

DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LAS FUERZAS DE VIENTO EN UNA CHIMENEA

Roberto de la C. Llerena¹, Patricia Martín², Vivian B. Elena³

¹Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE), Calle 114 % Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana. e-mail: rllerenat@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: ²patriciamr@civil.cujae.edu.cu , ³ vivian@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

Las estructuras altas y esbeltas poseen un comportamiento dinámico complejo ante la acción de la carga de viento. Dentro de ese grupo, las chimeneas debido a su forma circular se presentan como estructuras altamente sensibles al viento. Las componentes de la respuesta de estas estructuras frente al viento son la longitudinal y la transversal, esta última asociada al fenómeno del desprendimiento de vórtices. La vigente norma cubana NC 285:2003 presenta limitaciones para el cálculo de estructuras circulares sensibles a las acciones dinámicas. En los últimos meses se desarrolla por el comité de norma de viento del MICONS estudios para la elaboración de la actualización de la norma NC-285. En la nueva propuesta se propone una metodología para el cálculo de estas estructuras basada en la norma italiana de viento (CNR-DT 207/2008) con formulaciones que brindan un mayor nivel de precisión al obtener la respuesta de la estructura ante la acción del viento. En este trabajo se realiza una comparación entre la vigente norma cubana NC-285:2003 y la nueva propuesta de norma en cuanto a los procedimientos para el cálculo de la carga de viento en sus componentes longitudinal y transversal en una chimenea. Se obtuvo como resultado que la componente longitudinal calculada por la vigente norma resulta mayor que la de la nueva propuesta de norma, sin embargo, las fuerzas de viento transversales resultan mayores al ser calculadas por la nueva propuesta de norma.

Palabras claves: carga de viento, chimenea, desprendimiento de vórtices

ANALYTICAL DETERMINATION OF WIND FORCES ON A CHIMNEY

ABSTRACT

The tall and slender structures have a complex dynamic behavior in front of the action of wind load. Into this group, the chimneys due to his circular form are presented like structures highly sensitive to the wind. This structures' components of the response of in front of the wind are the longitudinal and the cross-wind, the last is associated to the vortex shedding phenomenon. The current Cuban standard NC 285:2003 show limitations for the compute of circular structures sensitives to the dynamic actions. In the last months are developed by the committee of standard of wind of the MICONS research's for the elaboration of an update for the standard NC 285. In the new proposal are proposed a methodology for the compute of this structures based in the Italian standard of wind (CNR-DT/207 2008) with formulations that bring a more level of accuracy for obtain the response of the structure in front of the wind action. In this paper is accomplished a comparison between the Cuban standard in use NC 285:2003 and the new proposal of standard as for the procedures for the compute of the wind load in his components longitudinal and cross-wind in a chimney. It was got as result that the longitudinal component compute by the standard in use its more than the new proposal of standard, however, the higher cross-wind forces are obtained when are computed by the new proposal of standard.

Keywords: chimney, vortex shedding, wind load

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

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras altas y esbeltas poseen un comportamiento dinámico complejo, debido a diversos fenómenos que complejizan su respuesta ante la acción del viento. Las chimeneas dentro de este grupo presentan formas cilíndricas, así como una distribución de la masa y la inercia que varía en función de la altura, por lo que su cálculo se vuelve aún más complejo. Las chimeneas son estructuras altamente sensibles a la carga de viento debido a su gran altura, su bajo amortiguamiento y su forma circular.

Para analizar la respuesta de estas estructuras ante la carga de viento deben ser analizadas sus dos componentes: longitudinal y transversal. En las estructuras circulares la componente transversal de la carga de viento está asociada al fenómeno de desprendimiento de vórtices alternos, conocidos como vórtices de von Karman.

Este fenómeno produce una acción casi periódica perpendicular a la dirección de flujo y al eje de la estructura o componentes estructurales, cuya frecuencia depende de la velocidad media del viento, de la forma y tamaño de la sección transversal y de la rugosidad de la pared sometida al flujo. Para garantizar la seguridad estructural ante estos fenómenos deben llevarse a cabo análisis teóricos, numéricos o experimentales bien fundamentados.

La primera aproximación teórica para describir el comportamiento de las estructuras circulares frente a carga de viento fue introducido por Scruton [1], el cual fue posteriormente adoptado en el primer modelo matemático para calcular la carga de viento en las estructuras circulares creado por Vickery y Basu [2], un modelo semi-empírico matemático capaz de estimar la respuesta de la componente transversal de estructuras circulares, para ello tiene en cuenta las fuerzas generadas debido al desprendimiento de vórtices y las fuerzas inducidas por el movimiento de la estructura. El modelo de Vickery y Basu [2] es la base de muchos métodos presentes en códigos de viento y normas actuales, como la reciente versión del Código Nacional de Construcción de Canadá [3], el eurocódigo (segundo método) [4] y el CICIND Código Modelo para Chimeneas de Acero [6].

En este siglo se han desarrollado estudios encaminados a analizar el comportamiento dinámico de las chimeneas ante las cargas de viento [7], teniendo en cuenta factores como la no linealidad geométrica y el amortiguamiento aerodinámico, otras de las investigaciones desarrolladas son la determinación de cargas de diseño ante la acción del viento [8, 9]. Karaca [8] realiza un estudio comparativo calculando la carga de viento para diez chimeneas a través de cinco normas, llegando a la conclusión de que las cargas de viento determinadas a través del eurocódigo [4], son entre 3-4 veces mayor que las otras normas. John et al. [9] halla las cargas de diseño de una chimenea a través de un ensayo en túnel de viento, teniendo en cuenta el efecto de interferencia y el efecto producido por las aletas helicoidales. Llegando a la conclusión que el efecto de interferencia produce un aumento en los momentos flectores actuantes sobre la chimenea. Se han realizado también estudios de interferencia en grupos de chimeneas [10, 11], llegando a la conclusión en ambos que el efecto de interferencia provoca un aumento de las fuerzas transversales de las chimeneas. Lupi [12] propone un nuevo método espectral para la predicción de oscilaciones transversales en chimeneas a través del estudio realizado al comportamiento de 27 chimeneas citadas en literaturas anteriores. En el año 2019 [13] presentan un estudio donde se propone un nuevo modelo para predecir el comportamiento de las estructuras esbeltas ante la acción del desprendimiento de vórtices basado en el modelo de Vickery y Basu, creando nuevos coeficientes basados en estudios a chimeneas previamente realizados.

