

DYNAMIC COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESPONSE OF A BUILDING SUBJECTED TO WIND ACTION IN THE FREQUENCY DOMAIN FOR FUTURE PROPOSAL TO THE NP-196

Raúl I. Silva

María A. Arévalos

María B. Martínez

Fulgencio A. Aquino

Juan P. Bellassai

Rubén A. López

silva.raul.ivan@gmail.com

aliarevalos@gmail.com

lenbester@gmail.com

aaquino@ing.una.py

jpbellassai@ing.una.py

rlopez@ing.una.py

Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción

Campus Universitario, San Lorenzo/Central, Paraguay

Abstract. The accelerated growth of urban centers and the exponential development of real estate industry have led to an increase of the construction of tall buildings. In addition, thanks to technological advances, new construction methodologies have emerged that make structures slenderer. In this sense, wind action is of fundamental importance in the structures design, especially on a national level, due to the high wind speeds perceived in recent years and that have cause structural collapses.

The national wind code NP-196 does not consider the dynamic action of high winds in slender structures. Some international wind codes consider such action through an amplification factor (gust response factor). Others, such as NBR-6123, present a simplified methodology of a probabilistic analysis. Both methodologies arise from the spectral density response of a typical building by applying a theoretical spectrum of wind gusts. In this context, the present work aims to analyze such methodologies through the application of the mentioned theoretical spectrum on a building, in order to suggest pertinent recommendations for a future proposal of the dynamic action of wind in structures. For this purpose, a dynamic comparative analysis is made of the structure response through vibration theory in the frequency domain. The spectrum of the fluctuating component of the wind force and response spectra were obtained for different theoretical power spectral density of wind velocity, suggested by several authors. The gust response factor for each case analyzed is then obtained as well as the static equivalent fluctuating force, both of which are related to wind codes. Finally, a comparative analysis is presented in which the variation of the wind force over the structure remains under 10%, between different velocity spectrums.

Keywords: Wind; Dynamic Analysis; Spectral Analysis; Frequency; Building.

1 Introducción

Con el gran avance tecnológico que experimenta la humanidad y el crecimiento acelerado de los grandes centros urbanos, la construcción civil también se ve impulsada. Debido al espacio horizontal limitado, cada vez se opta más por el crecimiento vertical a través de la construcción de altas edificaciones. Por otra parte, el surgimiento de nuevas metodologías constructivas y materiales de construcción tornan a las estructuras menos rígidas, por la disminución de espesores y secciones de los elementos estructurales y la utilización de cerramientos livianos. Estos factores se traducen en estructuras más flexibles y susceptibles a experimentar efectos dinámicos debido a la componente fluctuante del viento. Por lo que el proceso de verticalización de los centros urbanos debe ser estudiado de forma a garantizar la seguridad de las edificaciones y las personas.

Así como la mayoría de las normas relacionadas a la acción del viento, la norma paraguaya NP-196 “Acción del viento en las Construcciones” considera la velocidad del viento como la suma de una velocidad media y otra fluctuante. Esta velocidad fluctuante, conocida como “ráfaga”, puede llevar a las estructuras a sucesivas deflexiones oscilatorias importantes, especialmente en estructuras esbeltas y/o flexibles; como puentes, torres, chimeneas, edificios, etc. Para edificaciones más rígidas, la NP-196 considera los efectos de esta fluctuación en el factor S2. Sin embargo, no posee una metodología que contemple este fenómeno en construcciones susceptibles a la acción dinámica del viento.

