

CÁLCULO DE LAS ACELERACIONES INDUCIDAS POR EL VIENTO EN EDIFICIOS ALTOS EN CUBA.

Amaya Ballate Delgado¹, Ingrid Fernández Lorenzo², Patricia Martín Rodríguez³

¹Ingeniera Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana. e-mail: amayaballated@civil.cujae.edu.cu

^{2,3}Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, e-mail: ²ingridfl@civil.cujae.edu.cu , ³patriciamr@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Con el aumento de los proyectos de edificios altos y esbeltos en Cuba, características que los hacen muy susceptibles a las cargas de viento, es una necesidad establecer criterios de diseño que aseguren un desempeño aceptable de estas edificaciones, donde uno de los aspectos más importantes a verificar es el efecto de las oscilaciones y aceleraciones inducidas por el viento en los humanos. La norma cubana de viento vigente no contiene ningún procedimiento para la determinación de las aceleraciones inducidas por el viento ni los límites permitidos en edificaciones altas para chequear el estado límite de servicio. Además, el método propuesto en la NC-285:2003 para la consideración de los efectos dinámicos de la carga no es compatible con las formulaciones reconocidas internacionalmente para calcular las aceleraciones, las cuales están basadas en el método más aplicado internacionalmente “Factor de Efecto de Ráfaga”. En los últimos años se han desarrollado varios estudios para la actualización de la norma cubana de viento; la determinación de las aceleraciones y sus valores permisibles son objeto de estudio e inclusión en dicha norma. Por tanto, en este trabajo se determinan las aceleraciones máximas longitudinales, transversales y torsionales en tres edificaciones altas mediante una metodología propuesta a partir de la revisión e interpretación de las normativas internacionales de acción del viento sobre las estructuras. Los mayores valores de aceleraciones obtenidos corresponden a las aceleraciones transversales y por tanto son las que rigen el estado de servicio para los estudios de confort en las edificaciones analizadas.

Palabras claves: edificios altos, carga de viento, aceleraciones, criterios de servicio, confort humano.

CALCULATION OF WIND-INDUCED ACCELERATIONS ON TALL BUILDINGS IN CUBA.

ABSTRACT

With the increase of tall and slender building projects in Cuba, characteristics that make them very susceptible to wind loads, it is a necessity to establish design criteria that ensure an acceptable performance of these buildings, where one of the most important aspects to verify is the effect of wind-induced oscillations and accelerations on humans. The current Cuban wind standard does not contain any procedure for the determination of wind-induced accelerations or the limits allowed in tall buildings to check the serviceability limit state. Furthermore, the method proposed in NC-285:2003 for the consideration of dynamic load effects is not compatible with the internationally recognized formulations for the calculation of accelerations, which are based on the most internationally applied method "Gust Effect Factor". In recent years, several studies have been developed for the updating of the Cuban wind standard; the determination of accelerations and their permissible values are the object of study and inclusion in this standard. Therefore, in this work the maximum longitudinal, across-wind and torsional accelerations in three tall buildings are determined by means of a methodology proposed from the revision and interpretation of the international regulations of wind action on structures. The highest values of accelerations obtained correspond to the across-wind accelerations and are therefore those that govern the service state for the comfort studies in the buildings analyzed.

Keywords: tall buildings, wind load, accelerations, serviceability criteria, human comfort.

Nota Editorial: Recibido: marzo 2021; Aceptado: mayo 2021

1. INTRODUCCIÓN

Existen dos criterios de diseño importantes que deben ser considerados al diseñar edificios altos; estos son el Estado Límite Último (ELU) y el Estado Límite de Servicio (ELS). El primero tiene en cuenta los requerimientos de resistencia de la estructura y se emplea para garantizar que la edificación no falle bajo las cargas de diseño máximas. El segundo criterio trata el confort de los ocupantes en la edificación y se utiliza para asegurar que esta se mantenga funcional y operativa para satisfacer las condiciones de utilización, usualmente confort [1]. En el caso de los edificios altos esbeltos, algunos estudios han indicado que el cumplimiento del criterio sobre la deriva lateral global de los edificios altos no satisface necesariamente el confort de los ocupantes en términos de aceleraciones porque las derivas laterales globales están relacionadas estáticamente con la rigidez de los edificios únicamente, mientras que las respuestas de aceleración están relacionadas dinámicamente con la rigidez, la masa y la relación de amortiguación de los edificios [2]. La aceleración máxima que es probable que experimenten los ocupantes es el concepto más decisivo para cumplir con su estado de confort en edificios altos. La máxima desviación lateral se produce normalmente en una dirección paralela al viento (dirección longitudinal), sin embargo, la máxima aceleración que da lugar a la percepción humana del movimiento o a la incomodidad puede inducirse en una dirección perpendicular al viento (dirección transversal). Por tanto, es necesario determinar las aceleraciones máximas en las dos direcciones, longitudinal y transversal [3]. Las aceleraciones torsionales, en función de la sección transversal, esbeltez y otras características de las edificaciones podrían superar los valores de las componentes longitudinales y acercarse a los valores de las aceleraciones transversales, de ahí la importancia de considerar también este efecto de la respuesta de la edificación frente a carga de viento.