La norma cubana de viento [14] presenta limitaciones en el procedimiento ofrecido para el cálculo de la carga de viento actuante en secciones circulares, el método propuesto en la norma resulta incompatible con las formulaciones presentadas en otras normas internacionales ofreciendo resultados poco precisos, presenta además un rango de velocidades críticas muy pequeño para el chequeo del desprendimiento de vórtices, despreciando formas de oscilación que pueden ofrecer estados de carga más desfavorables para la estructura. Por tanto, en este trabajo se establece una comparación entre la vigente norma cubana de viento y la nueva propuesta de norma, la cual presenta un método para el cálculo de la respuesta ante la acción de viento de estructuras circulares basado en la norma italiana de viento [15].

El objetivo del presente trabajo es establecer una comparación entre las fuerzas de viento actuantes en una chimenea entre la norma cubana de viento vigente NC 285:2003 y la nueva propuesta de norma de viento. La estructura objeto de estudio es una chimenea de hormigón armado de 195 m de altura ubicada en la provincia de La Habana.

2. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

2.1 Descripción de la chimenea

La estructura a analizar es una chimenea de hormigón armado de una central eléctrica con sección transversal variable la cual se considera ubicada en la provincia de La Habana en un terreno tipo abierto. La estructura

tiene una altura de 195 m. El diámetro exterior en la base es de 12,60 m, con un espesor de 0,35 m, en la parte superior el diámetro es de 8,70 m, con un espesor de 0,15 m. Se supone que tanto el diámetro como el espesor cambian linealmente entre la base y la parte superior de la chimenea, esta variación del diámetro con respecto a la altura z está dada por la función $d_{(z)} = 12,6 - 0,02z$. La figura 1 muestra los perfiles verticales de masa por unidad de longitud m , y del momento de inercia de la sección transversal J_f .

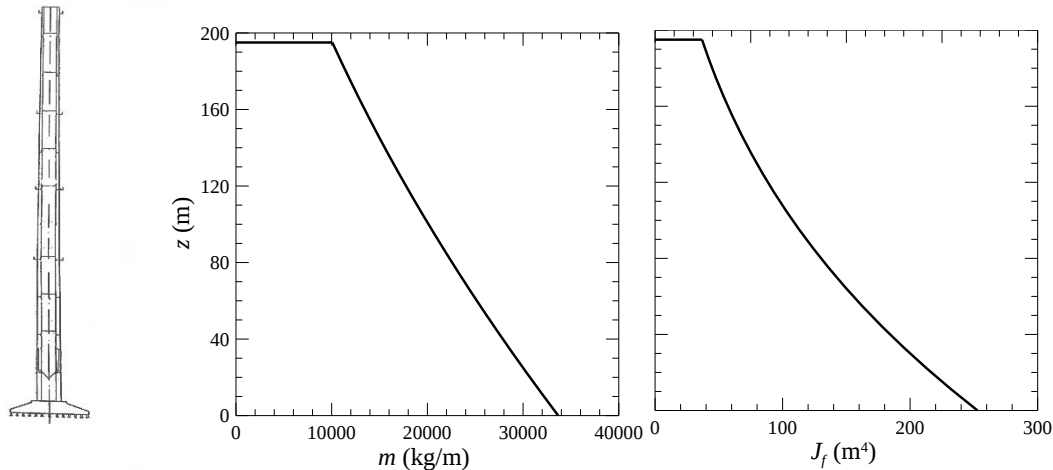


Figura 1: Vista en elevación de la chimenea, perfil vertical de masa por unidad de longitud y perfil de momento de inercia de la sección transversal.

Los parámetros dinámicos de la chimenea de hormigón armado fueron adoptados a partir de la norma italiana de viento [15], la cual presenta este caso de estudio en sus anexos como ejemplo, basado en los resultados de un modelo de elementos finitos y sus frecuencias modales. Dada la doble simetría de la estructura, las frecuencias modales se presentan en pares, $n_1 = n_2 = 0,26$ Hz y $n_3 = n_4 = 1,22$ Hz.

2.2 Cálculo de la carga de viento en la chimenea según la metodología de la norma cubana NC 285:2003. Carga de viento. Método de cálculo

La norma establece que la carga de viento actuante sobre edificios y obras debe determinarse como la suma de las componentes estáticas y dinámicas. Las cargas de viento actuantes calculadas por la NC 285:2003 [14] son las correspondientes a las presiones externas actuantes sobre la estructura.