El “Reglamento argentino de la acción del viento sobre las construcciones” [1] y la norma brasilera NBR 6123 (1988) [2] “Forças devidas ao vento em edificações”, por citar algunas normativas regionales, si consideran el efecto dinámico que el viento ejerce en las estructuras, otras normativas internacionales proponen métodos para el cálculo de las acciones dinámicas del viento en las estructuras, como la norma americana “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures” [3], la norma británica BS 6399-2 (1997) “Loading for buildings – Part 2: Code of practice for wind loads” [4], entre otras. La mayoría de las normativas contemplan este efecto a través del cálculo de un coeficiente denominado Factor de Respuesta de Ráfaga “G” (Gust Response Factor, GRF) (Davenport, 1964 [5], 1967[6]), que corresponde a la relación entre el máximo valor medio del desplazamiento producido por la acción dinámica del viento, para el primer modo de vibración, dividido por el desplazamiento medio. De este modo, se calcula la fuerza estática equivalente (Equivalent Static Force, ESF), la cual es obtenida como producto de la fuerza estática media y el Factor de Respuesta de Ráfaga. La NBR 6123 [2], por su parte, contempla un método a través del cual se calcula la componente fluctuante de la fuerza ejercida por el viento variando con la altura, utilizando el espectro de velocidad de Harris. Todas estas metodologías son simplificaciones del tratamiento estadístico realizado a los espectros de velocidad de la componente fluctuante del viento.

Numerosos autores han sugerido expresiones para la función de densidad espectral de potencia para la componente fluctuante de la velocidad del viento en la misma dirección de la velocidad media, como Davenport (1961b) [7], Harris (1970), Von Kármán (1948) [8], Kaimal, et al. (1972) [9], entre otros.

Como resultado se establece una metodología para el estudio de cargas de ráfaga sobre estructuras civiles en base al análisis probabilístico de diferentes espectros de velocidad. Para ello, se aplica el análisis probabilístico a las ráfagas, se obtiene el factor G en una estructura específica, para diferentes espectros de velocidad, categorías de terreno y velocidades de viento. Posteriormente, esta metodología permitirá el cálculo de la fuerza estática equivalente. Adicionalmente, se puede observar la variación del coeficiente estático equivalente GRF obtenido con las distintas hipótesis.

El objetivo principal del presente trabajo consiste en analizar los fenómenos asociados a la acción dinámica del viento, realizando un estudio y análisis comparativo integral de las herramientas disponibles en la literatura y sugerir recomendaciones para la implementación en la NP-196 [10]. En este contexto se elige primeramente una edificación esbelta y flexible que sea potencialmente susceptible a la acción dinámica del viento que será estudio de las comparaciones. Posteriormente es caracterizada la estructura elegida de acuerdo con su modo de vibración, coeficiente de

amortiguamiento y frecuencia natural. El análisis dinámico de la estructura es a continuación realizado por el análisis probabilístico para diferentes espectros de la componente fluctuante del viento. En base a los resultados obtenidos, se emiten unas primeras sugerencias de consideraciones normativas para futura propuesta de una inclusión de análisis dinámico en la NP 196 [10].

2 Análisis dinámico de estructuras en el dominio de la frecuencia

La Norma Paraguaya NP-196[10] “Acción del viento en las Construcciones”, así como la mayoría de las normas, considera la velocidad del viento como la suma de una velocidad media y otra fluctuante. Esta velocidad fluctuante es conocida como “ráfaga” y puede producir en las estructuras sucesivas deflexiones oscilatorias importantes, especialmente si la estructura sobre la cual actúa la ráfaga es esbelta y/o flexible; como puentes, torres, chimeneas, edificios, etc.

Para edificaciones más rígidas, la NP-196[10] considera los efectos de esta fluctuación en el Factor Combinado S2. Sin embargo, no posee una metodología que contemple este fenómeno en construcciones susceptibles a la acción dinámica del viento (estructuras esbeltas y/o flexibles).

En este sentido, el presente trabajo pretende analizar los fenómenos asociados a la acción dinámica del viento, realizando un estudio y análisis comparativo integral de las herramientas disponibles en la literatura y sugerir recomendaciones para la implementación en la NP-196[10].