Es necesario comprender los principios de la sensibilidad humana para percibir el movimiento y su tolerancia hacia él; también la confiabilidad en las predicciones de las aceleraciones, el umbral humano para percibir y tolerar el movimiento en condiciones reales, entre otros elementos. Existe una amplia variación en la capacidad individual para detectar el movimiento y esto se observa en encuestas que registran de manera confiable la sensibilidad individual y la susceptibilidad al mareo por movimiento [4]. Se han realizado varios experimentos usando simuladores de movimiento para investigar los efectos del movimiento en los humanos. La mayoría de estos experimentos se han llevado a cabo en base al movimiento sinusoidal de un solo grado de libertad, por ejemplo, para determinar umbrales de percepción del movimiento. Sin embargo, la respuesta de las personas al movimiento, sobre todo ante movimientos inducidos por el viento en edificios, es mucho más compleja e incluye factores psicológicos y fisiológicos. El movimiento aleatorio de banda estrecha típico del movimiento de edificios altos inducido por el viento es potencialmente diferente al movimiento sinusoidal y, por tanto, también lo es la respuesta humana ante estos efectos [5]. Kwok et al. [6] revisó pasados estudios que se enfocaron en la percepción humana al movimiento y los umbrales de tolerancia de movimientos en edificaciones inducidos por el viento. Estos estudios generalmente se dividen en tres categorías: experimentos de campo y estudios basados en encuestas de ocupantes de edificios altos excitados por el viento; experimentos con simuladores de movimiento y mesas vibratorias con sujetos de prueba humanos; y experimentos de campo realizados en edificios excitados artificialmente [5]. Otros autores como Lamb y Kwok [7, 8], S. Lamb et al. [9], Wang et al. [10] han hecho referencia a estudios pasados sobre los efectos de los movimientos inducidos por el viento en la percepción humana. Los datos de estos estudios fueron obtenidos en condiciones experimentales, tanto de laboratorio como a gran escala de edificios reales. En el estudio de S. Lamb et al. [9] se concluyó que la susceptibilidad al mareo es la diferencia individual más importante que considerar cuando se examinan los efectos del movimiento de los edificios en un determinado individuo. Su trabajo se basó en la necesidad de una mejor comprensión de los efectos del movimiento en los edificios con el fin de producir nuevas directrices que especifiquen los niveles y las duraciones del movimiento que mejoren el bienestar de los ocupantes y el rendimiento laboral. En [11] se exponen algunas directrices sobre los niveles generales de percepción humana donde se evidencia que con aceleraciones menores a los $0,05 \text{ m/s}^2$ los humanos no pueden percibir el movimiento; para valores de aceleraciones de $0,1-0,25 \text{ m/s}^2$ puede notarse como efecto que la mayoría de las personas percibirán el movimiento, el nivel de este puede afectar el trabajo de escritorio y un largo plazo de exposición puede producir mareos por movimiento. Para valores entre $0,25$ y $0,4 \text{ m/s}^2$ se manifiesta que el trabajo de escritorio se hace difícil y casi imposible.

Existen varios trabajos internacionales que se han enfocado en la determinación de estos valores límites de aceleraciones, a través de estudios en túnel de viento, con modelación computacional de fluidos (CFD) o experimentales a escala real [1, 11]. En este mismo sentido, se reconocen internacionalmente códigos o normas específicos que ofrecen recomendaciones para limitar las aceleraciones excesivas [12-14] y algunas normas de viento como la norma italiana [15] sugiere el procedimiento dentro de la propia norma de viento. Sin embargo, los criterios entre las normativas difieren en alguna medida y algunos trabajos han hecho referencia a sus limitaciones al no tener en cuenta la incertidumbre en el clima del viento, las propiedades estructurales, la percepción del movimiento y la respuesta máxima [16].

Existen otros métodos para determinar las aceleraciones resultantes esperadas en las edificaciones altas, por ejemplo, a través de un enfoque en el dominio de la frecuencia [17]. Para esto se realizan ensayos en túnel de viento. En varios estudios [1, 10] se han elaborado modelos de elementos finitos en programas computacionales como el ETABS para calcular la respuesta dinámica de edificaciones altas ante las excitaciones del viento utilizando datos de túnel de viento. En [10], a través de ensayos de túnel de viento se obtuvieron las series de tiempo de la carga de viento que se aplicaron en la estructura. Los resultados de la respuesta estructural de aceleraciones puede ser calculada también mediante análisis tiempo-historia [10]. Además, en estudios recientes [18] se han obtenido formulaciones de diseño óptimo de amortiguadores de masa sintonizado para abordar el confort de los ocupantes en edificios altos esbeltos excitados por el viento y susceptibles de sufrir efectos de desprendimiento de vórtices. Es importante tener en cuenta, como refiere Solari [19] y se evidencia en [20], que la aceleración estructural es una magnitud resonante, por tanto, el uso de dispositivos de amortiguación pasivos y activos es el método más adecuado para mitigar sus efectos y que el diseño de formas aerodinámicamente eficientes es una herramienta cada vez más eficaz para reducir no sólo la aceleración sino cualquier otro efecto de la carga del viento.