Componente estática de la carga de viento

La presión de viento actuante se obtiene por la ecuación:

$$q_e = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f \quad (1)$$

Donde q_{10} es la presión característica básica del viento, la cual depende de la región donde se encuentre emplazada la estructura tomando un valor de 1,3 kN/m² para la región occidental, C_t es el coeficiente de recurrencia, C_s es el coeficiente de sitio y C_r el coeficiente de ráfaga. Para la obra objeto de estudio C_t , C_s y C_r toman un valor de 1. C_{ra} el coeficiente de reducción de área, se obtiene de la figura 4 de la NC 285:2003 y toma un valor de 0,9 para el caso objeto de estudio. C_f es el coeficiente de forma, este depende de la geometría de la edificación. Para estructuras con una superficie lateral cilíndrica y superficies lisas o con poca rugosidad (hormigón, acero, madera y otros) el valor del coeficiente de forma se toma del gráfico de la página 39 de la NC 285:2003, para este caso toma un valor de 0,7. C_h es el coeficiente de altura, según las características de su emplazamiento la estructura objeto de estudio se encuentra en un terreno clasificado como tipo A, por lo que el coeficiente de altura se calcula mediante la ecuación 2.

$$C_{h(z)} = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.32} \quad (2)$$

Componente dinámica de la carga de viento

El valor de la componente dinámica de la carga de viento q^D se define por la ecuación:

$$q^D = q^E(H) \cdot K_v \cdot C_{CE} \cdot C^D \cdot d_K \quad (3)$$

En esta ecuación K_v es un coeficiente que tiene en cuenta las oscilaciones propias de la estructura y carácter de la variación del coeficiente de pulsaciones según la altura, se obtiene de la tabla 20 de la NC 285:2003.

C_{CE} es el coeficiente de correlación espacial se obtiene de la tabla 16 en la NC 285:2003, para el caso de estudio toma un valor de 0,62. d_K es el coeficiente de las pulsaciones de la velocidad de viento, se obtiene de la tabla 15 en la NC 285:2003, tomando un valor de 0,38 para el caso objeto de estudio. $q^E(H)$ es la componente estática de la carga de viento a nivel de la parte superior de la estructura, sin considerar el coeficiente de ráfaga, definida por la ecuación 4. C^D es el coeficiente dinámico, se obtiene de la figura 15 en la NC 285:2003, para el caso de estudio toma un valor de 2,6. Este coeficiente depende del período adimensional E_I definido por la ecuación 5.

$$q^E(H) = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_{ra} \cdot C_f \quad (4)$$

$$E_I = \frac{T_I \cdot V}{1200} \quad (5)$$

En la ecuación 5 T_I es el período de la estructura para la “i”ésima forma de oscilación propia y V es la velocidad de cálculo de viento, definida por la ecuación 6, donde γ_s es el coeficiente de carga de la norma de hormigón, tomando un valor de 1,4 para la carga de viento.

$$V = 40 \sqrt{\gamma_s \cdot q_{10}^D \cdot C_t} \quad (6)$$

Comprobación de la resonancia

La oscilación de resonancia aparece durante la velocidad crítica de viento V_{CRI} , correspondiente a la “i”ésima forma de oscilación de la estructura, dicha oscilación se determina por la ecuación 7:

$$V_{CRI}(i) = \frac{d}{T_I S_N} = \frac{5d}{T_I} \quad (7)$$

En la expresión $d(m)$ es el diámetro o lado de la estructura, T_I es el período de la estructura para la “i”ésima forma de oscilación y S_N es el número de Strouhal de la sección transversal, para secciones circulares $S_N = 0,2$. El chequeo de la estructura a la resonancia se realizará si la V_{CRI} se encuentra en el intervalo de 5 m/s hasta 25 m/s. Se obtuvo una velocidad crítica de 11 m/s para el primer modo de oscilación y de 53 m/s para el segundo modo, por lo que resulta necesario aplicar una verificación específica asociada con el desprendimiento de vórtices resonantes para el primer modo de oscilación.

La carga aerodinámica $Q_T(z, i)$ a una altura z producto a la oscilación resonante se determina por la ecuación 8:

$$Q_T(z, i) = \frac{V_{CRI}^2(i)}{1.6 \cdot 10^3} \cdot C_f \cdot d \cdot \frac{U(z, i)}{U(i)_{max}} \quad (8)$$

C_f es el coeficiente de forma de la sección transversal (succión), este depende del número de Reynolds y se toma de un gráfico. El número de Reynolds viene dado por la expresión 9:

$$R_E = 0.687 \cdot V_{CRI}(i) \cdot d \cdot 10^5 \quad (9)$$

Donde d es el diámetro de la estructura en metros, $U(z, i)$ es el valor del desplazamiento horizontal de la estructura durante la “i”ésima forma de oscilación a una altura z y $U(i)_{max}$ es el valor del desplazamiento horizontal máximo de la estructura durante la “i”ésima forma de oscilación.

Las solicitaciones y desplazamientos de la estructura debido al fenómeno de la resonancia para una altura z para la “i”ésima forma de oscilación se determinan por la ecuación 10:

$$S_{res}(z, i) = \frac{\pi \cdot 10^3}{d_L} \cdot \frac{S_t(z, i)}{w_i^2} \cdot \frac{\int_{z_1}^{z_2} Q_T(z, i) \cdot u(z, i) \cdot dz}{m_i} \quad (10)$$

En la ecuación, 10, z_1 y z_2 son la altura de la inferior y superior cilíndrica de la obra respectivamente. d_L es el decremento logarítmico de las oscilaciones, se obtiene de la tabla 21 en la NC 285:2003, w_i es la “i”ésima frecuencia angular de oscilaciones propias de la estructura, y m_i es la masa reducida de la estructura. En este trabajo esta formulación no fue empleada pues el objetivo era comparar las fuerzas de viento y no la respuesta de la estructura en cuanto a solicitaciones y desplazamientos.