El análisis dinámico que será efectuado constará de las siguientes etapas:

- División de la estructura en módulos de alturas compatibles con la geometría.
- Determinación las áreas de exposición y coeficientes de arrastre en cada módulo.
- Aplicación de los diferentes espectros teóricos de la componente fluctuante del viento, considerados como procesos aleatorios ergódicos y estacionarios.
- Obtención y comparación la densidad espectral de la respuesta en frecuencia para cada espectro considerado.
- Determinación la varianza de la densidad espectral de la respuesta para la determinación del Factor de Respuesta de Ráfaga en cada caso.

En base a los resultados obtenidos e intentando generalizar el problema en función al modo de vibración, frecuencia natural y coeficiente de amortiguamiento, se abordarán algunas necesidades de consideraciones normativas para futura propuesta de una inclusión de análisis dinámico en la NP 196[10].

3 Metodología de Trabajo

Para el desarrollo de la investigación, primeramente, se adoptó un edificio en altura con características representativas, en el cual se basará todo el estudio. Posteriormente se calculó el efecto dinámico del viento en el edificio aplicando la metodología general de los espectros (considerado como un proceso aleatorio, ergódico y estacionario) y se determinó la densidad espectral de la respuesta en el dominio de la frecuencia. Finalmente, se realizó una comparación de los parámetros obtenidos entre los diferentes espectros de frecuencia. Se asumieron como variables la velocidad básica del viento, la categoría del terreno y los diferentes espectros de velocidad.

3.1 Descripción del Edificio

Para el desarrollo de la investigación, se adoptó una edificación analizada en el 2014 por Fabrício Bagatini Cachuço [11]. El trabajo mencionado contempla un edificio construido con plantas tipos a lo largo de su altura, y su uso está contemplado como residencial.

El sistema estructural del edificio está compuesto por losas, pórticos formados por pilares y vigas y dos elementos verticales (pantallas) de gran porte, todos de hormigón armado. Se ha adoptado este edificio porque las dimensiones que posee son representativas para el estudio que se realiza y porque ellas definen características generales típicas de edificios altos de hormigón armado construidos en

nuestra zona.

Algunas características son:

- El edificio cuenta con 27 plantas por encima del nivel del suelo.
- Todos los niveles son de una única planta tipo.
- La estructura está compuesta por losas, vigas, pilares y pantallas de hormigón armado convencional.

- La altura total del edificio es de 81 metros.
- La altura de piso a piso es de 3 metros.

Las características se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos relativos al edificio.

Datos Generales del Proyecto		
H	81 m	Altura Total
h	3 m	Altura de piso a piso
bx	25 m	Dimensión del edificio en x
by	12 m	Dimensión del edificio en y
Sup	319,41 m ²	Superficie de la planta tipo
Mp	270 ton	Masa de cada planta
Mt	7290 ton	Masa total

Es de resaltar que los pilares tienen su mayor dimensión en la dirección y, mientras que el edificio tiene su mayor dimensión horizontal en la dirección x.

Se muestra una vista en 3D de la estructura Figura 1 y la planta tipo del edificio en la Figura 2.

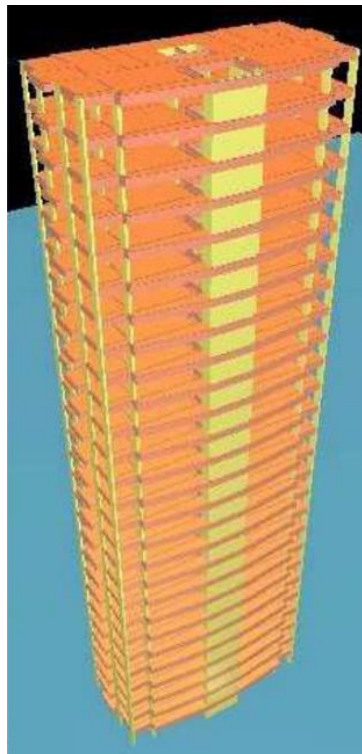


Figura 1. Vista en 3D de la estructura estudiada (Cachuço, 2014) [11]