La inserción de nuevas obras de edificios altos en La Habana con fines hoteleros motiva el estudio sobre las tendencias internacionales en la determinación de las aceleraciones inducidas por el viento y sus valores permisibles. Varias normativas internacionales [15, 21-24] proponen expresiones para determinar la aceleración longitudinal, sin embargo, las aceleraciones transversales y torsionales no están incluidas en todas las normativas. De las normas mencionadas, ni el Eurocódigo [22] ni la ASCE2010 [24] especifican un procedimiento para obtener las aceleraciones transversales y torsionales. En este trabajo se presenta un método basado en algunas normas internacionales, principalmente la japonesa, pues es la que mayor similitud presenta en cuanto a las características del clima con Cuba, fundamentalmente aquellas asociadas al tipo de perfil de viento (potencial), y a los parámetros de la turbulencia (intensidad de turbulencia y espectro). En la sección dos se presenta el procedimiento propuesto para el cálculo de las aceleraciones con subacápites relacionados con los valores límites permisibles de las aceleraciones y la descripción de los casos de estudio. La sección tres incluye tablas y gráficos con los resultados.

El objetivo se centra en determinar las aceleraciones pico (máximas) longitudinales, transversales y torsionales inducidas por el viento en tres edificaciones hoteleras con diferentes alturas y dimensiones en planta, a partir del empleo de la metodología planteada en los estudios actualizados para renovar la norma cubana vigente de viento. Además, en el trabajo se comparan los valores de aceleraciones calculados con valores permisibles propuestos también en los estudios actualizados.

2. PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA EL CÁLCULO DE LAS ACELERACIONES

El procedimiento para determinar las aceleraciones pico 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 1-9 muestran las fórmulas para calcular las aceleraciones pico, así como los factores pico y desviaciones estándar de la aceleración para cada una de las componentes. Las tablas 1-3 muestran las formulaciones y el significado de cada uno de los términos para el cálculo de las aceleraciones pico en un punto z de la edificación de las componentes longitudinal, transversal y torsional respectivamente. En las tablas puede observarse la velocidad media que se calculada a la altura de referencia o a la altura máxima para un periodo de retorno de un año (m/s). 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. En la ecuación de la velocidad se puede observar el coeficiente de topografía que integra los parámetros del perfil potencial de variación de la velocidad media con la altura.

La aceleración pico longitudinal se calcula mediante la ecuación 1:

$$a_{pL}(z) = g_{aL} \sigma_{aL} \quad (1)$$

Donde g_{aL} es el factor pico en sentido longitudinal (ecuación 2) y σ_{aL} (ecuación 3) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido longitudinal a una altura (z).

$$g_{aL} = \sqrt{2 \ln(n_L T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(n_L T)}} \geq 3 \quad (2)$$

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.

$$\sigma_{aL} = \frac{\rho U_{m1}^2(z_e) b h}{m_L} C_f I_{(z_e)} R_L K_L \phi_L(z) \quad (3)$$

En esta última expresión, los parámetros de cálculo tienen los significados siguientes:

ρ (kg/m^3): densidad del aire asumida como 1,22.

$U_{m1(z_e)}$: velocidad media calculada a la altura de referencia para un periodo de retorno de 1 año (m/s).

b : es el ancho de la edificación (perpendicular a la dirección de viento).

h : altura de la edificación (m).

m_L : masa generalizada para el primer modo longitudinal.

C_f : coeficiente de forma.

$I_{(z_e)}$: intensidad de turbulencia calculada a la altura de referencia de la edificación.

R_L : factor de respuesta resonante en sentido longitudinal para un periodo de retorno de 1 año.

K_L : coeficiente adimensional.

$\phi_L(z)$: forma del primer modo longitudinal.

Tabla 1: Parámetros para la determinación de la aceleración pico longitudinal.

<p>Velocidad media:</p> $U_{m1(z_e)} = U_1 C_{e(z_e)} C_{o(z_e)}$	<p>$U_1 = 11$ m/s (indistintamente de la región)</p> <p>$C_{o(z_e)}$: coeficiente de topografía.</p> <p>$C_{e(z_e)}$: coeficiente de exposición a la altura de referencia.</p>
<p>Intensidad de turbulencia a la altura de referencia:</p> $I_{rZ} = 0,1 \left(\frac{Z}{Z_G} \right)^{-\alpha-0,05}$ <p>para $Z_b < Z \leq Z_G$ ($Z = Z_e$)</p>	<p>Z_G: altura de gradiente en función del tipo de terreno.</p> <p>α: exponente del perfil potencial.</p>
<p>Factor de respuesta resonante para la componente longitudinal:</p> $R_L = (1 + 0,6 \alpha)^{\frac{3}{2+k}} K \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_L} E_L S (0,57 - 0,35\alpha + r)}$	<p>K: es el factor de corrección del modo dado por la ecuación: $K = 0,27k + 0,73$</p> <p>E_L: parámetro adimensional que toma en cuenta el contenido espectral de la turbulencia en el sentido longitudinal calculado como:</p> $E_L = \frac{4 \left(\frac{n_L L v(z_e)}{U_{m1(z_e)}} \right)}{\left\{ 1 + 70,8 \left(\frac{n_L L v(z_e)}{U_{m1(z_e)}} \right)^2 \right\}^{5/6}}$ <p>S: factor de reducción por dimensión,</p> <p>r: es el factor que representa los efectos de correlación de las presiones a barlovento y las presiones a sotavento,</p> $S = \frac{0,9}{\sqrt{1 + 6 \left(\frac{n_L h}{U_{m1(z_e)}} \right)^2 \left(1 + 3 \frac{n_L b}{U_{m1(z_e)}} \right)}} \quad r = \frac{2\sqrt{0,053 - 0,042\alpha}}{1 + 20 \frac{n_L b}{U_{m1(z_e)}}}$
<p>Coeficiente adimensional K_L:</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 $(\phi_L(z) = \left(\frac{z}{h} \right)^k)$ y $C_{o(z)} = 1$</p>	<p>Z_e: altura de referencia de la edificación.</p> <p>Z_0: longitud de rugosidad.</p> <p>k: 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>m_i: masa estructural por unidad de longitud (kg/m).</p> <p>ϕ_i: 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 pico transversal se calcula mediante la ecuación 4:

$$a_{pT}(z) = g_T \sigma_{aT} \quad (4)$$

Donde g_T es el factor pico en sentido transversal (ecuación 5) y σ_{aT} (ecuación 6) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido transversal a una altura (z).

$$g_T = \sqrt{2\ln(n_T T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2\ln(n_T T)}} \geq 3 \quad (5)$$

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

$$\sigma_{aT} = \frac{0,5\rho U_{m1}^2(h)bh}{m_T} C_T R_T \phi_T(h) \phi_T(z) \quad (6)$$

En esta última expresión, los parámetros de cálculo tienen los significados siguientes:

$U_{m1(h)}$: es la velocidad media calculada a la altura máxima de la edificación para un periodo de retorno de 1 año (m/s).

C_T : es el coeficiente de fuerza aerodinámica en el sentido transversal.

R_T : factor de respuesta resonante para la componente transversal.

m_T : masa generalizada de la edificación en el sentido transversal (kg).

$\phi_T(h)$; $\phi_T(z)$: es la forma del primer modo transversal evaluada a la altura máxima de la edificación y a la altura (z) donde se requiera conocer la aceleración.

Tabla 2: Parámetros para la determinación de la aceleración pico transversal.

<p>Coeficiente de fuerza aerodinámica transversal:</p> $C_T = 0,0082 \left(\frac{d}{b}\right)^3 - 0,071 \left(\frac{d}{b}\right)^2 + 0,22 \frac{d}{b}$	<p>d: Profundidad de la edificación (dimensión paralela a la dirección actuante del viento analizada).</p>
<p>Masa generalizada en sentido transversal:</p> $m_i = \int_0^l m(s) \phi_i^2(s) ds \quad m_1 = \frac{mh}{2k+1}$	<p>m_i: masa estructural por unidad de longitud (kg/m). ϕ_i: valor del desplazamiento modal en cada piso del primer modo de oscilación en la dirección transversal, normalizados con respecto a su valor máximo.</p>
<p>Factor de respuesta resonante transversal:</p> $R_T = K \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_T} E_T}$	<p>E_T: coeficiente del espectro de fuerza transversal.</p> $E_T = \sum_{j=1}^m \left[\frac{4k_j(1+0,6\beta_j)\beta_j}{\pi} \frac{\left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2}{\left\{1 - \left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2\right\}^2 + 4\beta_j^2 \left(\frac{n_T}{n_{sj}}\right)^2}\right]$ <p>m, κ, n_s y β: coeficientes que dependen de la relación D/B.</p> $m = \begin{cases} 1, & d/b < 3 \\ 2, & d/b \geq 3 \end{cases} \quad k_1 = 0,85, k_2 = 0,02$ $n_{s1} = \frac{0,12}{\left\{1+0,38\left(\frac{d}{b}\right)^2\right\}^{0,89}} \frac{U_{m1(z_e)}}{b} \quad n_{s2} = \frac{0,56}{\left(\frac{d}{b}\right)^{0,85}} \frac{U_{m(h)}}{b}$ $\beta_1 = \frac{\left(\frac{d}{b}\right)^4 + 2,3\left(\frac{d}{b}\right)^2}{2,4\left(\frac{d}{b}\right)^4 - 9,2\left(\frac{d}{b}\right)^3 + 18\left(\frac{d}{b}\right)^2 + 9,5\frac{d}{b} - 0,15} + \frac{0,12}{\frac{d}{b}}$ $\beta_2 = \frac{0,28}{\left(\frac{d}{b}\right)^{0,34}}$ <p>ξ_T: relación de amortiguamiento crítica en la dirección transversal.</p>

La aceleración pico torsional se calcula mediante la ecuación 7:

$$a_{pM}(z) = g_M \sigma_{aM} \quad (7)$$

Donde g_M es el factor pico en sentido transversal (ecuación 8) y σ_{aM} (ecuación 9) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido transversal a una altura (z).

$$g_M = \sqrt{2\ln(n_M T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2\ln(n_M T)}} \geq 3 \quad (8)$$

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

$$\sigma_{aM} = \frac{0,3\rho U_{m1}^2(h)b^2h}{I_M} C_M R_M \phi_M(h) \phi_M(z) \quad (9)$$

Los parámetros de cálculo de la expresión anterior tienen los significados siguientes:

C_M : coeficiente de fuerza aerodinámica en el sentido torsional.