2.3 Cálculo de la carga de viento en la chimenea según la metodología de la norma cubana Nueva propuesta NC 285.

Componente estática de la carga de viento

La componente estática de la presión de viento está dada por la presión media (ecuación 12) y la presión pico (ecuación 13), ambas determinadas por la presión básica multiplicada por los coeficientes correspondientes. La presión básica se calcula mediante la ecuación 11.

$$q_{10} = 1/2 \rho U_0^2 \quad (11)$$

$$q_{m(z_e)} = q_{10} C_t C_h \quad (12)$$

$$q_{p(z_e)} = q_{10} C_t C_h C_r \quad (13)$$

Donde ρ es la densidad del aire asumida como 1,22 para 25°C de temperatura (kg/m^3) y U_0 es la velocidad básica de viento (m/s), la cual depende de la ubicación geográfica de la obra objeto de estudio. q_{10} toma un valor de 660 (N/m^2) para la provincia La Habana.

Las presiones de viento sobre las superficies se calculan mediante la ecuación 14 (Presión de viento externa) y Ecuación 15 (Presión de viento interna).

$$Q_{e(z_e)} = q_{p(z_e)} C_{pe} \quad (14)$$

$$Q_{i(z_e)} = q_{p(z_e)} C_{pi} \quad (15)$$

Donde C_{pe} y C_{pi} son los coeficientes de presión interna y externa respectivamente.

Fuerzas de viento longitudinales

La fuerza de viento actuante $F_{V(z_e)}(N)$ sobre una estructura o componente estructural se determina según la ecuación 16 a partir de la presión pico de viento.

$$F_{V(z_e)} = q_{p(z_e)} C_f C_{DL} A \quad (16)$$

Donde q_p es la presión pico, definida por la ecuación 13. C_f es el coeficiente de forma, A es el área expuesta al viento y C_{DL} es el coeficiente dinámico longitudinal definido mediante la ecuación 17.

$$C_{DL} = \frac{G_L}{1 + 7I_{(z_e)}} \quad (17)$$

En la expresión anterior G_L factor de efecto de ráfaga longitudinal (ecuación 18) e $I_{(z_e)}$: intensidad de turbulencia calculada a la altura de referencia Z_e (ver tabla 1)

$$G_L = 1 + 2I_{(z_e)} \sqrt{g_{LB}^2 B_L^2 + g_{LR}^2 R_L^2} \quad (18)$$

Donde g_{LB} factor de pico para la componente no resonante, g_{LR} factor pico para la componente resonante, definido mediante la ecuación 19, B_L factor de la respuesta de no resonante (ecuación 21) y R_L factor de respuesta resonante (ecuación 24).

$$g_{LR} = \sqrt{2 \ln(v_L T)} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \ln(v_L T)}} \geq 3 \quad (19)$$

En la ecuación anterior v_L frecuencia esperada de la respuesta longitudinal definida por la ecuación 20 y T intervalo de promediación de la velocidad media del viento (600 s).

$$v_L = n_L \sqrt{\frac{R_L^2}{B_L^2 + R_L^2}} \geq 0,08 \text{ Hz} \quad (20)$$

En la ecuación 20 n_L es la frecuencia fundamental en el sentido longitudinal para el primer modo de vibración

$$B_L = \frac{1 + 0,2\alpha}{0,63 \left(\frac{\sqrt{bh}}{L_{v(z_e)}} \right)^{0,56} + \frac{1}{\left(\frac{h}{b} \right)^\gamma}} \quad (21)$$

Donde α exponente de la ley potencial de variación de la velocidad media del viento, b ancho de la estructura, h altura de la estructura, Z_e altura de referencia, γ constante que toma valores de 0,15 para $h/b < 1$ y 0,07 para $h/b \geq 1$ y $L_{v(z_e)}$: escala longitudinal de la turbulencia definida mediante la ecuación 22.

$$L_{v(z_e)} = 300(Z_e/200)^v \quad (22)$$

El parámetro v se calcula mediante la expresión 23 donde Z_0 es la longitud de rugosidad.

$$v = 0,67 + 0,05 \ln(Z_0) \quad (23)$$

$$R_L = (1 + 0,6 \alpha) \frac{3}{2+k} K \sqrt{\frac{\pi}{4\xi_L} E_L S(0,57 - 0,35\alpha + r)} \quad (24)$$

En la expresión 24, k es el exponente de potencia de la forma del primer modo de vibración expresado, K factor de corrección del modo definido mediante la ecuación 25, ξ_L razón de amortiguamiento en el primer modo longitudinal de vibración definido mediante la ecuación 26, E_L parámetro adimensional que toma en cuenta el contenido espectral de la turbulencia en el sentido longitudinal definido mediante la ecuación 32, S factor de reducción por dimensión definido mediante la ecuación 33 r factor que representa los efectos de correlación de las presiones a barlovento y las presiones a sotavento definido mediante la ecuación 34.

$$K = 0,27k + 0,73 \quad (25)$$

$$\xi_L = \xi_s + \xi_a + \xi_d \quad (26)$$

ξ_s es la razón de amortiguamiento estructural, ξ_a razón de amortiguamiento aerodinámica definida mediante la expresión 27 y ξ_d razón de amortiguamiento debido a otros dispositivos, en el caso objeto de estudio debido a que no existen dispositivos auxiliares este valor es cero.

$$\xi_a = \frac{C_f \rho b U_{m(Z_e)}}{4\pi n_1 m_{e,1}} \quad (27)$$

En la expresión anterior $U_{m(Z_e)}$ velocidad media calculada a la altura de referencia Z_e definida mediante la expresión 28, n_1 es la frecuencia de oscilación para el primer modo de vibración y $m_{e,1}$ masa equivalente por unidad de longitud para el primer modo de vibración definida mediante la expresión 29.

$$U_{m(Z_e)} = U_0 C_{e(Z_e)} C_{o(Z_e)} \quad (28)$$

Donde $C_{e(Z)}$ coeficiente de exposición y $C_{o(Z)}$ coeficiente de orografía.

$$m_{e,1} = \frac{m_1}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds} \quad (29)$$