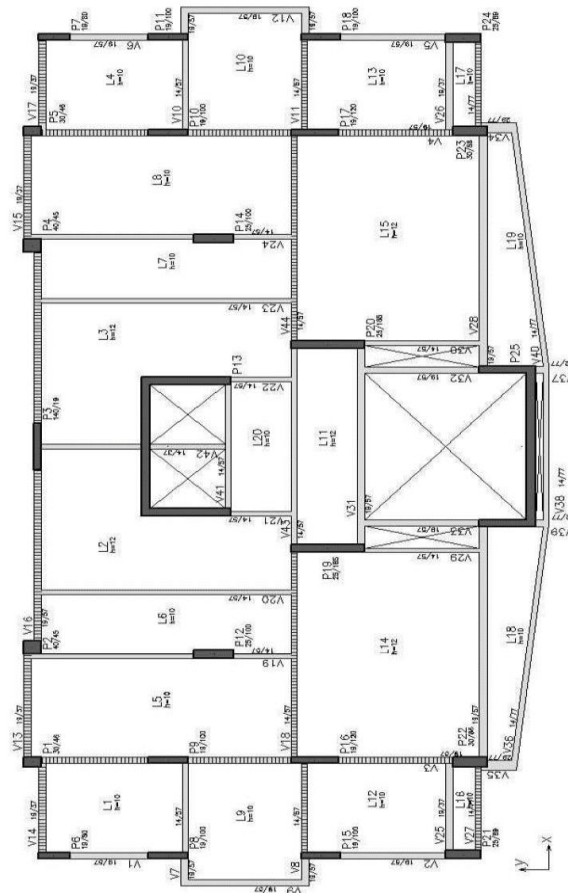


Figura 2. Planta Tipo del Edificio Estudiado (Cachuço, 2014) [11]

3.2 Ubicación del edificio y descripción del entorno

En el estudio se plantearon diferentes ubicaciones del edificio, de tal modo que se analizaron diferentes casos de velocidad básica y categorías.

Para el estudio se fueron realizados cálculos para las velocidades básicas que se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Variación de v_0 para el análisis

v_0 (m/s)	10	20	30	40	50
-------------	----	----	----	----	----

Se adoptó el coeficiente topográfico igual a la unidad:

$$s_1 = 1 \quad (1)$$

La máxima dimensión de la superficie frontal del edificio en estudio es mayor a 50 metros (altura 81 metros), por lo tanto, se encuadra en la Clase C. Además, se consideró diferentes tipos de exposición y entorno, por ende, la Categoría es variable y para el cálculo del coeficiente s_2 fueron considerados los coeficientes de la Tabla 3:

Tabla 3. Coeficientes para el cálculo de s_2

Categorías	Coeficiente	Cálculo Dinámico NBR 6123
I	p	0,095
	b	1,23
II	p	0,150
	b	1,00
III	p	0,185
	b	0,86
IV	p	0,230
	b	0,71
V	p	0,310
	b	0,50

Y $Fr=0,69$ para todas las categorías.

Como el uso previsto para el edificio es residencial, se adopta el factor probabilístico $S3=1$.

3.3 Discretización del edificio.

El edificio ha sido subdividido considerando los puntos discretizados en la misma posición que las plantas de la edificación, conforme la Figura 1, de esta forma se consideran 27 puntos, la separación entre los puntos considerados es igual a $\Delta h=3$ metros, la masa de cada punto es $m_i=270.000$ kg, el área de exposición en x es igual a $A_{x_i} = b_x \Delta h = 25 * 3 = 75 \text{ m}^2$, a excepción de la primera área que es igual a $A_{x_1} = b_x (\Delta h + 0,5\Delta h) = 25 * 4,5 = 112,5 \text{ m}^2$ y de la última área que es igual a $A_{x_{27}} = b_x (0,5\Delta h) = 25 * 1,5 = 37,5 \text{ m}^2$. La masa de cada planta es igual a $m_i = 270.000$ kg según establece la Tabla 1.