R_M : factor de respuesta resonante torsional.

I_M : momento polar de inercia (de masa) generalizado (kgm²).

$\phi_M(h)$; $\phi_M(z)$: es la forma del primer modo torsional evaluada a la altura máxima de la edificación y a la altura (z) donde se requiera conocer la aceleración.

Tabla 3: Parámetros para la determinación de la aceleración pico torsional.

<p>Coeficiente de fuerza aerodinámica:</p> $C_M = \left(0,0066 + 0,015 \left(\frac{d}{b} \right)^2 \right)^{0,78}$	
<p>Momento polar de inercia:</p> $I_i = \int_0^l I(s) \phi_i^2(s) ds$	<p>$I(s)$: es el momento de inercia (de masa) (flector o polar) de la estructura por unidad de longitud. l: es la altura de la estructura (o del elemento estructural)</p>
<p>Factor de respuesta resonante para la componente torsional:</p> $R_M = K \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_M} E_M}$	<p>E_M: factor de energía espectral del momento torsional. U_M^*: es la velocidad media reducida. $U_M^* = \frac{U_{m1}(h)}{n_M \sqrt{bd}}$</p> <p>Para $U_M^* \leq 4,5$ y $6 \leq U_M^* \leq 10$:</p> $E_M = \frac{0,14 J_M^2 (U_M^*)^{2\beta_M}}{\pi} \frac{d(b^2+d^2)^2}{l^2 b^3}$ <p>para $4,5 < U_M^* < 6$:</p> $E_M = E_{4,5} \exp \left[3,5 \ln \left(\frac{E_6}{E_{4,5}} \right) \ln \left(\frac{U_M^*}{4,5} \right) \right]$ <p>l: es la mayor dimensión entre b y d; J_M y β_M son coeficientes adimensionales para $U_M^* \leq 4.5$:</p> $J_M = \frac{-1,1 \frac{d}{b} + 0,97}{\left(\frac{d}{b} \right)^2 + 0,85 \frac{d}{b} + 3,3} + 0,17$ $\beta_M = \frac{\frac{d}{b} + 3,6}{\left(\frac{d}{b} \right)^2 - 5,1 \frac{d}{b} + 9,1} + \frac{0,14}{\frac{d}{b}} + 0,14$ <p>para $6 \leq U_M^* \leq 10$:</p> $J_M = \frac{0,077 \frac{d}{b} - 0,16}{\left(\frac{d}{b} \right)^2 + 0,96 \frac{d}{b} + 0,42} + \frac{0,35}{\frac{d}{b}} + 0,095$ $\beta_M = \frac{0,44 \left(\frac{d}{b} \right)^2 - 0,0064}{\left(\frac{d}{b} \right)^4 - 0,26 \left(\frac{d}{b} \right)^2 + 0,1} + 0,2$ <p>$E_6, E_{4,5}$ son los valores de E_M calculados con $U_M^* = 6$ y $U_M^* = 4.5$.</p>

Valores límites permisibles de las aceleraciones:

En la actualización de la norma vigente de viento también está previsto incluir criterios de aceptación de las aceleraciones a través de valores límites. Esto se realizará a través del procedimiento propuesto por la norma de viento italiana. Según esta norma, para garantizar los criterios de servicio de las edificaciones, cada valor de aceleración pico en el sentido longitudinal y transversal en el centro de giro, a_{pL} y a_{pT} , no deben exceder

los valores límites dados por la ecuación (10):

$$a_{lim} = \begin{cases} a_0 & \text{para } n_0 < 1\text{Hz} \\ (n_0)^{0.56} a_0 & \text{para } 1\text{Hz} \leq n_0 \leq 2\text{Hz} \\ 0,5a_0 n_0 & \text{para } n_0 \geq 2\text{Hz} \end{cases} \quad (10)$$

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 los casos de estudio:

Los casos de estudio seleccionados son tres edificaciones con fines hoteleros de hormigón armado (Hotel 1, Hotel 2 y Hotel 3) con tipologías estructurales semejantes. La estructura está formada por columnas perimetrales y vigas de hormigón armado, las losas de entrepiso son de hormigón postesado y el núcleo central es de tímpanos continuos armados in situ. La relación de amortiguamiento crítica utilizada fue de 0,01. El sistema de ejes de referencia se muestra en la figura (1) junto a las direcciones de viento analizadas. Los valores de frecuencias naturales de traslación para el primer modo de oscilación en cada uno de los ejes y las frecuencias torsionales para las tres edificaciones se muestran en la tabla (4). Las dimensiones de los edificios se muestran en la tabla (5). Los valores de frecuencias fueron extraídos de modelos en ETABS luego de realizado el análisis modal.