Donde m_1 masa generalizada de la estructura, para el primer modo de vibración la cual se calcula mediante la ecuación 30, y $\phi_1(s)$ primera forma modal calculada mediante la ecuación 31.

$$m_1 = \int_0^l m(s) \phi_1^2(s) ds \quad (30)$$

Donde l es la altura de la estructura y $m(s)$ masa estructural por unidad de longitud.

$$\phi_1(s) = \left(\frac{s}{h}\right)^k \quad (31)$$

s es la altura donde se desea calcular y h la altura total de la estructura

$$E_L = \frac{4 \left(\frac{n_L L v(Z_e)}{U_{m(Z_e)}} \right)}{\left\{ 1 + 70,8 \left(\frac{n_L L v(Z_e)}{U_{m(Z_e)}} \right)^2 \right\}^{5/6}} \quad (32)$$

$$S = \frac{0,9}{\sqrt{1 + 6 \left(\frac{n_L h}{U_{m(Z_e)}} \right)^2 \left(1 + 3 \frac{n_L b}{U_{m(Z_e)}} \right)}} \quad (33)$$

$$r = \frac{2\sqrt{0,053 - 0,042\alpha}}{1 + 20 \frac{n_L b}{U_{m(Z_e)}}} \quad (34)$$

Todos los parámetros de estas expresiones fueron definidos anteriormente.

La tabla 1 resume los valores utilizados para el cálculo de la componente estática y dinámica de la carga longitudinal de la estructura,

Tabla 1: Valores utilizados para el cálculo de la carga de viento longitudinal

Componente estática			
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
q_{10}	660 N/m^2	C_t	1
C_r	$1 + 2gI_{ze}$	g	3,5
I_{ze}	$= I_{rz} * C_{oi}$ donde $C_{oi} = 1$	C_f	0,6

I_{rz}	$= 0,1 \left(\frac{z_e}{z_G}\right)^{-\alpha-0,05}$ para $5\ m < z_e \leq 195\ m$	-	
Componente dinámica			
C_{DL}	1,19	G_L	2,13
g_{LR}	3,30	v_L	0,21
B_L	0,86	$L_{v(z_e)}$	226,98
R_L	1,22	K	1,27
ξ_L	0,012	ξ_a	0,007
$U_{m(z_e)}$	47,45	$m_{e,1}$	13900
m_1	542100	E_L	0,099
S	0,28	r	0,22
g_{LB}	3,5	$,\ T$	600s
α	0,15	k	2
ξ_s	0,005		

Chequeo del desprendimiento de vórtices

La velocidad crítica para el desprendimiento de vórtices en el “i” ésimo modo transversal ($U_{cr,i}$) se define como la velocidad media del viento que lleva a la condición de resonancia $n_s = n_{Ti}$. Esta velocidad se determina mediante la ecuación 35:

$$U_{cr,i} = \frac{n_{Ti} b}{S_t} \quad (35)$$

Donde S_t es el número de Strouhal, el cuál depende de la sección transversal del cuerpo y del número de Reynolds. Este se obtiene mediante un proceso iterativo, n_{Ti} es la frecuencia del “i” ésimo modo y b es el ancho de la sección transversal. La velocidad crítica debe ser chequeada en los puntos de desplazamientos modales máximos según sea la forma modal de la estructura. Los efectos del desprendimiento de vórtices deberán evaluarse para velocidades críticas que satisfagan la siguiente condición: $U_{cr,i} < 1,25 U_{m,i}$, donde:

$U_{m,i}$: es la velocidad media evaluada en la altura donde la velocidad crítica ocurre.

A través de la ecuación 35 se realizó el chequeo de resonancia por la nueva propuesta de norma. En la ecuación $S_t = 0,22$ obtenido a través de un proceso iterativo y $C_{TR,i} = 1$ para los dos primeros modos de oscilación. Al aplicar el chequeo para ambos modos de oscilación se obtiene $U_{cr,1} = 10,28 m/s$ y $U_{cr,2} = 48,25 m/s$, siendo para ambos casos menor que $1,25 U_{m,i}$, donde $U_{m,i} = U_0 C_{e(z)} C_{o(z)}$, tomando un valor de $51,48 m/s$. Por lo que resulta necesario realizar la verificación de vórtices resonantes, calculando las fuerzas inducidas por estos vórtices según se detalla a continuación.

Fuerzas de viento transversales. Carga estática equivalente

El efecto de las vibraciones transversales debido al viento, inducidas por el desprendimiento de vórtices en el “i” ésimo modo, se calculan mediante la aplicación de una fuerza estática equivalente por unidad de longitud $F_{T,i}(s)$, perpendicular a la dirección de la velocidad media del viento y al eje de la estructura o elemento estructural:

$$F_{T,i}(s) = m(s) (2\pi n_{T,i})^2 \Phi_{T,i}(s) y_{pL,i} C_{TR,i} \quad (36)$$

Donde s : es la coordenada a lo largo del eje de la estructura, $n_{T,i}$ es la “i” ésima frecuencia natural de la estructura en sentido transversal, $\Phi_{T,i}(s)$ es la “i” ésima forma modal en sentido transversal de la estructura normalizada a 1, $y_{pL,i}$ es el valor máximo de desplazamiento de la estructura, evaluado en s y $C_{TR,i}$ es un parámetro adimensional asociado con el valor crítico de la velocidad media del viento para períodos de retorno elevados:

$$C_{TR,i} = \begin{cases} 1 & \text{para } U_{cr,i} \leq U_{m,i} \\ \frac{U_{m,l}-U_{cr,i}}{U_{m,l}-U_{m,i}} & \text{para } U_{m,i} \leq U_{cr,i} \leq U_{m,l} \\ 0 & \text{para } U_{m,l} \leq U_{cr,i} \end{cases} \quad (37)$$

$U_{m,l}$: es 1,25 veces la velocidad media, evaluada en la altura donde la velocidad crítica ocurre.

