

# Métodos estáticos equivalentes para el análisis dinámico de edificios altos bajo cargas de viento en Cuba

Equivalent static methods for dynamic analysis of tall buildings under wind loads in Cuba

Fecha de entrega: 13 de julio 2022  
Fecha de aceptación: 18 de enero 2023

Amaya Ballate Delgado, Dora Robert López, Patricia Martín Rodríguez e Ingrid Fernández Lorenzo

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría CUJAE, Calle 114 No. 11901 entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, apartado Postal 19390, La Habana, Cuba, amayaballated@civil.cujae.edu.cu, dorarol@tesla.cujae.edu.cu, patriciamr@civil.cujae.edu.cu, ingridfl@civil.cujae.edu.cu

*Los diseños actuales de edificios altos se caracterizan por un creciente aumento en la altura, una mayor esbeltez y el uso de materiales ligeros por lo que estas estructuras presentan gran susceptibilidad ante las acciones dinámicas de la carga de viento. El método factor de efecto de ráfaga (FER) se emplea en varias normas internacionales para la determinación de la respuesta dinámica de edificios altos bajo carga de viento, este método difiere de la metodología empleada por la norma de viento cubana vigente (NC285, 2003). En este trabajo se compara la norma cubana vigente NC285 (2003) con la propuesta de actualización según los parámetros del viento, el método estático equivalente utilizado, los valores del cortante en la base y los desplazamientos máximos considerando como objetos de estudio dos edificios de 100 y 152 m de altura. Además, se presenta un procedimiento de cálculo de las aceleraciones actuantes y los criterios de aceleraciones límites permisibles. Los resultados en los edificios objeto de estudio muestran que la aceleración máxima transversal rige el estado de servicio para los estudios de confort. Los valores de desplazamientos máximos son mayores para la nueva propuesta de la norma solo en la dirección de viento que proviene directamente del mar.*

*Palabras clave: edificaciones altas, componente dinámica, cargas de viento*

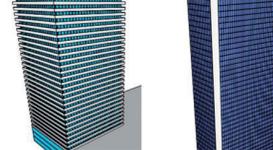
*Current designs of tall buildings are characterized by a gradual increase in height, greater slenderness and the use of lightweight materials, so they are highly susceptible to the dynamic actions of wind load. The gust effect factor (FER) method is used in several international standards for the determination of the dynamic response of tall buildings under wind load, this method differs from the methodology used by the current Cuban wind standard (NC285, 2003). This paper compares the current Cuban standard NC285 (2003) with the proposed update according to the wind parameters, the equivalent static method used, the values of base shear and maximum displacements considering as objects of study two buildings of 100 and 152 m high. In addition, a calculation procedure of the acting accelerations and the permissible limit acceleration criteria are presented. The results for the buildings under study show that the maximum across wind acceleration governs the serviceability state for the comfort studies and the maximum displacement values are higher for the new proposed standard only in the wind direction coming directly from the sea.*

*Keywords: tall buildings, dynamic component, wind loadings*

## Introducción

Los edificios altos son estructuras sensibles frente a las acciones del viento y el sector hotelero demanda este tipo de edificaciones especialmente en sitios donde no hay mucha disponibilidad de terreno. Ejemplo clásico de

esta situación lo constituye la inserción de nuevas obras en las cabeceras de provincias, donde La Habana es el destino turístico que tiene el mayor número de proyectos de edificios altos en ejecución en Cuba. La necesidad de una correcta evaluación de las cargas de viento sobre edificios altos ha motivado el estudio de las tendencias



internacionales en la determinación de su respuesta bajo la acción del viento, donde se ha identificado la importancia de la actualización de la norma cubana de viento vigente (NC285, 2003).

En Cuba, el método de análisis para la consideración de la componente dinámica del viento en las estructuras se incorporó a la norma de viento a partir del año 1983 (NC53-41, 1983, 1990; NC285, 2003). El método se adoptó a partir de los estudios realizados por Llanes Burón (1984a, 1984b, 1988) y el método que propone la norma rusa de cargas en estructuras (SNiP2.01.07-85, 2001). El método propuesto en la NC285 (2003) presenta limitaciones ya que varios parámetros, como el factor de aceleración reducida, no quedan claramente definidos, no se han podido identificar los fundamentos teóricos con los principios y conceptos definidos en la Ingeniería de Viento y no se corresponde con los métodos propuestos en el resto de las normas internacionales (AIJ, 2018; AS/NZS1170.2, 2021; EN1991-1-4, 2005; IS:875(Part-3), 2012; ISO4354, 2020; NBCC, 2020).

A partir del estudio de las referencias internacionales y la comparación de las normas de acción del viento sobre las estructuras se identificó el método factor de efecto de ráfaga FER como el más aplicado internacionalmente para el análisis de edificios altos. Además, el método FER incluye la consideración de las tres componentes: longitudinal, transversal y torsional. Los estudios comparativos entre normas internacionales (García Miranda *et al.*, 2019; López Litvinovich *et al.*, 2018) desarrollados en Cuba han utilizado las características de las velocidades básicas y de turbulencia de los vientos del país para la aplicación de diferentes variantes del método FER según las normativas europea (EN1991-1-4, 2005), internacional (ISO4354, 2020), india (IS:875(Part-3), 2012) y japonesa (AIJ, 2018). Los resultados de estos trabajos mostraron que, a pesar de las diferencias entre los métodos en las normas estudiadas, y que no se conoce la base teórica de la NC285 vigente, en la mayoría de los casos los valores de desplazamientos y fuerzas interiores fueron similares. Además, se identificó la necesidad de evaluar la influencia de las componentes transversales y torsionales en la respuesta frente al viento de los edificios altos.

Otro de los chequeos para tener en cuenta en el análisis de los edificios altos es el efecto de las oscilaciones y

aceleraciones inducidas por el viento en los humanos. La norma cubana de viento vigente NC285 (2003) no contiene ningún procedimiento para la determinación de las aceleraciones inducidas por el viento ni los valores permisibles en edificaciones altas para chequear el estado límite de servicio. Además, el método propuesto para la consideración de los efectos dinámicos de la carga no es compatible con las formulaciones reconocidas internacionalmente para calcular las aceleraciones, que están basadas en el método FER. Se han realizado estudios donde se determinaron las aceleraciones máximas longitudinales, transversales y torsionales mediante una metodología propuesta a partir de la revisión e interpretación de las normativas internacionales de acción del viento sobre las estructuras (Ballate Delgado *et al.*, 2021a, 2021b). Los resultados de estos estudios mostraron que los mayores valores se obtuvieron para la aceleración en la componente transversal.

El presente trabajo tiene como objetivo describir los fundamentos y las metodologías propuestas para la actualización de la norma cubana de viento NC285 (2003) en cuanto a la determinación de las fuerzas de viento y aceleraciones inducidas en edificios altos. Los resultados comparativos entre la norma cubana vigente y las metodologías propuestas se aplican en dos edificios altos de 100 y 152 m de altura de hormigón armado.

## Metodología

### Estudio comparativo entre normas de viento para la determinación de la componente dinámica

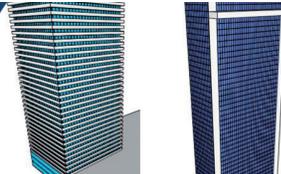
La expresión de las presiones de viento en la dirección longitudinal sobre una edificación se define de forma general como proponen Kwon y Kareem (2013):

$$p_z = q_z G C_p \quad (1)$$

donde  $q_z$  es la presión del viento en la altura  $z$ ,  $G$  es el factor de efecto ráfaga y  $C_p$  es el coeficiente de presión. La presión del viento puede ser generalizada según:

$$q_z = \frac{1}{2} \rho V_0^2 C_{\text{exposición}} C_{\text{topografía}} C_{\text{dirección}} C_{\text{importancia}} C_{\text{(otro)}} \quad (2)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $C_{\text{exposición}}$  es el perfil de



velocidad o factor de exposición,  $C_{topografía}$  es el factor de topografía,  $C_{dirección}$  es el factor de direccionalidad del viento,  $C_{importancia}$  es el factor de importancia del edificio y  $C_{(otro)}$  es un factor que tiene en cuenta otros aspectos, como la zona de huracanes o el intervalo medio de recurrencia (periodo de retorno).

Como refleja el estudio de Kwon y Kareem (2013) se encontró que una causa importante de la divergencia entre las normas era la definición del perfil de la velocidad del viento adoptada por cada norma (logarítmica o potencial), y la selección de la altura de referencia para el cálculo de la carga (0.6H en la ASCE 7-10 (2010) y en la EN1991-1-4 (2005) y H para el NBCC (2020) y la AS/NZS1170.2 (2021), donde H es la altura total de la edificación).

El factor de efecto de ráfaga para la componente longitudinal se puede escribir en formato general según (Kwon y Kareem, 2013):

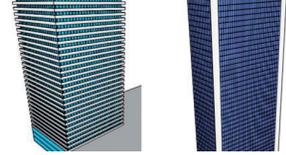
$$G = \frac{GLF}{G_q} \quad (3)$$

donde GLF es el factor de carga de ráfaga,  $G_q$  es el factor de ráfaga para la presión de la velocidad del viento. La expresión (3) representa lo que se definirá como coeficiente dinámico global para tener en cuenta las fuerzas estáticas equivalentes en la dirección longitudinal. GLF fue definido originalmente por Davenport (1967) como:

$$GLF = 1 + r\sqrt{g_B^2 B + g_R^2 R} \quad (4)$$

Tabla 1: Comparación de la consideración del efecto dinámico y las componentes de la respuesta entre las normas internacionales de viento estudiadas.