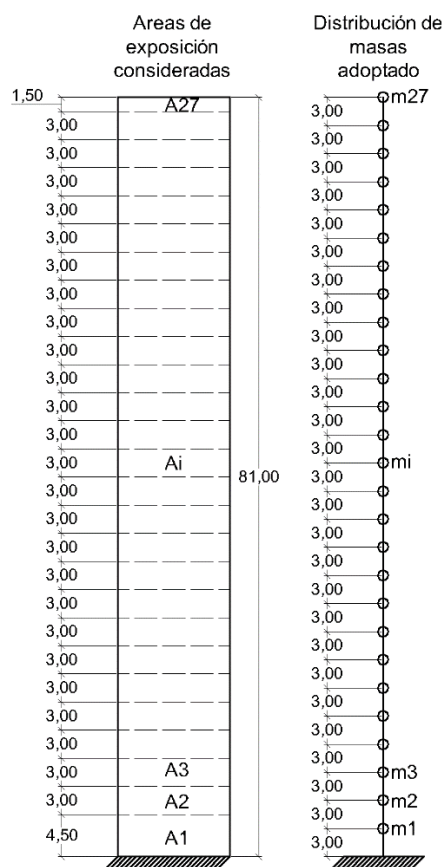


Figura 3. Discretización del Edificio

3.4 Coeficiente de arrastre.

Para la determinación del coeficiente de arrastre, se verifica si se cumplen las condiciones establecidas en la NBR 6123 [2] para viento de alta turbulencia. Finalmente se obtiene que el edificio se encuadra en el caso de viento de baja turbulencia. Como se analiza el caso de viento incidiendo en la cara X, es decir, el viento sigue la dirección Y, se observa que $l_1=25(m)$, $l_2=12(m)$ y $h=81(m)$, por lo tanto, se calculan las relaciones $h/l_1=3,24$ y $l_1/l_2=2,08$, y se obtiene el valor de $Ca_i=1,45$. Considerando que las dimensiones horizontales del edificio son constantes, el coeficiente de arrastre Ca se mantiene constante para cada elemento i .

3.5 Modo de vibración y frecuencia natural.

El modo de vibración y la frecuencia natural de la edificación fueron calculados por Cachuço [11]. La frecuencia natural es 0,339 Hz y el modo de vibración se presenta en la Figura 4:

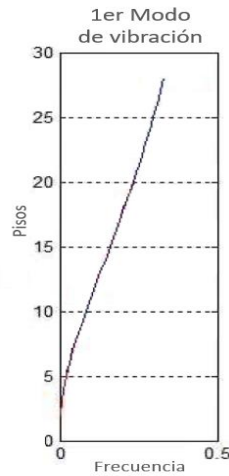


Figura 4. Modo de vibración de la estructura estudiada (Cachuço, 2014) [11].

3.6 Parámetros para determinación de efectos dinámicos.

Considerando que la estructura analizada, es aperturada y con pantallas para absorber esfuerzos horizontales, de la NBR 6123 [2] se obtiene que el coeficiente de amortiguamiento es igual a $\zeta=0,015$.

3.7 Espectros de velocidad

Para el cálculo de la componente fluctuante del viento, fueron utilizados los espectros de velocidad propuestos por Davenport (1961b), Harris (1970), Kaimal (1972) y Karman (1948).

Las cuatro expresiones del espectro de velocidad de los ítems anteriores pueden ser sustituidos por una única según Blessman [12]:

$$\frac{f S_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{A X_1^m}{(B + C X_1^k)^n} \quad (2)$$

Siendo $X_1 = f L / \bar{V}(z)$. Los valores de los parámetros numéricos están dados en la Tabla 4. Cuando fuera el caso, el valor de L corresponde a la categoría III de la NBR 6123 a 100 m de altura. La gran diferencia entre los valores de L muestra que no es posible, al comparar los resultados, incluir L en la abscisa de los espectros a ser comparados.