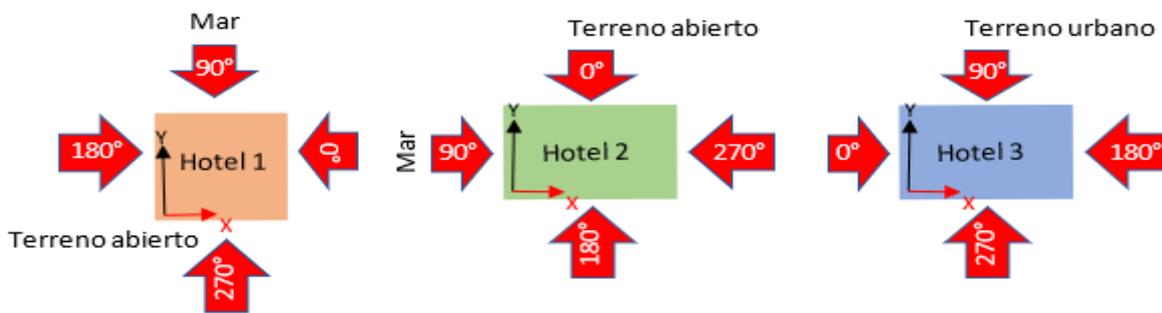


Figura 1: Ejes de referencia y direcciones de viento analizadas de los hoteles 1, 2 y 3.

Tabla 4: Valores de periodos y frecuencias de las edificaciones.

Edificio	Tipo de Modo y dirección	Periodo (seg.)	Frecuencia (Hz.)
Hotel 1	1er Flector (x)	2,74	0,36
	1er Flector (y)	2,21	0,45
	Torsor	1,31	0,76
Hotel 2	1er Flector (y)	2,85	0,35
	1er Flector (x)	2,71	0,37
	Torsor	1,87	0,53
Hotel 3	1er Flector (x)	3,91	0,26
	1er Flector (y)	2,68	0,37
	Torsor	1,42	0,71

El cálculo de las aceleraciones longitudinales, transversales y en sentido torsional se realiza para las direcciones de viento señaladas. Las edificaciones poseen diferentes relaciones ancho/profundidad (B/D). En la figura (2) pueden observarse las dimensiones B y D en función de la dirección del viento. La velocidad básica del viento para diseño por servicio es de 11 m/s. Este último valor es la velocidad media a 10 m de altura, sobre un terreno llano y abierto para un periodo de retorno de 1 año. El valor de velocidad básica utilizado fue obtenido a partir de estudios desarrollados en Cuba [25, 26] para la futura actualización de la norma cubana de viento NC-285:2003. En los hoteles 1 y 2 se tomó 90° como la dirección proveniente del

mar y las otras direcciones corresponden a terrenos abiertos con pocas obstrucciones y terrenos suburbanos. En el Hotel 3, alrededor de todas las direcciones existe un tipo de terreno urbano. En función de las categorías de terreno varían los parámetros que definen el perfil potencial de la velocidad del viento.

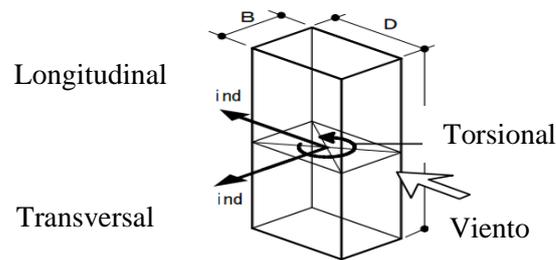


Figura 2: Definición del viento y sus componentes. (Tomado de: AIJ:2004).

3. RESULTADOS

El cálculo de las aceleraciones pico para cada una de las componentes en las tres edificaciones fue realizado a partir de las formulaciones presentadas en la sección anterior y puede observarse en la tabla 5 y en la figura 3 para los tres edificios analizados.

Tabla 5: Valores de aceleraciones pico en las edificaciones estudiadas.

	Componentes en la dirección X (0° y 180° para hoteles 1 y 3, 90° y 270° para hotel 2)			Componentes en la dirección Y (90° y 270° para hoteles 1 y 3, 0° y 180° para hotel 2)		
	Longitudinal	Transversal	Torsional	Longitudinal	Transversal	Torsional
Hotel 3	$h = 151,92$ m, h cálculo= 148,28 m			$h = 151,92$ m, h cálculo= 148,28 m		
	$b = 21$ m			$b = 54$ m		
	$d = 54$ m			$d = 21$ m		
	$Z_e = 91,15$ m			$Z_e = 91,15$ m		
	$U_{m1(h)} = 15,05$ m/s			$U_{m1(h)} = 15,05$ m/s		
	$a_{pL} = 0,34$ cm/s ²	$a_{pT} = 1,28$ cm/s ²	$a_{pM} = 0,01$ rad/s ²	$a_{pL} = 0,40$ cm/s ²	$a_{pT} = 1,18$ cm/s ²	$a_{pM} = 0,04$ rad/s ²
Hotel 2	$h = 99,08$ m, h cálculo= 95 m			$h = 99,08$ m, h cálculo= 95 m		
	$b = 39,17$ m			$b = 41,37$ m		
	$d = 41,37$ m			$d = 39,17$ m		
	$Z_e = 59,45$ m			$Z_e = 59,45$ m		
	$U_{m1(h)} = 17,61$ m/s			$U_{m1(h)} = 15,47$ m/s		
	$a_{pL} = 0,73$ cm/s ²	$a_{pT} = 1,60$ cm/s ²	$a_{pM} = 0,03$ rad/s ²	$a_{pL} = 0,62$ cm/s ²	$a_{pT} = 0,99$ cm/s ²	$a_{pM} = 0,02$ rad/s ²
Hotel 1	$h = 89,88$ m, h cálculo= 85,68 m			$h = 89,88$ m, h cálculo= 85,68 m		
	$b = 31,3$ m			$b = 30,1$ m		
	$d = 30,1$ m			$d = 31,3$ m		
	$Z_e = 53,93$ m			$Z_e = 53,93$ m		
	$U_{m1(h)} = 15,25$ m/s			$U_{m1(h)} = 17,47$ m/s		
	$a_{pL} = 0,66$ cm/s ²	$a_{pT} = 1,05$ cm/s ²	$a_{pM} = 0,02$ rad/s ²	$a_{pL} = 0,69$ cm/s ²	$a_{pT} = 1,94$ cm/s ²	$a_{pM} = 0,04$ rad/s ²