Normas	Utilización del coeficiente dinámico global para la componente longitudinal	Consideración de las componentes longitudinal, transversal y torsional
ASCE 7-10 (2010)	Definido como G (factor de efecto de ráfaga). Tiene un factor multiplicativo adicional de 0.925 introducido para ajustar la predicción para que coincida con versiones anteriores de la norma.	Las metodologías para estimar el máximo de viento en la dirección transversal y la carga de torsión se proporcionan con un enfoque estático de cargas parciales.
EN1991-1-4 (2005)	Considera el producto $c_s c_d$ denominado factor estructural. - $c_s$ tiene en cuenta la no simultaneidad de ocurrencia de los máximos de presión sobre la superficie. - $c_d$ tiene en cuenta el efecto de las vibraciones en la estructura debido a la turbulencia.	Considera únicamente la componente longitudinal. Si el elemento se estudia de manera aislada ofrece métodos para estimar la respuesta longitudinal y transversal. La torsión se estima mediante la aplicación de combinaciones de carga no uniformes.
NBCC (2020)	Considera el factor de efecto de ráfaga $G_D$ que se debe calcular para el diseño del sistema estructural principal por la expresión: $G_D = 1 + g_p \frac{\sigma}{\mu}$	Las metodologías para estimar el máximo de viento en la dirección transversal y la carga de torsión se proporcionan con un enfoque de carga parcial. La torsión se estima mediante la aplicación de combinaciones de carga estáticas no uniformes.
AS/NZ1170.2 (2021)	Se describe como factor de respuesta dinámica $c_{dyn}$ y se determina para estructuras o elementos estructurales con frecuencias naturales fundamentales del primer modo. Para valores mayores que 1 Hz, $c_{dyn}=1$ . Para valores menores que 1 Hz, entre otras especificaciones, se calcula por la expresión: $c_{dyn} = \frac{1+2I_h \sqrt{g_v^2 B_S + \frac{H_S g_R^2 S E_i}{\xi}}}{1+2g_v I_h}$	Se consideran las tres componentes de la respuesta frente al viento.
AIJ (2018)	Se define como factor de efecto de ráfaga $G_D$ para las cargas longitudinales $G_D = 1 + g_D \frac{C'g}{C_g} \sqrt{1 + \phi_D^2 R_D}$	Se consideran las tres componentes de la respuesta frente al viento.
ISO4354 (2020)	Considera el factor de respuesta dinámica $c_{dyn}$ . Tiene en cuenta las presiones fluctuantes debidas a las ráfagas de viento. $C_{dyn} = \frac{1+2I_{vh} \sqrt{g_{DB}^2 B_D^2 + g_{DR}^2 R_D^2}}{1+2g_v I_{vh}}$	Se consideran las tres componentes de la respuesta frente al viento.



donde  $g_B$  y  $g_R$  son los factores máximos para las respuestas no resonantes y resonantes, respectivamente,  $r$  es la variable relacionada con la intensidad de la turbulencia,  $B$  y  $R$  son los factores de respuesta no resonantes y resonantes, respectivamente. El factor de ráfaga para la presión de la velocidad del viento se define según:

$$G_q = 2G_v - 1 = 1 + rg_v \quad (5)$$

donde  $g_v$  es el factor máximo de la velocidad del viento. En las normas AIJ (2018), NBCC (2020) e ISO4354 (2020), el factor de ráfaga  $G_q$  se toma como unidad porque se utiliza la velocidad media del viento en lugar de la velocidad de ráfaga.

La Tabla 1 presenta una descripción de la utilización del coeficiente dinámico global para la componente longitudinal según las normas de viento internacionales, así como la forma en que consideran las componentes de la respuesta del viento longitudinal, transversal y torsional.

Todas las normas utilizan la expresión (6) en diferentes formas para el factor de máximo resonante  $g_R$  (Kwon y Kareem, 2013). En cuanto al factor máximo de la componente no resonante  $g_B$ , las normas ASCE 7-10 (2010), AS/NZ1170.2 (2021) e ISO4354 (2020) utilizan un valor constante, mientras que AIJ (2018), EN1991-1-4 (2005) y NBCC, (2010) utilizan el factor máximo  $g$  determinado por:

$$g = \sqrt{2 \ln(vT)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(vT)}} \quad (6)$$

donde  $v$  es la frecuencia reducida y  $T$  es el periodo de tiempo utilizado para el intervalo de promediación de la velocidad media en segundos.

Para todas las normas el factor de respuesta no resonante  $B$  depende de las dimensiones del edificio y la escala de longitud de la turbulencia  $L(z)$ . La formulación de  $B$  varía considerablemente entre las normas. En la norma NBCC (2010), este factor se proporciona gráficamente. El factor de respuesta resonante  $R$  se expresa generalmente en función de un factor de reducción de tamaño o reducción por dimensión  $S$ , un factor de energía  $E$  que es un parámetro adimensional que toma en cuenta el contenido espectral de la turbulencia en el sentido longitudinal y una

relación de amortiguamiento, la expresión (7) muestra la fórmula generalizada. El factor  $E$  tiene en cuenta la escala de turbulencia, la frecuencia de oscilación de la estructura y la velocidad media a la altura de referencia, mientras que el factor  $S$  depende de la frecuencia, de parámetros geométricos de la estructura y de la velocidad media a la altura de referencia. En la Tabla 2 se muestran las características de algunos parámetros de la respuesta no resonante y resonante según las diferentes normativas.

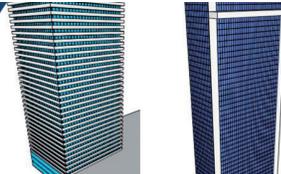
$$R = \frac{\pi SE}{4\xi} \quad (7)$$

Tabla 2: Comparación de parámetros de la respuesta no resonante y resonante entre las normas internacionales de viento estudiadas.

Normas	Consideraciones de la escala de longitud de turbulencia	Consideración para el espectro de potencia
ASCE 7-10 (2010)	$L(z) = l \left( \frac{z}{10} \right)^\epsilon$	Ecuación de Kaimal
EN1991-1-4 (2005)	$L(z) = 300 \left( \frac{z}{200} \right)^\alpha$ $\alpha = 0.67 + 0.05 \ln(z_0)$ $L(z) = L(z_{min})$ para $z < z_{min}$	
NBCC (2020)	Escala de longitud constante en todas las alturas	Ecuación de Davenport
AS/NZ1170.2 (2021)	$L_h = 85 \left( \frac{h}{10} \right)^{0.25}$	Ecuación de von Karman
AIJ (2018)	$L_z = \left\{ \begin{array}{l} 100 \left( \frac{z}{30} \right)^{0.5} \\ 100 \text{ para } z \leq 30 \end{array} \right\}$	
ISO4354 (2020)	$L_v = 100 \left( \frac{z}{30} \right)^{0.5}$	

La elección del espectro influye en el valor del factor de energía y en el factor de respuesta resonante resultante. Los factores de reducción de tamaño  $S$ , aunque todos incorporan la frecuencia natural, la velocidad y las dimensiones del edificio, varían considerablemente en las respectivas formulaciones de las normas analizadas. Las normas AS/NZS1170.2 (2021), AIJ (2018) e (ISO4354, 2020) incluyen un factor de corrección de modo que es igual a la unidad para un modo de vibración lineal.

Para la determinación de las fuerzas interiores y desplazamientos en edificios altos debido a las acciones dinámicas de la turbulencia atmosférica del viento es necesario tener en cuenta las componentes de la respuesta que son divididas en respuesta longitudinal, respuesta transversal y respuesta torsional.



En cuanto a la combinación de las componentes de la respuesta, la norma AIJ (2018) y la ISO4354 (2020) presentan combinaciones de los tres efectos sobre la edificación: longitudinal, transversal y torsional. Las tres componentes no actúan independientes, sino que se combina su efecto para obtener el estado de cargas de viento más desfavorable, en donde cada una de ellas no actúa al 100% de su valor. La norma AS/NZS1170.2 (2021) combina las cargas longitudinales y transversales según una ecuación que integra el efecto de acción derivado de la respuesta longitudinal media del viento, de la respuesta máxima longitudinal y la respuesta máxima transversal. La norma NBCC (2020) y ASCE 7-10 (2010) no contemplan un enfoque dinámico de combinación de la respuesta.

Se propone para la actualización de la nueva propuesta de norma cubana de viento NC285 (2003) seleccionar para la consideración de la componente dinámica debido a la turbulencia atmosférica el método factor de efecto de ráfaga basado en la norma japonesa AIJ (2018) que presenta el mismo enfoque que la norma ISO4354 (2020). La descripción del método en la norma AIJ (2018) contiene la presentación de todos los parámetros involucrados de manera independiente, a diferencia de la norma ASCE 7-10 (2010) y NBCC (2020) que ofrecen un valor numérico global. Además, los métodos de la norma AIJ (2018) y la ISO-4354 (2020) tienen en cuenta las tres componentes de la respuesta frente al viento y sus combinaciones.