Tabla 4. Espectros de velocidad de diversos autores a 100 m de altura

Autor	Parámetros numéricos						L para z=100m	Notas
	A	B	C	m	n	k	(m)	
Davenport	2/3	1	1	2	4/3	2	1200	(1)
Harris	0,6	2	1	1	5/6	2	1800	(1)
Karman	4	1	70,78	1	5/6	2	139	(2)
Kaimal	100/3	1	50	1	5/3	1	100	(3)

(1): No dependen de z.
(2): $L = L_{11}(z) = 25 z^{0,35} z_0^{-0,063}$;
(3): $L = z$.

3.8 Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación adoptado en el proceso de análisis espectral es el siguiente:

$$R(z_i, z_j, f) = \exp \left[- \frac{C_z f \Delta z}{\bar{V}_{ref}} \left(\frac{z_m}{z_r} \right)^{-0.3} \right] \quad (3)$$

Donde:

Δz es la distancia entre dos puntos i y j, medida en el plano perpendicular a la velocidad media del viento.

$z_m = (z_i + z_j) / 2$ que es el punto medio entre los puntos i y j.

$C_z = 10$ (Blessman, 2013)

$z_r = 10$ (m)

4 Resultados

4.1 Espectros de Velocidad

En la Figura 5 y 6 se muestran las curvas de las funciones de densidad espectral de la componente fluctuante del viento propuestos por Davenport (1961b), Harris (1970), Karman (1948) y Kaimal, et. al. (1972). El gráfico se encuentra en escala semilogarítmica, para la Figura 5 en abscisas se tiene f / \bar{V}_{ref} y en ordenadas $f S_v / \sigma_v^2$, para la Figura 6 se tienen los mismos datos, en abscisas se tiene la frecuencia f y en ordenadas el espectro de velocidad S_v . Se resalta que las coordenadas de los espectros se encuentran multiplicados por la frecuencia para la Figura 6.a, por ende, hay una alteración con los valores de S_v , pues para este caso la frecuencia varía desde 0 hasta 1 Hz. Los espectros de Harris y Davenport no dependen de la altura z, únicamente están en función de la frecuencia f, sin embargo, los espectros de Von Karman y Kaimal si depende de la altura z y la frecuencia f. Los parámetros como la escala de componente longitudinal de las ráfagas, la altura z y la velocidad básica considerada para el cálculo de cada curva se encuentran especificados en la Figura 6.

En la Figura 6, se aprecia que la forma de las curvas es similar para los espectros de Harris, Von Karman y Kaimal, iniciando en un valor diferente de cero y las curvas ligeramente paralelas en sus inicios para luego converger aproximadamente en $f=0,022$ (Hz), mientras que la curva del espectro de Davenport inicia en cero y aumenta gradualmente su valor hasta alcanzar la frecuencia de 0,022 (hz). Desde este punto las 4 curvas descienden hasta hacerse prácticamente nulas a los 1 (Hz).

Con la presentación de la Figura 5, se observa que las 4 curvas tienen una distribución aproximadamente normal (para la escala semilogarítmica). El menor valor pico se obtiene para el espectro de Kaimal y el máximo valor pico para el espectro de Davenport. Los picos de los espectros de Harris y Von Karman presentan un valor intermedio a los anteriores y son aproximadamente iguales.