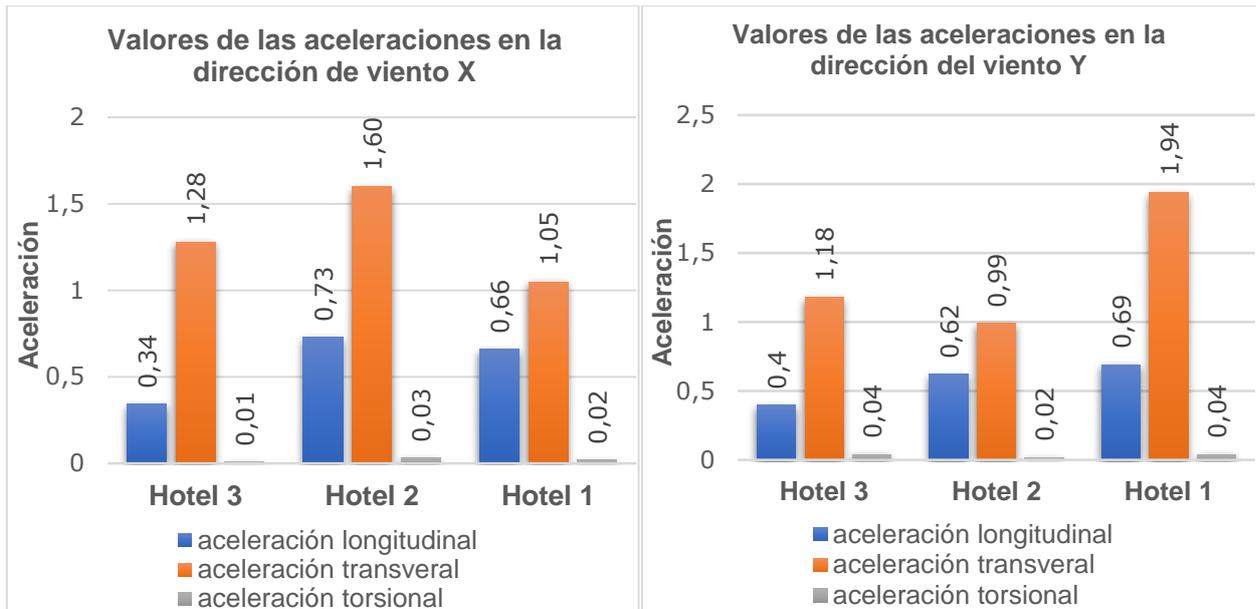


Figura 3: Aceleraciones pico para cada una de las componentes en las tres edificaciones.

En la tabla 6 se presenta un resumen con los valores de las aceleraciones calculadas y permisibles para los edificios analizados en la que se evidencia que los valores calculados no superan los límites permisibles. Todas las frecuencias en las edificaciones son menores que un Hz, por tanto, se comprueba que las aceleraciones no superen las permisibles con la primera formulación de la ecuación (1), donde a_0 se toma como 4 cm/s^2 pues se corresponde mejor con el caso de los hoteles en cuestión. Es necesario tener en cuenta que en la tabla 6, los valores de aceleraciones calculadas que se muestran son los máximos calculados para cada componente analizando las dos direcciones de viento.

Tabla 6: Valores de las aceleraciones calculadas y permisibles.

Edificio	Aceleraciones máximas calculadas (cm/s^2)		aceleraciones permisibles (cm/s^2)
	Componente	Valor	
1	longitudinal	0,69	6,24
	transversal	1,94	
	torsional	0,04	
2	longitudinal	0,73	6,99
	transversal	1,60	
	torsional	0,03	
3	longitudinal	0,40	6,95
	transversal	1,28	
	torsional	0,04	