## Determinación de las fuerzas de viento

La norma cubana vigente NC285 (2003) considera la determinación de las fuerzas de viento en sentido longitudinal de la carga a partir de dos componentes: estática y dinámica (ver Tabla 3), las que deben ser calculadas de forma independiente y luego se suman según la ecuación (8).

$$X_v^* = \gamma_s X^E + [\sum_1^S X_{i=1}^D]^2]^{1/2} \quad (8)$$

donde  $X_v^*$  es el valor de la solicitación (momento flector, fuerza cortante, fuerza axial y otras) de cálculo total debido al efecto de las cargas de viento,  $X^E$  es el valor de la solicitación debido a la componente estática de la carga de viento,  $X^D$  representa el valor de la solicitación debido a la componente dinámica de la carga de viento,  $S$  es el número de modos de oscilaciones que se tienen en cuenta

Tabla 3: Componentes para el cálculo de las cargas de viento según NC285 (2003)

Componente estática	Componente dinámica
$Q = q_{10} C_t C_s ChCrCra C_f [A]$	$Q^n = M_j C^D C_{CE} N_{ji}$
<p>Q (kN): fuerza del viento</p> <p><math>q_{10}</math> (kN/m<sup>2</sup>): presión básica del viento</p> <p><math>C_t</math>: coeficiente de recurrencia</p> <p><math>C_h</math>: coeficiente de altura</p> <p><math>C_r</math>: coeficiente de ráfaga</p> <p><math>C_{ra}</math>: coeficiente de reducción de área</p> <p><math>C_f</math>: coeficiente de forma</p> <p><math>A_{neta}</math> (m<sup>2</sup>): área tributaria</p>	<p><math>M_j</math>: j-ésima masa concentrada del tramo (kg)</p> <p><math>C^D</math>: es el coeficiente dinámico del modo i-ésimo</p> <p><math>C_{CE}</math>: coeficiente que tiene en cuenta la correlación espacial de las pulsaciones según la altura y fachada del edificio</p> <p><math>N_{ji}</math>: aceleración reducida de la j-ésima masa (m/s<sup>2</sup>)</p>

en el cálculo y  $\gamma_s$  es el coeficiente de mayoración de la carga (1.4).

En la actualización de la norma NC285 (2003) se propone la ecuación (9) que incluye tanto los efectos estáticos como los dinámicos. Estos últimos se consideran a partir de un coeficiente denominado coeficiente dinámico.

$$F_{V(z_e)} = q_{p(z_e)} C_f C_D A = q_{10} C_t C_h C_r C_f C_D A \quad (9)$$

donde  $F_v(N)$  es la fuerza de viento,  $q_{p(z_e)}$  (N/m<sup>2</sup>) es la presión máxima,  $C_f$  es el coeficiente de fuerza y  $C_D$  es el coeficiente dinámico.  $A$  (m<sup>2</sup>) es el área tributaria en dependencia del tipo de estructura,  $q_{10}$  (N/m<sup>2</sup>) es la presión básica del viento,  $C_h$ ,  $C_t$ , y  $C_r$  son los coeficientes de altura, recurrencia y ráfaga, respectivamente, y  $z_e$  es la altura de referencia.

La presión básica del viento es uno de los aspectos que se modifican también con relación al código vigente. Estudios realizados sobre las velocidades básicas del viento en Cuba han propuesto nuevas estimaciones de estos valores (Fernández Lorenzo y Elena Parnás, 2016; Luis García, 2017). La velocidad básica para La Habana, que pertenece a la región 2 en la nueva distribución, es de 33 m/s en un intervalo de promediación de 10 min, mientras que para esta zona en la NC285 (2003) es de 45.6 m/s que responde a unas presiones básicas de 0.66 y 1.3 kN/m<sup>2</sup>, respectivamente.

El coeficiente de altura es otro parámetro que se propone modificar en la norma. Se adoptó su formulación a partir del análisis de las normas de viento más importantes del mundo teniendo en cuenta el estudio realizado por Kwon y Kareem (2013). En cuanto a las categorías de terreno, los

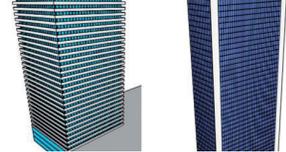
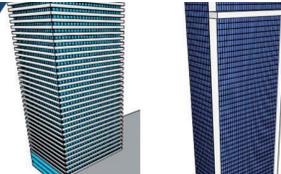


Tabla 4: Parámetros para determinar el coeficiente dinámico longitudinal.

Coeficiente dinámico longitudinal	
$C_{DL} = \frac{G_L}{1+7I(z_D)}$	$G_L$ : factor de efecto de ráfaga longitudinal $Z_D$ : altura de referencia para el cálculo dinámico $0.6h$ para estructuras verticales $I(z_D)$ : intensidad de turbulencia calculada a la altura de referencia $Z_D$
Factor de efecto de ráfaga longitudinal	
$G_L = 1 + 2I(z_D)\sqrt{g_{LB}^2 B_L^2 + g_{LR}^2 R_L^2}$	$g_{LB}$ : factor de máximo para la componente de fondo, puede equipararse a $g=3.5$ $g_{LR}$ : factor máximo para la componente resonante $B_L$ : factor de la respuesta de fondo que toma en cuenta la correlación parcial de las presiones actuando sobre la estructura $R_L$ : factor de respuesta resonante longitudinal
Factor máximo para la componente resonante	
$g_{LR} = \sqrt{2\ln(v_L T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(v_L T)}} \geq 3$	$T$ : intervalo de promediación de la velocidad media del viento, $T=600$ s $v_L$ : frecuencia esperada de la respuesta longitudinal
Frecuencia esperada	
$v_L = n_L \sqrt{\frac{R_L^2}{B_L^2 + R_L^2}} \geq 0.08 \text{ Hz}$	$n_L$ : frecuencia fundamental en el sentido longitudinal (en Hz)
Factor de la respuesta de fondo	
$B_L = \frac{1+0.2\alpha}{1 + \frac{0.63 \left(\frac{\sqrt{bh}}{L_v(z_D)}\right)^{0.56}}{\left(\frac{h}{b}\right)^\gamma}}$	$\alpha$ : exponente de la ley potencial de variación de la velocidad media del viento en función del terreno $b$ : ancho de la estructura (perpendicular a la dirección de viento) $h$ : altura de la estructura $\gamma$ : constante que toma valores de 0.15 para $h/b < 1$ y 0.07 para $h/b \geq 1$ $L_v(z_D)$ : escala longitudinal de la turbulencia calculada a la altura de referencia
Escala longitudinal de la turbulencia	
$L_{v(z_D)} = 300(Z_D/200)^v$ $v = 0.67 + 0.05\ln(z_o)$	$z_o$ : longitud de rugosidad en metros, depende de las categorías de terreno y se determina a partir de una equivalencia con el factor $\alpha$
Factor de respuesta resonante longitudinal	
$R_L = \left(1 + 0.6\alpha\right)^{\frac{3}{2+k}} K \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_L} E_L S (0.57 - 0.35\alpha + r)}$	$k$ : exponente de potencia de la forma del primer modo de la vibración expresado como $\Phi = \left(\frac{z}{h}\right)^k$ , depende del tipo de estructura $K$ : factor de corrección del modo $K = 0.27k + 0.73$ $\xi_L$ : razón de amortiguamiento en el primer modo longitudinal de vibración $E_L$ : parámetro adimensional que toma en cuenta el contenido espectral de la turbulencia en el sentido longitudinal $S$ : factor de reducción por dimensión $r$ : factor que representa los efectos de correlación de las presiones a barlovento y las presiones a sotavento
Parámetro adimensional $E_L$	
$E_L = \frac{4 \left(\frac{n_L L_v(z_D)}{U_m(z_D)}\right)}{\left\{1 + 70.8 \left(\frac{n_L L_v(z_D)}{U_m(z_D)}\right)^2\right\}^{5/6}}$	$U_m(z_D)$ : velocidad media calculada a la altura de referencia para el análisis dinámico $U_m(z_D) = U_0 C_{e(z_D)} C_{o(z_D)}$
Factor de reducción por dimensión	
$S = \frac{0.9}{\sqrt{1 + 6 \left(\frac{n_L h}{U_m(z_D)}\right)^2 \left(1 + 3 \frac{n_L b}{U_m(z_D)}\right)}}$	
Factor $r$	
$r = \frac{2\sqrt{0.053 - 0.042\alpha}}{1 + 20 \frac{n_L b}{U_m(z_D)}}$	



estudios actualizados proponen una mayor discretización de las rugosidades en comparación con la NC285 (2003) y quedarán más detalladas las categorías de terreno, en

especial una mejor caracterización del terreno llano cercano a la costa marina.

El coeficiente de ráfaga también se propuso modificar

Tabla 5: Fuerzas estáticas equivalentes transversales. Coeficiente dinámico.

