296\(95\)00166-2](https://doi.org/10.1016/0141-0296(95)00166-2)
- Huergo, R.I., 2021, Control pasivo de vibraciones inducidas por viento en edificios altos con base flexible: Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Leite, E., 2015, Análise comparativa entre respostas de torre de transmissão sujeita a carregamentos obtidos através do método do vento sintético e da norma NBR 6123/88: Tesis de Maestría, *Universidade Tecnológica Federal do Paraná, programa Pós-graduação em Engenharia Civil*.
- León-Cruz, J.F., 2019, Climatología y meteorología de Tornados en México: Tesis Doctoral en Geociencias Aplicadas, Posgrado en Geociencias Aplicadas, *Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.*
- Macías-Medrano, J. and Avendaño-García, A., 2014, Climatología de tornados en México, Investigaciones Geográficas: *Boletín del Instituto de Geografía*, 83. ISSN: 0188-4611. <http://doi:10.14350/rig.3526>.
- MDOC, 2008, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento: *México, Comisión Federal de Electricidad*.
- MDOC, 2020, Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento: *México, Comisión Federal de Electricidad*.
- NBCC 48192, 2020, National Building Council Canada, 1, Structural Commentaries (part 4 of Division B). <http://doi.org/10.4224/w324-hv93>
- Reyolando, M.L., Pauletti, R.M., Lanza, E. and Carril Jr., C., 2000, Efeito do Vento sobre uma Torre para Telecomunicações em Concreto Pré-moldado: *V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo*.
- Shinozuka, M. and Jan, M., 1972, Digital simulation of randomness process and its applications: *Journal of Sound and Vibration*, 25(1), 111-128. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90600-1](https://doi.org/10.1016/0022-460X(72)90600-1)
- Smith, W.B., 2007, Communication Structures, *Thomas Telford*. ISBN: 978 0 7277 3400 6.

- Snaiki, R. and Teng, W., 2018, A semi-empirical model for mean wind velocity profile of landfalling hurricane boundary layers: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 180, 249-261.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.08.004>
- Solari, G. and Piccardo, G., 2001, Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures: *Probabilistic Eng. Mech.*, 16, 73-86.
- Sosa, E., 2006, Análise estrutural de edifício alto submetido às pressões flutuantes induzidas pela ação do Vento: Tesis de Maestría, *Universidade Federal de Minas Gerais*, Belo Horizonte.
- Soto-Hernández, M.C., 2022, Efectos de las tormentas severas y velocidades de viento en México: Tesis de Maestría en el área de Estructuras, Facultad de Ingeniería Civil, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*.
- S37-2018 CSA, 2018, Antennas, Towers, and Antenna-Supporting Structures, *Canadian Standards Association*.
- Tamura, Y., Cao, S. and Gian, L.T., 2012, Wind characteristics of strong tropical cyclones. Institute, ISFWEIAC-CBRR: *VI National Conference on Wind Engineering*, Roorkee at New Delhi, India.
- TIA-222-G-1, 2019, TIA Standard, Structural Standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures-Addendum 1, *Telecommunications Industry Association*.
- Thai, L.H. and Tamura, Y., 2008, Analysis and identification of multivariate random pressure fields using covariance and spectral proper transformations: *VNU. Journal of Science, Mathematical-Physics*, 24, 209-222.
- Thai, L. H., 2009, Proper orthogonal decomposition and recent advanced topics in wind engineering: *VNU Journal of Science, Mathematical-Physics*, 25, 21-38.
- Tianyou, T. and Wang, H., 2016, Wind Characteristics of a Tropical Storm from Stationary and Nonstationary Perspectives: *The 2016 World Congress on Advances in Civil, Environmental and Materials Research*, ACEM16, Korea.