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron algunas características sobre los estudios de percepción humana del movimiento y se describió el procedimiento a incluir en la nueva norma de viento cubana para el cálculo de las aceleraciones pico en los sentidos longitudinal, transversal y torsional. Se aplicó dicho procedimiento para el caso de tres edificaciones del sector hotelero en La Habana de diferentes alturas y dimensiones en planta. Las aceleraciones actuantes, que responden a formulaciones basadas en la norma japonesa de viento, fueron comparadas con las aceleraciones permisibles cuyas fórmulas de cálculo se incorporarán en la actualización de la NC y están basadas en la norma italiana de viento según los criterios que establece sobre el confort humano y la habitabilidad. Los resultados muestran que los mayores valores de aceleraciones corresponden a las aceleraciones transversales y por tanto son las que rigen el diseño de servicio para todas las edificaciones estudiadas. Todas las aceleraciones pico calculadas resultaron menores que las máximas permisibles. Las futuras investigaciones 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.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Longarini, L. Cabras, M. Zucca, S. Chapain, and A. M. Aly, "Structural improvements for tall buildings under wind loads: comparative study," *Shock and Vibration*, vol. 2017, 2017.
- [2] A. Al-Balhaw and B. ZHANG, "Acceleration responses for tall reinforced concrete office buildings under wind loading," in *6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6)*, 2018, pp. 11-15.
- [3] R. Avini, P. Kumar, and S. J. Hughes, "Wind loading on high-rise buildings and the comfort effects on the occupants," *Sustainable Cities and Society*, vol. 45, pp. 378-394, 2019.
- [4] K. C. Kwok, M. D. Burton, and A. K. Abdelrazaq, *Wind-induced motion of tall buildings: designing for habitability*. American Society of Civil Engineers, 2015.
- [5] A. Kareem and Y. Tamura, *Advanced structural wind engineering*. Springer, 2013.
- [6] K. C. S. Kwok, P. A. Hitchcock, and M. D. Burton, "Perception of vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 97, no. 7, pp. 368-380, 2009/09/01/ 2009.
- [7] S. Lamb and K. C. S. Kwok, "The fundamental human response to wind-induced building motion," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 165, pp. 79-85, 2017/06/01/ 2017.
- [8] S. Lamb and K. C. S. Kwok, "Sopite syndrome in wind-excited buildings: productivity and wellbeing impacts," *Building Research & Information*, vol. 45, no. 3, pp. 347-358, 2017/04/03 2017.
- [9] S. Lamb, K. C. Kwok, and D. Walton, "Occupant comfort in wind-excited tall buildings: Motion sickness, compensatory behaviours and complaint," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 119, pp. 1-12, 2013.
- [10] D. Y. Wang, Y. S. Zhang, and Y. Zhou, "Study on occupant comfort evaluation mode of tall buildings in wind excitation based on fuzzy probability method," vol. 26, no. 9, p. e1365, 2017.
- [11] M. I. Farouk, "Check the comfort of occupants in high rise building using CFD," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 953-958, 2016.
- [12] AIJ-GEH, "Guidelines for the Evaluation of Habitability to Building Vibration. Architectural Institute of Japan," ed: Maruzen Publishing, 2004.
- [13] ISO-10137, "Serviceability of buildings and walkways against vibrations.,," in *International Organization for Standardization. Bases for design of structures.*, ed. Geneva, Switzerland, 2007.
- [14] NBCC, "Part 4 Structural Design, Commentary 1, Wind Load Effects," ed, 2005.
- [15] CNR-DT207, "Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council of Italy, Roma ", ed, 2008.
- [16] A. Pozos-Estrada, "A simple procedure to evaluate the wind-induced acceleration in tall buildings: an application to Mexico," (in En), *Wind and Structures*, vol. 27, no. 5, pp. 337-345, 11/25 2018.
- [17] J. S. Love, Z. J. Taylor, and W. N. Yakymyk, "Determining the peak spatial and resultant accelerations of tall buildings tested in the wind tunnel," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 202, p. 104225, 2020/07/01/ 2020.
- [18] F. Petrini, A. Giaralis, and Z. Wang, "Optimal tuned mass-damper-inerter (TMDI) design in wind-excited tall buildings for occupants' comfort serviceability performance and energy harvesting," *Engineering Structures*, vol. 204, p. 109904, 2020/02/01/ 2020.
- [19] G. Solari, "Wind Loading of Structures: Framework, Phenomena, Tools and Codification," *Structures*, vol. 12, pp. 265-285, 2017/11/01/ 2017.
- [20] M. Jafari and A. Alipour, "Methodologies to mitigate wind-induced vibration of tall buildings: A state-of-the-art review," *Journal of Building Engineering*, vol. 33, p. 101582, 2021/01/01/ 2021.
- [21] AIJ, "RLB Recommendations for loads on buildings. Structural Standards Committee. Architectural Institute of Japan," ed. Tokyo, Japan, 2004.
- [22] EN1991-1-4, "Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions," ed, 2004.
- [23] ISO-4354, "Wind action on structures. International Organization for Standardization.,," ed. Switzerland, 2009.
- [24] ASCE/SEI7-10, "Minimum design loads for buildings and other structures," ed: Reston, VA, 2010.
- [25] K. L. García and V. E. Parnás, "Análisis estadístico de velocidades de viento para el cálculo de estructuras.,," 2017.
- [26] I. Fernández Lorenzo, "Análisis dinámico de torres reticuladas de telecomunicaciones bajo carga de viento extremo.," PhD, Departamento de Estructuras, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba, 2017.