Fuerzas estáticas equivalentes en el sentido transversal	
$f_{T(z)} = 3q_{p(h)} C_{TA} \left(\frac{z}{h}\right)^k C_{DT}$	$C_T$ : coeficiente de fuerza aerodinámica (asociado al momento de vuelco fluctuante) $C_{DT}$ : coeficiente dinámico transversal
Presión máxima de viento $q_{(h)}$	
$q_{p(h)} = q_{10} C_{h(h)} C_t C_{r(h)}$	$C_{h(h)}$ : coeficiente de altura calculado a la altura máxima $C_h = \left(1.7 \left(\frac{h}{z_G}\right)^\alpha\right)^2$ $C_t$ : coeficiente de recurrencia (igual a 1) $C_{r(h)}$ : coeficiente de ráfaga calculado a la altura $h$ $C_r = 1 + 2gI_h$
Coeficiente de fuerza aerodinámica	
$C_T = 0.0082 \left(\frac{d}{b}\right)^3 - 0.071 \left(\frac{d}{b}\right)^2 + 0.22 \frac{d}{b}$	$b$ : ancho del edificio (m) perpendicular a la dirección de viento analizada $d$ : Profundidad de la edificación (dimensión paralela a la dirección actuante del viento analizada)
Coeficiente dinámico transversal	
$C_{DT} = \frac{G_T}{1 + 7I_{(h)}}$	$G_T$ : factor de efecto de ráfaga transversal; $I_{(h)}$ : intensidad de turbulencia calculada a la altura máxima de la edificación
Factor de efecto de ráfaga transversal	
$G_T = g_T \sqrt{1 + R_T^2}$	$g_T$ : factor transversal máximo $R_T$ : factor de respuesta resonante transversal $h$
Factor transversal máximo	
$g_T = \sqrt{2 \ln(n_T T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_T T)}} \geq 3$	$T$ : intervalo de promediación de la velocidad media del viento, $T = 600$ s $n_T$ : frecuencia fundamental en el sentido transversal (en Hz).
Factor de respuesta resonante transversal	
$R_T = K \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_T} E_T}$	$K$ : factor de corrección del modo $\xi_T$ : es la razón de amortiguamiento en el primer modo transversal de vibración (se tomó el mismo valor que para la longitudinal) $E_T$ : coeficiente del espectro de fuerza transversal
Coeficiente del espectro de fuerza transversal	
$E_T = \sum_{j=1}^m \left[ \frac{4k_j (1 + 0.6\beta_j) \beta_j}{\pi} \frac{\left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2\right\}^2 + 4\beta_j^2 \left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2} \right]$	$m = \begin{cases} 1 & \text{para } d/b < 3 \\ 2 & \text{para } d/b \geq 3 \end{cases}$
Parámetros $k_1$ , $n_{s1}$ y $\beta_1$ (casos de los edificios estudiados)	
$k_1 = 0.85$ $n_{s1} = \frac{0.12}{\left\{1 + 0.38 \left(\frac{d}{b}\right)^2\right\}^{0.89}} \frac{U_{m(h)}}{b}$	$\beta_1 = \frac{\left(\frac{d}{b}\right)^4 + 2.3 \left(\frac{d}{b}\right)^2}{2.4 \left(\frac{d}{b}\right)^4 - 9.2 \left(\frac{d}{b}\right)^3 + 18 \left(\frac{d}{b}\right)^2 + 9.5 \frac{d}{b} - 0.15} + \frac{0.12}{\frac{d}{b}}$
Parámetros $k_2$ , $n_{s2}$ y $\beta_2$	
$k_2 = 0.02$ $n_{s2} = \frac{0.56}{\left(\frac{d}{b}\right)^{0.85}} \frac{U_{m(h)}}{b}$	$\beta_2 = \frac{0.28}{\left(\frac{d}{b}\right)^{0.34}}$ $U_{m(h)}$ : velocidad media del viento calculada a la altura máxima de la edificación

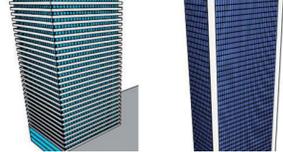
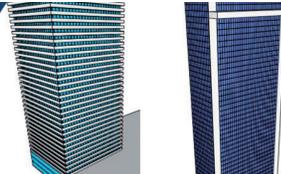


Tabla 6: Momento estático equivalente torsional. Coeficiente dinámico.

Momento estático equivalente en sentido torsional	
$f_{M(z)} = 1.8q_{(h)}C_MAb\left(\frac{z}{h}\right)^k C_{DM}$	$q_{(h)}$ : presión de viento máxima calculada a la altura máxima $C_M$ : coeficiente de fuerza aerodinámica (asociado al momento de vuelco fluctuante) $A$ (m <sup>2</sup> ): área proyectada a la altura $z$ $C_{DM}$ : coeficiente dinámico torsional
Coeficiente de fuerza aerodinámica	
$C_M = \left(0.0066 + 0.015\left(\frac{d}{b}\right)^2\right)^{0.78}$	$b$ : ancho del edificio (m) perpendicular a la dirección de viento analizada $d$ : Profundidad de la edificación (dimensión paralela a la dirección actuante del viento analizada)
Coeficiente dinámico torsional	
$C_{DM} = \frac{G_M}{1+7I_{(h)}}$	$G_M$ : factor de efecto de ráfaga torsional $I_{(h)}$ : intensidad de turbulencia calculada a la altura máxima de la edificación $h$
Factor de efecto de ráfaga torsional	
$G_M = g_M\sqrt{1 + R_M^2}$	$g_M$ : factor torsional máximo $R_M$ : factor de respuesta resonante torsional
Factor torsional máximo	
$g_M = \sqrt{2\ln(n_M T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(n_M T)}} \geq 3$	$T$ : intervalo de promediación de la velocidad media del viento, $T = 600$ s $n_M$ : frecuencia fundamental en el sentido torsional (en Hz)
Factor de respuesta resonante torsional	
$R_M = K\sqrt{\frac{\pi}{4\xi_M}E_M}$	$K$ : factor de corrección del modo $\xi_M$ : es la razón de amortiguamiento en el primer modo torsional de vibración (se tomó el mismo valor que para la longitudinal) $E_M$ : factor de energía espectral del momento torsional y su ecuación depende del valor de la velocidad media reducida $U_M^*$
Factor de energía espectral del momento torsional	
para $U_M^* \leq 4.5$ y $6 \leq U_M^* \leq 10$ : $E_M = \frac{0.14J_M^2(U_M^*)^{2\beta_M}}{\pi} \frac{d(b^2+d^2)^2}{l^2b^3}$ para $4.5 < U_M^* < 6$ : $E_M = E_{4.5} \exp\left[3.5 \ln\left(\frac{E_6}{E_{4.5}}\right) \ln\left(\frac{U_M^*}{4.5}\right)\right]$	$l$ : es la mayor dimensión entre $b$ y $d$ $U_M^*$ : velocidad media reducida $J_M, \beta_M$ : coeficientes adimensionales
Velocidad reducida	
$U_M^* = \frac{U_{m(h)}}{n_M\sqrt{bd}}$	$U_{m(h)}$ velocidad media del viento calculada a la altura máxima de la edificación
Parámetros $J_M, \beta_M$	
$J_M = \frac{-1.1\frac{d}{b}+0.97}{\left(\frac{d}{b}\right)^2+0.85\frac{d}{b}+3.3} + 0.17$	para $U_M^* \leq 4.5$
$J_M = \frac{0.077\frac{d}{b}-0.16}{\left(\frac{d}{b}\right)^2+0.96\frac{d}{b}+0.42} + \frac{0.35}{\frac{d}{b}} + 0.095$	para $6 \leq U_M^* \leq 10$
$\beta_M = \frac{\frac{d}{b}+3.6}{\left(\frac{d}{b}\right)^2-5.1\frac{d}{b}+9.1} + \frac{0.14}{\frac{d}{b}} + 0.14$	para $U_M^* \leq 4.5$
$\beta_M = \frac{0.44\left(\frac{d}{b}\right)^2-0.0064}{\left(\frac{d}{b}\right)^4-0.26\left(\frac{d}{b}\right)^2+0.1} + 0.2$	para $6 \leq U_M^* \leq 10$



de un formato tabulado que presenta la norma vigente a la colocación de una expresión que parte de estudios realizados por Davenport (1964). El coeficiente dinámico  $C_D$ , en función de las características de la estructura deberá calcularse para sus tres componentes: longitudinal, transversal y torsional. El  $C_{DL}$ , coeficiente en sentido longitudinal, se calcula a partir de lo planteado en la Tabla 4.

Las componentes transversal y torsional se tienen en cuenta si se cumple la ecuación (10).

$$\frac{h}{\sqrt{ba}} \geq 3 \quad (10)$$

Las fuerzas estáticas equivalentes en el sentido transversal de ser requeridas se calculan a través de las expresiones de la Tabla 5. El momento estático equivalente en la estructura en sentido torsional se calcula mediante las expresiones de la Tabla 6.

Las tres acciones (longitudinal, transversal y torsional) deben ser combinadas para un análisis de las edificaciones frente al viento, así como los efectos asociados (desplazamientos, rotaciones, tensiones, aceleraciones, entre otros) como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Reglas de combinación para efectos y acciones

Combinación	Efecto/Acción longitudinal	Efecto/Acción transversal	Efecto/Acción torsional
1	$L$	$0.4T$	$0.4M$
2	$L\left(0.4 + \frac{0.6}{G_L}\right)$	$T$	$\gamma_{TM}^M$
3	$L\left(0.4 + \frac{0.6}{G_L}\right)$	$\gamma_{TM}^T$	$M$

Los símbolos de la Tabla 7 tienen los siguientes significados:  $L$ ,  $T$ ,  $M$  indican, dependiendo de las circunstancias, los efectos (desplazamientos, rotaciones, tensiones, aceleraciones) o acciones longitudinales, transversales o torsional respectivamente,  $G_L$  es el factor de efecto de ráfaga longitudinal,  $\gamma_{TM}$  es un coeficiente adimensional para la combinación de los efectos o acciones transversales y torsionales que se encuentra tabulado en la nueva propuesta.