Para la determinación del valor de desplazamiento máximo de la estructura $y_{pL,i}$ existen dos métodos: el método espectral y el método armónico.

El desplazamiento por el método espectral se calcula mediante la ecuación (38)

$$y_{pL,1} = g_{dT} \sigma_{dT} \quad (38)$$

Donde g_{dT} es el factor pico para el desplazamiento, calculado mediante la ecuación 39 y σ_{dT} es la desviación estándar del desplazamiento transversal, calculado mediante la ecuación 40.

$$g_{dT} = \sqrt{2} \left\{ 1 + \left[\text{actan} \left(0,7 \left(\frac{S_{c1}}{4\pi K_a} \right)^{2,5} \right) \right]^{1,4} \right\} \quad (39)$$

$$\frac{\sigma_{dT}}{b} = \sqrt{C_1 + \sqrt{C_1^2 + C_2}} \quad (40)$$

S_{c1} es el número de Scruton en el primer modo de vibración en el sentido transversal a la dirección del viento, calculado mediante la ecuación 41, K_a constante de amortiguamiento aerodinámico para el caso objeto de estudio, calculado mediante la expresión 42. C_1 y C_2 son coeficientes adimensionales definidos mediante las ecuaciones 43 y 44 respectivamente.

$$S_{c,n} = \frac{4\pi m_{e,n} \xi_n}{\rho b^2} \quad (41)$$

$$K_a = K_{a,max} C_I \quad (42)$$

$$C_1 = \frac{a_T^2}{2} \left(1 - \frac{S_{c1}}{4\pi K_a} \right) \quad (43)$$

$$C_2 = \frac{a_T^2}{K_a} \frac{\rho b^3}{m_{e,i} h} \frac{C_c^2}{S_c^4} \quad (44)$$

$m_{e,n}$ es la masa equivalente por unidad de longitud, tomando un valor de 13900 kg/m, ξ_n es el amortiguamiento estructural tomando un valor de 0,005 para el caso objeto de estudio, b es el ancho de la chimenea, con un valor de 8,7 m y ρ es la densidad del aire, asumida como 1,22 kg/m³. $K_{a,max}$ es el valor de K_a para una intensidad de turbulencia del 0%, depende de la forma de la sección transversal y del número de Reynolds, tomando un valor de 1 para el caso objeto de estudio; C_I factor de turbulencia, tomando un valor de 1 según la ecuación 45. En la ecuación 43 a_T amplitud límite normalizada, tomando un valor de 0,4 y en la ecuación 44 C_c constante aerodinámica, tomando un valor de 0,01.

$$C_I = \begin{cases} 1 & \text{para } U_{cr,i} \leq 5 \text{ m/s} \\ 1,3 - 0,06 U_{cr,i} & \text{para } 5 < U_{cr,i} \leq 10 \text{ m/s} \\ 0,7 & \text{para } U_{cr,i} > 10 \text{ m/s} \end{cases} \quad (45)$$

El desplazamiento por el método armónico se calcula mediante la ecuación 46

$$\frac{y_{pL,i}}{b} = \frac{1}{S_c^2} \frac{1}{S_{ci}} K_d K_w C_{lat} \quad (46)$$

K_d factor de la forma modal y K_w factor de longitud efectiva de correlación para la "i" ésima forma modal, definidos por las ecuaciones 47, 48 y 49 respectivamente. Para el primer modo de vibración toma $K_d=0,13$ y $K_w=0,57$. Para el segundo modo de vibración $K_d=0,18$ y $K_w=0,6$.

$$K_d = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{L_j} |\Phi_{T,i}(s)| ds}{4\pi \sum_{j=1}^m \int_{L_j} \Phi_{T,i}^2(s) ds} \quad (47)$$

$$K_w = 3 \frac{L_j/b}{\lambda} \left[1 - \frac{L_j/b}{\lambda} + \frac{1}{3} \left(\frac{L_j/b}{\lambda} \right)^2 \right] \leq 0,6 \text{ para el primer modo de estructuras en voladizo} \quad (48)$$

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} |\Phi_{T,i}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{L_j} |\Phi_{T,i}(s)| ds} \leq 0,6 \text{ para el primer modo} \quad (49)$$

m es el número de segmentos es el número de segmentos en los cuales la estructura o elemento estructural es dividido en función de la forma modal $\Phi_{T,i}$ (este valor coincide con el número de antinodos) (figura 2) y n es el número de segmentos en los que la excitación de los vórtices sucede al mismo tiempo. l_j : es la longitud de la estructura entre dos nodos (longitud del segmento j -ésimo) (figura 2); en estructuras en voladizo es igual a la altura de la estructura y L_j es la longitud de correlación. $\Phi_{T,i}$: es la i -ésima forma modal en el sentido transversal a la dirección del viento, definido por las ecuaciones 50 y 51 para el primer y segundo modo respectivamente

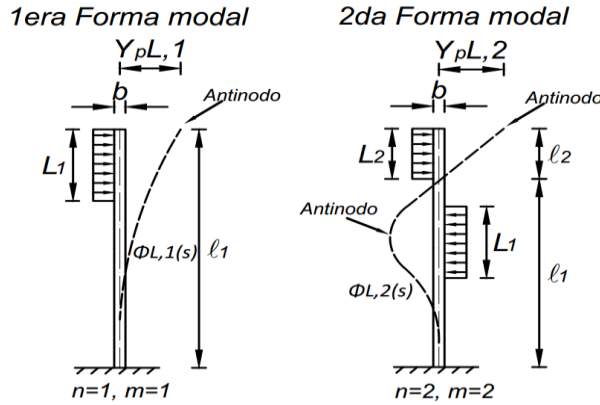


Figura 2: División de la estructura en segmentos, posiciones de los antinodos y longitudes de correlación para ambos modos de vibración.

$$\Phi_{T,1}(s) = \left(\frac{s}{h}\right)^k = \left(\frac{s}{195}\right)^2 \quad (50)$$

$$\Phi_{T,2}(s) = -5,5 \left(\frac{s}{195}\right)^2 + 8 \left(\frac{s}{195}\right)^3 - 1,5 \left(\frac{s}{195}\right)^4 \quad (51)$$

Para el cálculo de K_w es necesario establecer una aproximación inicial, se asume inicialmente para ambos modos que $y_{pL,i}/b \leq 0,1$ tomando L_j/b un valor de 6 según la tabla 2.