## Procedimiento de cálculo de las aceleraciones

El procedimiento para determinar las aceleraciones máximas de la respuesta longitudinal, transversal y

torsional está basado en los parámetros que define el método estático equivalente para obtener las fuerzas dinámicas debido a la acción del viento. Las ecuaciones (11) a (20) muestran las fórmulas para calcular las aceleraciones máximas en un punto  $z$ , así como los factores máximos y desviaciones estándar de la aceleración para cada una de las componentes. La Tabla 8 muestra los parámetros que influyen en la determinación de la aceleración máxima longitudinal. Las normas internacionales y estudios más actuales recomiendan el uso de periodos de retorno de un año para el análisis de los estudios de servicio en la determinación de las aceleraciones. Por tanto,  $U_1$  se refiere a la velocidad media a 10 m de altura, sobre un terreno llano y abierto para un periodo de retorno de 1 año. La metodología que se propone está basada en la norma AIJ (2018). No se especifica directamente que no deban ser calculadas las tres componentes de las aceleraciones, por lo que se realiza en este trabajo el análisis de las tres respuestas frente al viento.

La aceleración longitudinal máxima se calcula mediante la siguiente ecuación:

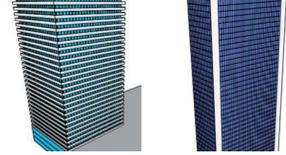
$$a_{pL}(z) = g_{aL}\sigma_{aL} \quad (11)$$

donde  $g_{aL}$  es el factor máximo en sentido longitudinal y  $\sigma_{aL}$  en la ecuación (12) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido longitudinal a una altura  $z$ ,  $n_L$  es la frecuencia fundamental en el sentido longitudinal (en Hz) y  $T$  es el intervalo de promediación de la velocidad media del viento,  $T = 600$  s.

$$\sigma_{aL} = \frac{\rho U_{m1}^2(z_D)bh}{m_L} C_f I_{(z_D)} R_L K_L \phi_L(z) \quad (12)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire asumida como  $1.205 \text{ kg/m}^3$ ,  $U_{m1(z_D)}$  es la velocidad media en m/s y calculada a la altura de referencia para un periodo de retorno de 1 año,  $m_L$  es la masa generalizada para el primer modo longitudinal,  $C_f$  es el coeficiente de forma,  $R_L$  es el factor de respuesta resonante en sentido longitudinal para un periodo de retorno de 1 año,  $K_L$  es un coeficiente adimensional y  $\phi_L(z)$  representa la forma del primer modo longitudinal.

Tabla 8: Parámetros para la determinación de la aceleración



### longitudinal máxima

<p>Velocidad media:</p> $U_{m1(z_D)} = U_1 C_{e(z_D)} C_{o(z_D)}$	<p><math>U_1 = 11</math> m/s (indistintamente de la región)  <math>C_{o(z_D)}</math>: coeficiente de topografía  <math>C_{e(z_D)}</math>: coeficiente de exposición a la altura de referencia</p>
<p>Coficiente adimensional:</p> $K_L = \frac{(k+1) \left[ \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right) + 0.5 \right] - 1}{(k+1)^2 \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right)}$ <p>Cuando <math>\phi_L(z) = \left( \frac{z}{h} \right)^k</math> y <math>C_{o(z)} = 1</math></p>	<p><math>Z_e</math>: altura de referencia de la edificación  <math>Z_0</math>: longitud de rugosidad  <math>k</math>: exponente de la forma del modo</p>
<p>Masa generalizada en el sentido longitudinal:</p> $m_i = \int_0^l m(s) \phi_i^2(s) ds \quad m_1 = \frac{mh}{2k+1}$	<p><math>m_i</math>: masa estructural por unidad de longitud (kg/m)  <math>\phi_i</math>: valor del desplazamiento modal en cada piso del primer modo de oscilación en la dirección longitudinal, normalizados con respecto a su valor máximo</p>
<p>Forma del primer modo longitudinal:</p> $\phi_L(z) = \left( \frac{z}{h} \right)^k$	

La aceleración transversal máxima se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$a_{pT}(z) = g_T \sigma_{aT} \quad (13)$$

donde  $g_T$  es el factor máximo en sentido transversal y  $\sigma_{aT}$  es la desviación estándar de la aceleración en el sentido transversal a una altura ( $z$ ).

$$g_T = \sqrt{2 \ln(n_T T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_T T)}} \geq 3 \quad (14)$$

$n_T$  es la frecuencia natural de vibración del primer modo de oscilación en el sentido transversal.

$$\sigma_{aT} = \frac{0.5 \rho U_{m1}^2(h) b h}{m_T} C_T R_T \phi_T(h) \phi_T(z) \quad (15)$$

$U_{m1(h)}$  es la velocidad media en m/s y calculada a la altura máxima de la edificación para un periodo de retorno de 1 año,  $C_T$  es el coeficiente de fuerza aerodinámica en el sentido transversal,  $m_T$  es la masa generalizada de la edificación en el sentido transversal en kg y  $\phi_T(h) \phi_T(z)$  son las formas del primer modo transversal evaluadas a la altura máxima de la edificación y a la altura  $z$  donde se requiera conocer la aceleración respectivamente.

La masa generalizada en sentido transversal  $m_i$  es la masa estructural por unidad de longitud en kg/m y  $\phi_i$  el valor del desplazamiento modal en cada piso del primer modo de oscilación en la dirección transversal, normalizados con respecto a su valor máximo.

$$m_i = \int_0^l m(s) \phi_i^2(s) ds \quad (16)$$

La aceleración torsional máxima se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$a_{pM}(z) = g_M \sigma_{aM} \quad (17)$$

donde  $g_M$  es el factor máximo en sentido transversal y  $\sigma_{aM}$  es la desviación estándar de la aceleración en el sentido transversal a una altura  $z$ .

$$g_M = \sqrt{2 \ln(n_M T)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \ln(n_M T)}} \geq 3 \quad (18)$$

$n_M$  es la frecuencia natural de vibración del primer modo de oscilación en el sentido torsional.

$$\sigma_{aM} = \frac{0.3 \rho U_{m1}^2(h) b^2 h}{I_M} C_M R_M \phi_M(h) \phi_M(z) \quad (19)$$

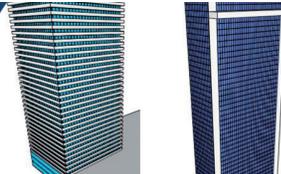
$C_M$  es el coeficiente de fuerza aerodinámica en el sentido torsional,  $I_M$  es el momento polar de inercia (de masa) generalizado (kgm<sup>2</sup>) y  $\phi_M(h) \phi_M(z)$  son las formas del primer modo torsional evaluadas a la altura máxima de la edificación y a la altura  $z$  donde se requiera conocer la aceleración respectivamente.

El momento polar de inercia  $I(s)$  es el momento de inercia (de masa) (flector o polar) de la estructura por unidad de longitud y  $l$  es la altura de la estructura (o del elemento estructural).

$$I_i = \int_0^l I(s) \phi_i^2(s) ds \quad (20)$$

## Valores límites permisibles de las aceleraciones

Para los valores límites de las aceleraciones se propuso adoptar el procedimiento de la norma de viento italiana CNR-DT207 (2008). Según esta norma, para garantizar los criterios de servicio de las edificaciones, cada valor de aceleración máxima en el sentido longitudinal y transversal



en el centro de giro,  $a_{pL}$  y  $a_{pT}$ , no deben exceder los valores límites dados por:

$$a_{lim} = \begin{cases} \frac{a_0}{(n_0)^{0.56}} & \text{para } n_0 < 1 \text{ Hz} \\ a_0 & \text{para } 1 \text{ Hz} \leq n_0 \leq 2 \text{ Hz} \\ 0.5a_0n_0 & \text{para } n_0 \geq 2 \text{ Hz} \end{cases} \quad (21)$$

donde  $a_0$  es el valor de referencia límite de la aceleración:  $a_0 = 6 \text{ cm/s}^2$  para edificios de oficina,  $a_0 = 4 \text{ cm/s}^2$  para edificios de apartamentos;  $n_0$  es la frecuencia dominante en Hz, según  $n_0 = f_L$  para la aceleración en el sentido longitudinal  $a_{Dmax}$ ,  $n_0 = f_T$  para la aceleración en el sentido transversal  $a_T$ .  $f_L$  y  $f_T$  son las primeras frecuencias (fundamentales) en los sentidos longitudinal y transversal, respectivamente.

## Descripción de la edificación objeto de estudio

Los edificios analizados (1 y 2) son de hormigón armado y tienen una altura de 100 m y 152 m respectivamente. La estructura del primer caso de análisis está formada por columnas perimetrales y vigas de hormigón armado, las losas de entrepiso son de hormigón postensado y el núcleo central es de muros de hormigón armado. La relación de amortiguamiento crítica utilizada es de 0.01 de acuerdo con el valor de amortiguamiento estructural calculado según la norma italiana de viento (CNR-DT207, 2008). El sistema de ejes de referencia, las dimensiones de las edificaciones, las direcciones de viento analizadas y los tipos de terreno se muestran en la Figura 1. En la Figura 2 se aprecia una vista en isométrico de los edificios objeto de análisis. La estructura del segundo edificio consiste en losas de entrepisos de hormigón armado in situ sin vigas, apoyadas directamente sobre columnas hormigonadas in situ. La estabilidad horizontal está asegurada por dos sistemas de muros de cortante que componen los pozos de ascensores y escaleras ubicados en los extremos laterales de cada piso. La transición de las cargas verticales se garantiza con columnas de hormigón armado que descienden hasta los cimientos. La relación de amortiguamiento total utilizada para el análisis es de 0.0125; este valor se encuentra en el rango propuesto por las normativas (EN1991-1-4, 2005; ISO4354, 2020). Los valores de frecuencias naturales de traslación para el primer modo de oscilación en cada uno de los ejes y las frecuencias torsionales de las edificaciones

se muestran en la Tabla 9. Los valores de frecuencias fueron extraídos de un modelo en ETABS (CSI, 2018) luego de realizado el análisis modal. En los modelos los entrepisos se consideraron rígidos a través de la definición de diafragmas. En cuanto a definición del material, para el edificio 1 se consideró un módulo de elasticidad de 24856 MPa con una resistencia a la compresión de 35 MPa; para el edificio 2 el módulo de elasticidad es de 33200 MPa con una resistencia a la compresión de 50 MPa. Para el análisis modal y de respuesta frente a las cargas de viento se consideraron las secciones no fisuradas de los elementos verticales y horizontales y la masa como la carga permanente más un 25% de la carga de uso.

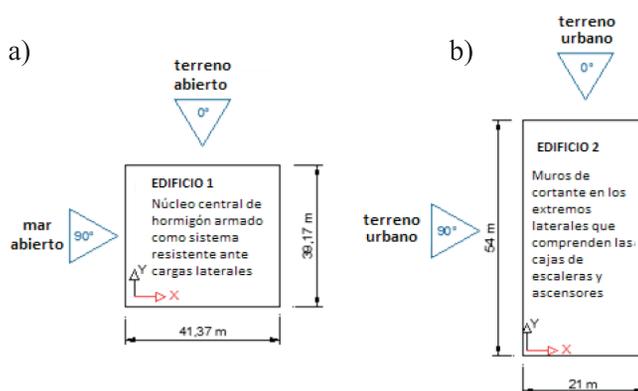


Figura 1: Ejes de referencia, dimensiones y direcciones de viento analizadas de los edificios. a) Edificio objeto de estudio 1 b) Edificio objeto de estudio 2

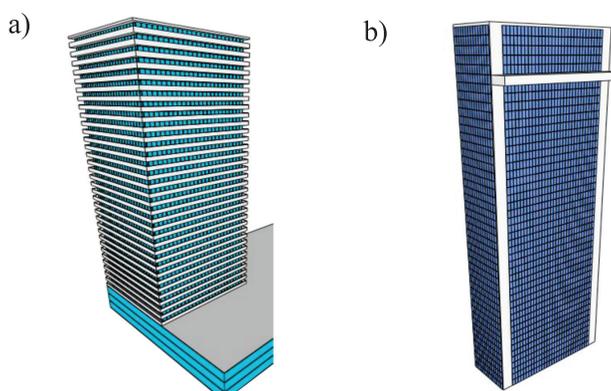


Figura 2: Vista en isométrico, a) edificio 1 y b) edificio 2

Las cargas consideradas para el análisis de los casos de estudio fueron: cargas permanentes, cargas de uso (ver Tabla 10) y las cargas de viento de acuerdo con las normativas (NC283, 2003; NC284, 2003). Ambas edificaciones se consideran para el sector hotelero. En la Tabla 11 se presentan los valores de los principales

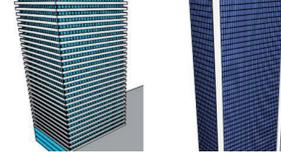


Tabla 9: Valores de periodos y frecuencias de las edificaciones.

Edificio	Tipo de modo y dirección	Periodo, s	Frecuencia, Hz	% de participación de la masa		
				UX	UY	RZ
1	1er Flector (y)	2,85	0,35	10	45	2
	1er Flector (x)	2,71	0,37	47	10	0
	Torsor	1,87	0,53	0	1	61
2	1er Flector (y)	3,91	0,26	60	0	0
	1er Flector (x)	2,68	0,37	0	58	0
	Torsor	1,42	0,71	0	0	58

coeficientes utilizados para el cálculo de las componentes estática y dinámica según la NC285 (2003) y en la Tabla 12 los valores de los coeficientes considerados para el cálculo de las fuerzas de viento longitudinales según la nueva propuesta de norma de viento. Las fuerzas de viento se calcularon para dos direcciones de viento teniendo en cuenta las características de las edificaciones y los tipos de terreno en los que se encuentran. En el modelo computacional se definieron dichas fuerzas concentradas en el centro de masa de las edificaciones de acuerdo con la definición de diafragmas rígidos en cada nivel.

Tabla 10: Cargas permanentes y de uso de las edificaciones

Cargas permanentes (kN/m <sup>2</sup> )	Cargas de uso (kN/m <sup>2</sup> )
-En la cubierta: Impermeabilización más relleno para conformación de pendientes: 2.47	-Habitaciones y pasillos: 1.5
-En pisos de habitaciones y áreas de servicio: 1.72 (incluye mortero de colocación, terminación de piso, tabiquería ligera, falsos techos e instalaciones)	-Áreas de oficinas, locales, balcones, cubierta: 2
-En pisos técnicos, oficinas, almacenes y otras zonas de acceso: 1.75 (incluye mortero de colocación, terminación de piso, tabiquería ligera, falsos techos e instalaciones)	-Áreas de restaurantes, gimnasios y galerías de circulación: 4
-Se incluyen pesos de equipos tecnológicos (Chiller 12 kN/m <sup>2</sup> , tanques de agua caliente 48 kN/m <sup>2</sup> , calderas 7 kN/m <sup>2</sup> )	-Almacenes y cámaras frías: 8
-Las cargas debidas al peso de la fachada de las torres (0.8 kN/m <sup>2</sup> ) se coloca linealmente en el borde de las losas de entrepiso de las torres	-Áreas de cocina, bar y cafeterías: 3
	-Pisos técnicos y zonas de circulación de piscina: 5

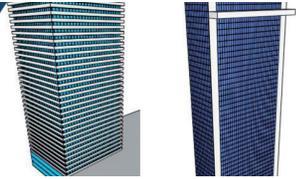
En la nueva propuesta de la NC285 se expone el método para calcular las cargas estáticas equivalentes en los sentidos transversal y torsional debidas a la turbulencia lateral generada por el viento en dicho sentido. Según el epígrafe 2.1 para el edificio 1 no es necesario calcular

Tabla 11: Resumen de parámetros para el cálculo de las fuerzas de viento según la NC285 (2003)

Parámetros	Edificio 1		Edificio 2	
	Dirección 0°	Dirección 90°	Dirección 0°	Dirección 90°
Componente estática				
$q_{10}$	1.3		1.3	
Tipo terreno	A		B	
$C_T$	1		1	
$C_r$	1.05		1.07	
$C_h$ (h máx)	2.09		2.15	
Componente dinámica				
$\gamma$	1.4	1.4	1.4	1.4
$C_{CE}$	0.416	0.422	0.385	0.688
$E_1$	0.109	0.104	0.095	0.138
$C_{Din1}$	1.80	1.77	1.80	1.90

Tabla 12: Resumen de parámetros para el cálculo de las fuerzas de viento según la nueva propuesta de NC285

Casos de estudio	Edificio 1		Edificio 2	
	Componente longitudinal		Componente longitudinal	
Parámetros	Dirección 0°	Dirección 90°	Dirección 0°	Dirección 90°
$q_{10}$ , kN/m <sup>2</sup>	0.66		0.66	
Categoría de terreno	III (abierto)	I (mar)	IV (urbano)	
$C_T$	1.899	1.771	2.040	
$C_h$ (h máx)	1.98	2.57	1.87	
$C_t$	1		1	
$Z_D$ , m	60		91.2	
$U_m(z_D)$ , m/s	43.06	50.75	40.76	
$I_{(z_D)}$	0.142	0.118	0.150	
$L_{v(z_D)}$	160.37	189.96	185.79	
$n_L$ , Hz	0.351	0.369	0.373	0.256
$\xi_L$	0.0100		0.0125	
$B_L$	0.760	0.770	0.730	0.797
$E_L$	0.095	0.092	0.080	0.103
$k$	1.0	1.0	1.5	
$K$	1.000	1.000	1.135	
$S$	0.200	0.240	0.092	0.240
$r$	0.056	0.067	0.033	0.098
$R_L$	1.01	1.07	0.54	1.04
$v_L$ , Hz	0.28	0.30	0.22	0.20
$g_{LB}$	3.5		3.5	
$g_{LR}$	3.38	3.40	3.31	3.29
$G_L$	2.23	2.07	1.93	2.32
$C_{DL}$	1.119	1.134	0.947	1.134



las componentes transversales y torsionales, teniendo en cuenta sus características geométricas; mientras que según la ecuación (10), para el edificio 2 es necesario el análisis de las componentes trasversal y torsional. La Tabla 13 muestra las condiciones establecidas por la norma para el cálculo de dichas componentes. La Tabla 14 muestra los valores de los parámetros para el cálculo de los coeficientes dinámicos transversales y torsionales en el edificio 2 que permiten calcular las fuerzas estáticas equivalentes de estas componentes.