Tabla 2: Longitud de correlación L_j

$y_{pL,i}/b$	L_j/b
$< 0,1$	6
$0,1 \sim 0,6$	$4,8 + 12 y_{pL,i}/b$
$> 0,6$	12

C_{lat} es el coeficiente de fuerza lateral, el cual depende de la sección transversal y del número de Reynolds, definido por las ecuaciones 52 y 53 para los dos primeros modos de vibración, $C_{lat,1} = 0,24$ y $C_{lat,2} = 0,3$.

$$C_{lat,1} = -2,0241 + 0,332 \log_{10}(R_e) \text{ para } 5 \cdot 10^6 < R_e < 10^7 \quad (52)$$

$$C_{lat,2} = 0,3 \text{ para } R_e > 10^7 \quad (53)$$

Al realizar el cálculo para ambas formas modales se obtiene que $\frac{y_{pL,i}}{b} < 0,1$ por lo que la aproximación inicial para ambos modos es correcta. Por el método armónico el desplazamiento máximo para el primer modo es de $y_{pL,1} = 0,337 \text{ m}$ y para el segundo modo es de $y_{pL,2} = 0,493 \text{ m}$, siendo este el valor de desplazamiento máximo. Por el método espectral el desplazamiento máximo obtenido es de $y_{pL,1} = 0,303 \text{ m}$ para el primer modo de oscilación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el cálculo de la componente estática y dinámica de la carga de viento en la estructura de chimenea se siguió el procedimiento descrito en ambas normas.

Las fuerzas de viento fueron calculadas en once niveles de altura de la edificación. Los resultados del cálculo

de la fuerza de viento longitudinal $F_{V(z_e)}$ por nivel se muestran en la figura 3a). En la figura se puede observar que la fuerza longitudinal calculada por ambas normas crece de forma lineal con la altura.

La NC 285:2003 [14] arrojó los mayores valores de fuerza para todos los puntos calculados. La diferencia de los valores obtenidos no es constante en la altura, sino que se incrementa con el incremento de la altura de la chimenea. A una altura de 100 m se observa una diferencia porcentual entre los resultados de ambas normas de 30% y alcanza el 53% en el tope de la chimenea.

La fuerza de viento transversal crece de forma exponencial en función de la altura según los resultados de la aplicación de la nueva propuesta de norma de viento. Los resultados obtenidos mediante ambas normas no son comparables pues las formulaciones ofrecen conceptos distintos, la vigente norma cubana (a diferencia de la nueva propuesta) tiene en cuenta el efecto de la masa de la estructura en el cálculo de las solicitaciones y no en los valores de las fuerzas transversales de viento, por lo cual los resultados obtenidos mediante la vigente norma son significativamente menores que los obtenidos mediante la nueva propuesta. La figura 3b) muestra los resultados obtenidos mediante la nueva propuesta de norma y la figura 3c) muestra los resultados obtenidos mediante la vigente NC 285:2003.