**Tabla 13: Condiciones para el cálculo de las componentes transversales y torsionales de viento según la propuesta nueva de la NC285**

Condición	Resultados para el edificio 2
$\frac{h}{\sqrt{bd}} \geq 3$	4.51 > 3
$\frac{h}{\sqrt{bd}} \leq 6$	4.51 < 6
$0.2 \leq \frac{d}{b} \leq 5$	0.2 < 0.39 < 5
$\frac{U_{m(h)}}{n_{TM}\sqrt{bd}} \leq 10$	5.23 < 10 (con $n_T$ ) 1.9 < 10 (con $n_M$ )

**Tabla 14: Resumen de parámetros para el cálculo de los coeficientes dinámicos transversales y torsionales en el edificio 2.**

Parámetros	Componente transversal		Parámetros	Componente torsional	
	0°	90°		0°	90°
$U_{m(h)}$ , m/s	45.15		$n_M$	0.707	
$C_{h(h)}$	1.87		$U_M^*$	1.897	
$I_h$	0.131		$J_M$	0.313	0.016
$q_{(h)}$ , kN/m <sup>2</sup>	2.37		$\beta_M$	1.049	2.570
$n_T$ , Hz	0.256	0.373	$E_M$	0.007	0.009
$\xi_T$	0.125		$R_M$	0.84	0.77
$m$	1		$g_M$	3.64	
$k_I$	0.85		$G_M$	4.76	4.60
$\beta_I$	0.37	0.69	$C_{DM}$	2.40	2.48
$n_{sI}$	0.095	0.084			
$E_T$	0.084	0.054			
$R_T$	2.61	2.09			
$g_T$	3.35	3.47			
$G_T$	9.37	8.03			
$C_{Dt}$	4.88	4.19			

En el análisis comparativo para la obtención de los desplazamientos se emplea la combinación CP+CV+CU+CUc donde CP es la carga permanente, CU es la carga de uso, CUc es la carga de uso de cubierta y CV la carga de viento. La carga de viento incluye la componente

longitudinal de la fuerza del viento. Las fuerzas resultantes en la base se corresponden con la sumatoria de las fuerzas de viento calculadas en las edificaciones.

## Resultados y discusión

En esta sección se presenta la respuesta global de las edificaciones analizadas en lo que se refiere a fuerzas resultantes en la base y desplazamientos mediante una comparación de resultados entre la norma de viento cubana vigente y la propuesta de actualización. En la Tabla 15 se muestran las fuerzas resultantes en la base para la componente longitudinal del viento. Los resultados comparativos se muestran para las dos direcciones de viento analizadas. Estos valores, para la dirección 0° (Y) en el primer caso de estudio, son muy cercanos entre las normas analizadas con una diferencia del 3%, el mayor valor de cortante en la base en ese caso se observa para la norma vigente. Para el segundo caso de estudio los valores en la dirección 0° (Y) presentan una diferencia de 17%, en este caso también se aprecia la mayor fuerza resultante en la base para la norma vigente. Las mayores diferencias se encuentran en la dirección de 90° (X) para ambos edificios; son de un 24% para el edificio 1, donde el mayor resultado se presenta para la nueva propuesta y de un 21% para el edificio 2 donde el mayor resultado se presenta para la norma vigente. En las diferencias de los resultados tiene gran influencia la consideración de los tipos de terreno (terrero A y B respectivamente) dentro de los parámetros del viento. Mientras en la NC285 (2003) se considera terreno tipo A para edificaciones cercanas al mar, los estudios actualizados definen cuatro categorías de terreno, dentro de las que se encuentra la categoría I que tiene en cuenta de forma directa la dirección proveniente del mar, en este caso 90°. En la segunda edificación, según la NC285 (2003), la categoría de terreno es B para zonas urbanas, mientras que en la nueva propuesta esta se corresponde con la categoría de terreno IV donde los parámetros que determinan el perfil vertical de la velocidad de viento no difieren considerablemente entre una propuesta y otra.

La Tabla 16 muestra para el edificio 2 las fuerzas resultantes en la base para las componentes transversal y torsional del viento determinadas por la propuesta de actualización de la norma vigente de viento.

Los valores de las fuerzas de las componentes transversal y torsional deben ser combinados según la Tabla 8 para

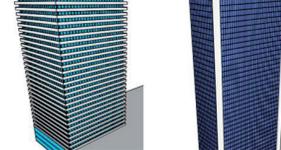


Tabla 15: Valores máximos de fuerzas resultantes en la base en la componente longitudinal

Casos de estudio	Edificio 1		Edificio 2	
	Fuerzas resultantes en la base para dos direcciones, kN		Fuerzas resultantes en la base para dos direcciones, kN	
	0° (F <sub>y</sub> )	90° (F <sub>x</sub> )	0° (F <sub>x</sub> )	90° (F <sub>y</sub> )
NC285 (2003)	12332.82	11743.73	22918.62	10706.45
NC propuesta	12001.32	15385.71	18164.76	8923.92

Tabla 16: Valores máximos de fuerzas resultantes en la base en las componentes transversal y torsional el Edificio 2.

Componentes del viento			
Transversal, kN		Torsional, kNm	
0° (F <sub>y</sub> )	90° (F <sub>x</sub> )	0° (M <sub>f</sub> )	90° (M <sub>f</sub> )
8821.96	9212.69	48094.41	48575.86

obtener las fuerzas interiores en los elementos estructurales y realizar los diseños correspondientes. Por tanto, es necesario ampliar los estudios que evidencien cómo se modifica el diseño estructural del sistema resistente ante cargas laterales cuando se tienen en cuenta las tres componentes de la respuesta del viento para cada dirección de viento en comparación con el diseño cuando solo son consideradas las fuerzas longitudinales.

En las Figuras 3 y 4 se observan para la combinación CP+CV+CU+CUc los valores de desplazamientos máximos para la componente longitudinal en los edificios 1 y 2 respectivamente. En el edificio 1 los desplazamientos son superiores para la nueva propuesta en la dirección que corresponde al terreno tipo mar (dirección 90°) en un 17%, para la dirección de viento 0° los mayores valores los presenta la norma cubana de viento vigente con un incremento del 10%. Para el edificio 2 en las direcciones de

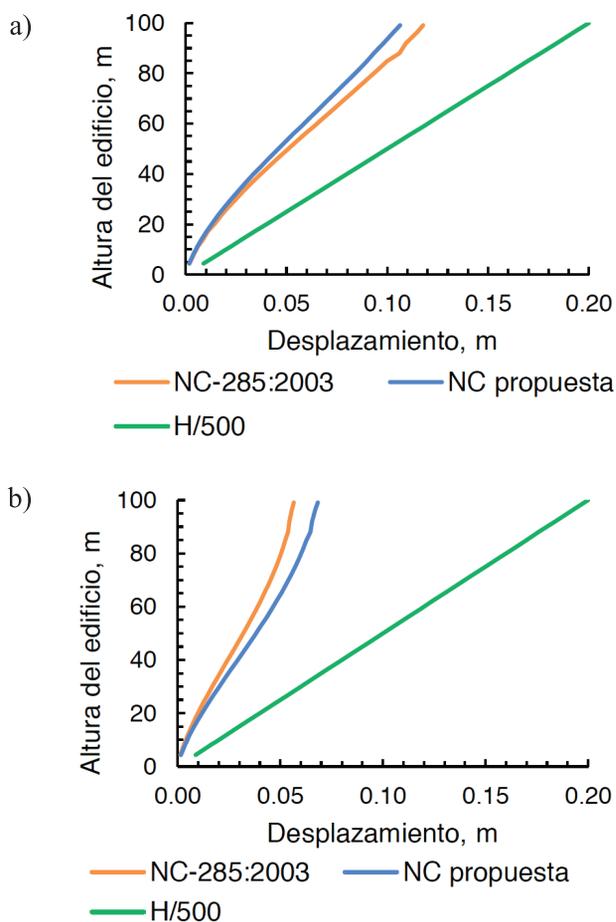


Figura 3: Desplazamientos máximos según las normas en el edificio 1 analizado, a) dirección 0° y b) dirección 90°

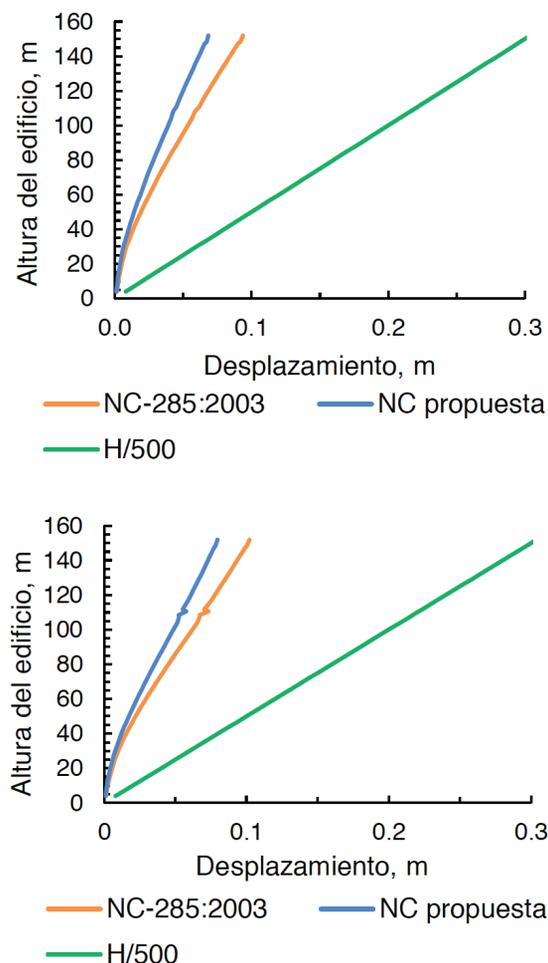
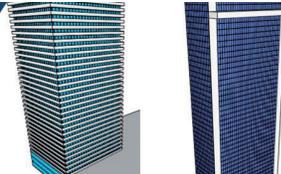


Figura 4: Desplazamientos máximos según las normas en el edificio 2 analizado, a) dirección 0° y b) dirección 90°



0° y 90° las diferencias son de 22% y 27%, respectivamente. Se destaca que los valores de desplazamiento se encuentran dentro del rango permisible pues cumplen con el criterio de desplazamiento  $H/500$  según (Longarini *et al.*, 2017).

Los valores de las aceleraciones máximas para cada una de las componentes en las edificaciones se muestran en las Tablas 17 y 18 para los edificios 1 y 2, respectivamente. Las aceleraciones permisibles fueron obtenidas a partir de la ecuación (23), donde  $a_0$  es  $4 \text{ cm/s}^2$ . En las Tablas 17 y 18 se evidencia que los valores de aceleraciones calculados no superan los límites aceptados.

**Tabla 17: Valores de aceleraciones máximas y permisibles en la edificación 1**

Componentes en la dirección X (90°)			Componentes en la dirección Y (0°)		
Longitudinal	Transversal	Torsional	Longitudinal	Transversal	Torsional
$h$ cálculo = 100 m, $Z_D = 60$ m			$h$ cálculo = 100 m, $Z_D = 60$ m		
$m = 13603720 \text{ kg}$ , $I_M = 3679500000 \text{ kgm}^2$					
$U_{m1(ZD)} = 16.92 \text{ m/s}$	$U_{m1(h)} = 17.62 \text{ m/s}$		$U_{m1(ZD)} = 14.35 \text{ m/s}$	$U_{m1(h)} = 15.50 \text{ m/s}$	
$a_{pL} = 0.88 \text{ cm/s}^2$	$a_{pT} = 1.83 \text{ cm/s}^2$	$a_{pM} = 0.04 \text{ rad/s}^2$	$a_{pL} = 0.75 \text{ cm/s}^2$	$a_{pT} = 1.14 \text{ cm/s}^2$	$a_{pM} = 0.03 \text{ rad/s}^2$
Aceleraciones permisibles, $\text{cm/s}^2$					
6.99	7.19	5.68	7.19	6.99	5.68

**Tabla 18: Valores de aceleraciones máximas y permisibles en la edificación 2**

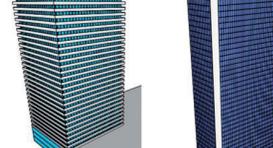
Componentes en la dirección X (90°)			Componentes en la dirección Y (0°)		
Longitudinal	Transversal	Torsional	Longitudinal	Transversal	Torsional
$h$ cálculo = 152 m, $Z_D = 91.2$ m			$h$ cálculo = 152 m, $Z_D = 91.2$ m		
$m = 19013770 \text{ kg}$ , $I_M = 5211905035 \text{ kgm}^2$					
$U_{m1(ZD)} = 14.82 \text{ m/s}$	$U_{m1(h)} = 16.42 \text{ m/s}$		$U_{m1(ZD)} = 14.82 \text{ m/s}$	$U_{m1(h)} = 16.42 \text{ m/s}$	
$a_{pL} = 0.54 \text{ cm/s}^2$	$a_{pT} = 1.54 \text{ cm/s}^2$	$a_{pM} = 0.022 \text{ rad/s}^2$	$a_{pL} = 0.45 \text{ cm/s}^2$	$a_{pT} = 1.70 \text{ cm/s}^2$	$a_{pM} = 0.012 \text{ rad/s}^2$
Aceleraciones permisibles ( $\text{cm/s}^2$ )					
6.95	8.58	4.86	8.58	6.95	4.86

## Conclusiones

En este trabajo se presentaron las consideraciones para

la determinación de las acciones dinámicas del viento en edificios altos, tanto en términos de fuerzas de viento como de aceleraciones a partir de los estudios realizados para la actualización de la nueva propuesta de norma cubana de viento NC285 (2003). En la nueva propuesta las acciones estáticas equivalentes longitudinales que simulan el efecto dinámico que induce el viento sobre la estructura se tienen en cuenta mediante la aplicación del coeficiente dinámico  $C_{DL}$ . Este coeficiente es un parámetro adimensional que modifica las acciones aerodinámicas máximas teniendo en cuenta la correlación parcial de la acción del viento y la amplificación de la carga resonante. A diferencia de NC285 (2003), este coeficiente dinámico integra los factores resonante y no resonante que tienen en cuenta las características espectrales de la velocidad de viento. La carga dinámica de viento por la norma vigente es la sumatoria de las respuestas de los efectos estáticos y los dinámicos calculados sobre las estructuras. Las componentes transversales y torsionales que no se contemplan en NC285 (2003) deben considerarse en el diseño por resistencia y confort de las estructuras. Las fuerzas resultantes en la base y los desplazamientos para el edificio 1 muestran las mayores diferencias entre las normas en la dirección de 90° correspondiente a la dirección del mar donde los parámetros que determinan el perfil vertical de la velocidad del viento se desvían significativamente con respecto a los del terreno tipo A según NC285 (2003). Las fuerzas resultantes en la base y los desplazamientos para el edificio 2 fueron mayores cuando se aplica la norma cubana vigente NC285 (2003). Futuros estudios deben considerar otras tipologías de edificios altos para comparar los resultados entre ambas normas, además debe incluirse las comparaciones en cuanto al diseño estructural de los elementos resistentes a cargas laterales.

Los resultados muestran que los mayores valores de aceleraciones corresponden a la aceleración transversal y, por tanto, es la que rige el diseño de servicio para la edificación estudiada. Todas las aceleraciones máximas calculadas resultaron menores que las máximas permisibles. Las futuras investigaciones en el tema de aceleraciones deben estar encaminadas a determinar qué nivel de movimiento es cómodo para los habitantes y para determinar cuál puede conducir a la degradación del desempeño de los ocupantes en los edificios más allá de indicar el nivel de movimiento que es perceptible.



## Referencias

- AIJ (2018). AIJ Recommendations for loads on buildings (2015). Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan
- ASCE 7-10 (2010). Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE/SEI, Reston, Virginia, USA
- AS/NZS1170.2 (2021). Structural design actions, Part 2: Wind actions. Australian/New Zealand Standards, Wellington, New Zealand
- Ballate Delgado, A., Fernández Lorenzo, I. y Martín Rodríguez, P. (2021a). Aceleraciones inducidas por el viento en edificios altos. *X Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas*, VII Taller Internacional de Ingenierías, Cuba
- Ballate Delgado, A., Fernández Lorenzo, I. y Martín Rodríguez, P. (2021b). Cálculo de las aceleraciones inducidas por el viento en edificios altos en Cuba. *Revista Ciencia y Construcción* 2(2), 23-32
- CNR-DT207 (2008). Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. Italian National Research Council, Roma, Italy
- CSI (2018). ETABS v18. Computers & Structures, Inc. CSI. Structural and earthquake engineering software. USA
- Davenport, A.G. (1967). Gust loading factors. *Journal of the Structural Division* 93(3), 11-34
- Davenport, A.G. (1964). Note on the distribution of the largest value of a random function with application to wind loading. *Proceedings Institution Civil Engineers* 28(2), 187-196
- EN1991-1-4 (2005). Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions. Brussels, Belgium
- Fernández Lorenzo, I. y Elena Parnás, V.B. (2016). Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas. *Revista Cubana de Ingeniería* 7(2), 15-25
- García Miranda, J.A., López Litvinovich, A., Fernández Lorenzo, I. y Martín Rodríguez, P. (2019). Análisis de nuevos proyectos de edificios altos bajo carga de viento en La Habana. II *Convención Científica Internacional*, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba
- IS:875(Part-3) (2012). Wind loads on buildings and structures - Proposed draft & commentary. Document No IITK GSDMA-Wind 02-V 5.0. Indian Wind Code IWC, India
- ISO 4354 (2020). Wind actions on structures. International Organization for Standardization. Switzerland
- Kwon, D.K. and Kareem, A. (2013). Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. *Engineering Structures* 51, 23-35
- Longarini, N., Cabras, L., Zucca, M., Chapain, S. and Aly, A.M. (2017). Structural improvements for tall buildings under wind loads: comparative study. *Shock and Vibration*, article ID 2031248
- López Litvinovich, A., Martín Rodríguez, P. y Castañeda Hevia, A.E. (2018). Respuesta torsional de edificaciones bajo cargas de viento. *Revista Arquitectura e Ingeniería* 12(1), 1-13
- Luis García, K. (2017). *Análisis estadístico de velocidades de viento para el cálculo de estructuras*. Tesis de máster, Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE, La Habana, Cuba
- Llanes Burón, C. (1988). Algoritmo para determinar las componentes dinámicas de las cargas de viento en edificios. *Ingeniería Estructural* IX(2), 113-120
- Llanes Burón, C. (1984a). Algunos criterios sobre el diseño de edificios altos. *Ingeniería Civil (ISPJAE)* 1, 16-28
- Llanes Burón, C. (1984b). Algunos métodos de análisis utilizados en edificios. Elementos paneles, tímpanos y pórticos interconectados. *Ingeniería Civil (ISPJAE)* 6, 24-30
- NBCC (2020). National building code of Canada. Canadian Commission on Buildings and Fire Codes, National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada
- NC53-41 (1983, 1990). Elaboración de proyectos de construcción. Cargas de viento. Método de cálculo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- NC283 (2003). Densidad de materiales naturales, artificiales y de elementos de construcción como carga de diseño. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- NC284 (2003). Edificaciones. Cargas de uso. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- NC285 (2003). Carga de viento. Método de cálculo. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba
- SNiP2.01.07-85 (2001). Loads and effects. State Building Committee of USSR (Gosstroif of USSR). Moscow, USSR