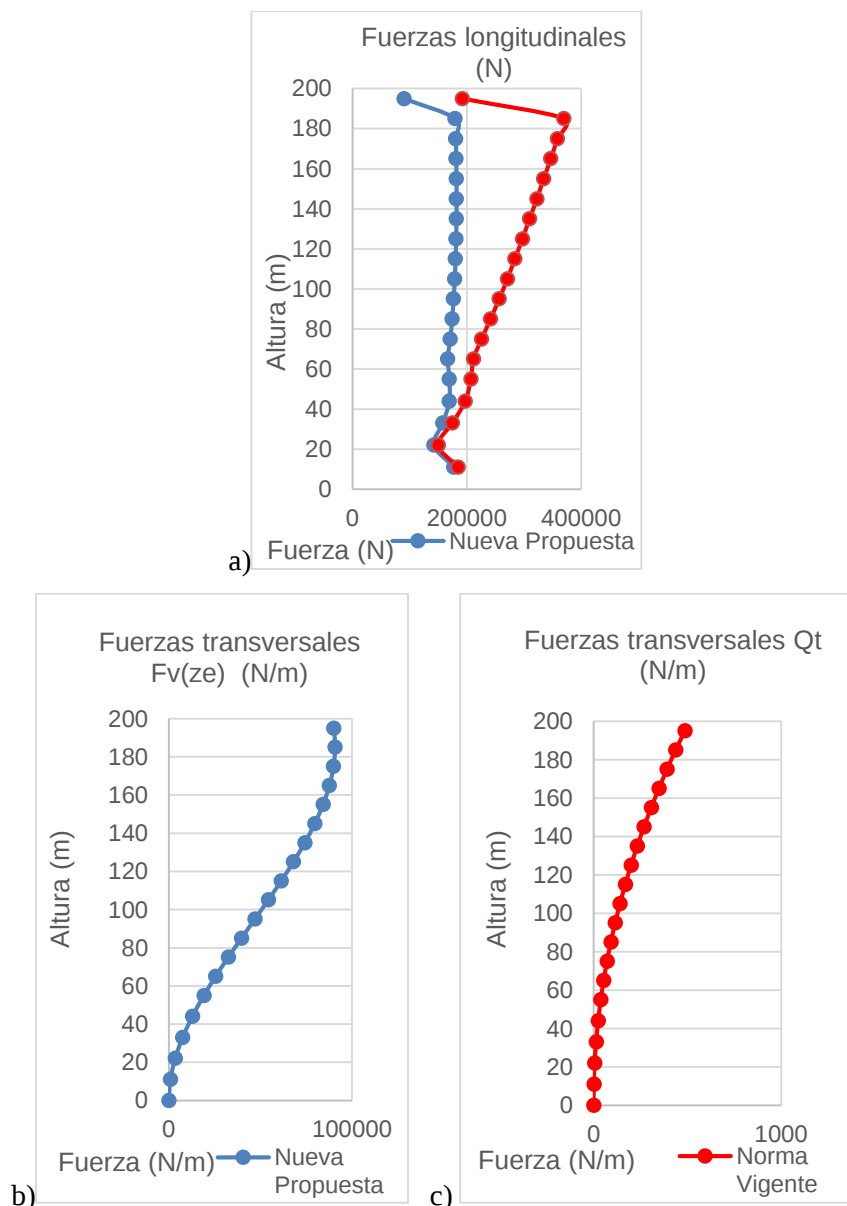


Figura 3: a) Fuerzas de viento longitudinales de la estructura en función de la altura b) Fuerzas de viento transversales para el primer modo de oscilación inducidas por el desprendimiento de vórtices calculadas según la nueva propuesta de norma c) Fuerzas de viento transversales para el primer modo de oscilación inducidas por el desprendimiento de vórtices calculadas según la vigente NC 285:2003

4. CONCLUSIONES

La aplicación de los procedimientos de la norma cubana vigente y de la nueva propuesta de norma permite concluir que las fuerzas de viento longitudinales de la estructura calculadas por la norma vigente NC 285:2003 resultan mayores que las calculadas por la nueva propuesta de norma. La diferencia porcentual al comparar los resultados obtenidos de las fuerzas longitudinales es de alrededor de 50% en el tope de la estructura, además se evidenció que esta diferencia crece de manera lineal al aumentar la altura.

El procedimiento para la comprobación del fenómeno del desprendimiento de vórtices en estructuras esbeltas y la obtención de las fuerzas inducidas sobre la estructura presenta limitaciones en la norma cubana vigente NC 285:2003. Las principales limitaciones son que el análisis es solo para secciones circulares, el análisis para la determinación de los rangos en que debe chequearse el fenómeno del desprendimiento de vórtices en las estructuras es muy simplificado, el análisis dinámico está realizado en función de las fuerzas interiores y no en la modificación de la carga lateral de viento y no aclara que el período que se utiliza es el perpendicular a la dirección de viento analizada.

La nueva propuesta de norma presenta formulaciones de mayor precisión para el cálculo de las fuerzas transversales basadas en la norma italiana de viento [15], eliminando las limitaciones existentes en la vigente NC 285:2003, la nueva propuesta presenta además un nuevo criterio para la comprobación del desprendimiento de vórtices en estructuras y sus fuerzas inducidas. En la nueva propuesta se incluye un mayor rango en el criterio para la determinación de la velocidad críticas que permite incluir en el análisis varios modos de oscilación de la estructura obteniendo estados de carga más desfavorables.

Se recomienda ampliar el estudio comparativo entre ambas normas para otros tipos de estructura circulares que presenten fenómenos aerolásticos debido a la carga de viento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Scruton, "On the wind-excited oscillation of stacks, towers and masts," presented at the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, UK, 1963.
- [2] B. J. Vickery and R. I. Basu, "Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part 1. Development of a mathematical model for two dimensional conditions," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 12, pp. 49-73, 1983.
- [4] NBC, Supplement to the National Building Code of Canada, 1985.
- [5] European Committee for Standardization: Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions, 2004.
- [6] Model Code for Steel Chimneys, Commentaries and Appendices, 2002.
- [7] H. Carvalho, G. Queiroz, P. M. L. Vilela, and R. H. Fakury, "Dynamic analysis of a concrete chimney considering the aerodynamic damping," *Ibracon Structures and Materials Journal*, vol. 12, pp. 308-328, 2019.
- [8] Z. Karaca and E. Türkell, "Determination and comparison of wind loads for industrial reinforced concrete chimneys," *The structural design of tall and special buildings*, vol. 21, pp. 133-153, 2010.
- [9] A. D. John, A. Gairola, E. Ganju, and A. Gupta, "Design wind loads on reinforced concrete chimney - An experimental case study," *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 1252-1257, 2011.
- [10] Y. Sun, Z. Li, X. Sun, N. Su, and S. Peng, "Interference effects between two tall chimneys on wind loads and dynamic responses," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 206, 2020.
- [11] N. Su, Z. Li, S. Peng, and Y. Uematsu, "Interference effects on aerolastic responses and design wind loads of twin high-rise reinforced concrete chimneys," *Engineering Structures*, vol. 233, 2021.
- [12] F. Lupi, H.-J. Niemann, and R. Höffer, "A novel spectral method for cross-wind vibrations: Application to 27 full-scale chimneys," *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, vol. 171, 2017.
- [13] P. Grala, A. M. Loredou-Souza, and M. M. Rocha, "A method to predict vortex shedding response based on Vickery and Basu model: A proposal for the new Brazilian Wind Code," *Engineering Structures*, vol. 198, 2019.
- [14] NC-285. Carga de viento. Método de cálculo. Oficina Nacional de Normalización (NC): Cuba, 2003,
- [15] CNR-DT207, "Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council of Italy, Roma ", ed, 2008