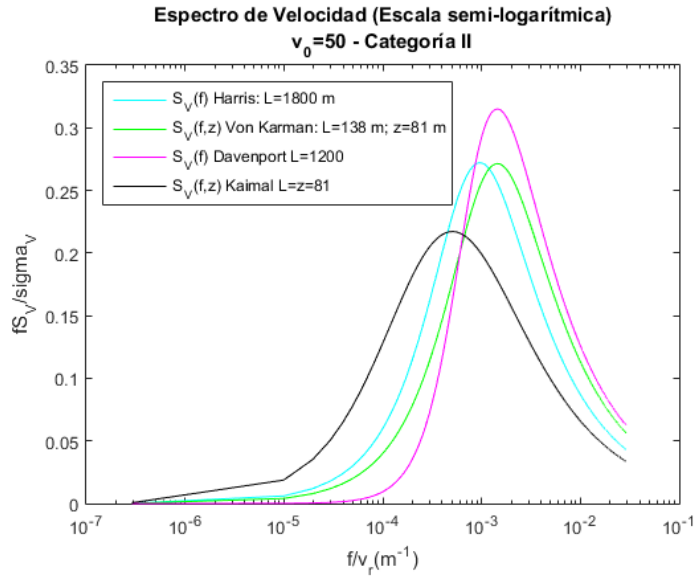


Figura 5. Espectros de Velocidad (escala semilogarítmica) a) fS_v/σ_v^2 vs f/v_r .

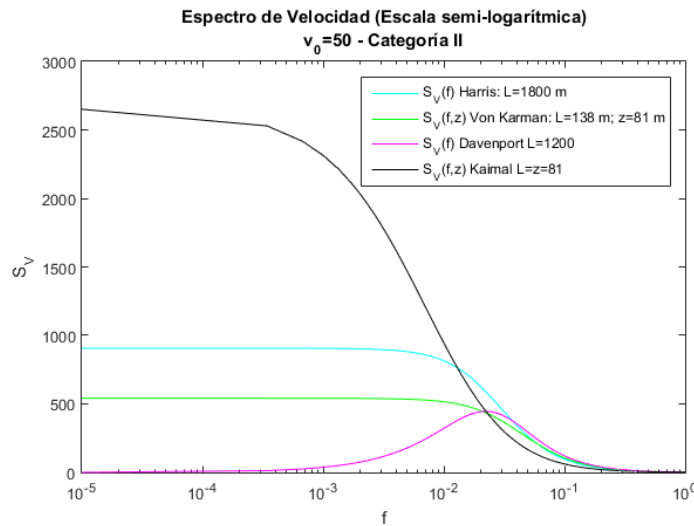


Figura 6. Espectros de Velocidad (escala semilogarítmica) - S_v vs f .

4.2 Espectro de Fuerza

En las Figuras 7 y 8 se muestran la curva de las funciones de densidad espectral de fuerza, que fueron calculados en función a los espectros de Davenport (1961b), Harris (1970), Karman (1948) y Kaimal (1972), en escala semilogarítmica, para Figura 7 en abscisas se tiene f/\bar{V}_{ref} y en ordenadas $f S_p/P^2$, para la Figura 8 se tienen los mismos datos, en abscisas se tiene la frecuencia f y en ordenadas el espectro de fuerza S_p . Todas las curvas de espectros de fuerza se encuentran en función a la frecuencia f . Se aprecia que la forma de las curvas es similar para los cuatro espectros. Los picos de las 4 curvas se obtienen en torno la abscisa de $0,001 (m^{-1})$, al igual que en las curvas de los espectros de velocidad.

En la Figura 7, se aprecia que las curvas tienen un comportamiento similar al espectro de velocidad correspondiente de la Figura 6.b, donde los espectros de Harris, Von Karman y Kaimal inician en un valor diferente de cero y las curvas ligeramente paralelas en sus inicios para luego converger aproximadamente en $f=0,022$ (Hz), mientras que la curva del espectro de fuerza que corresponde al espectro de velocidad de Davenport inicia en cero y aumenta gradualmente su valor hasta alcanzar la frecuencia de $0,022$ (Hz). Desde este punto las 4 curvas descienden hasta hacerse

prácticamente nulas a los 1 (Hz).

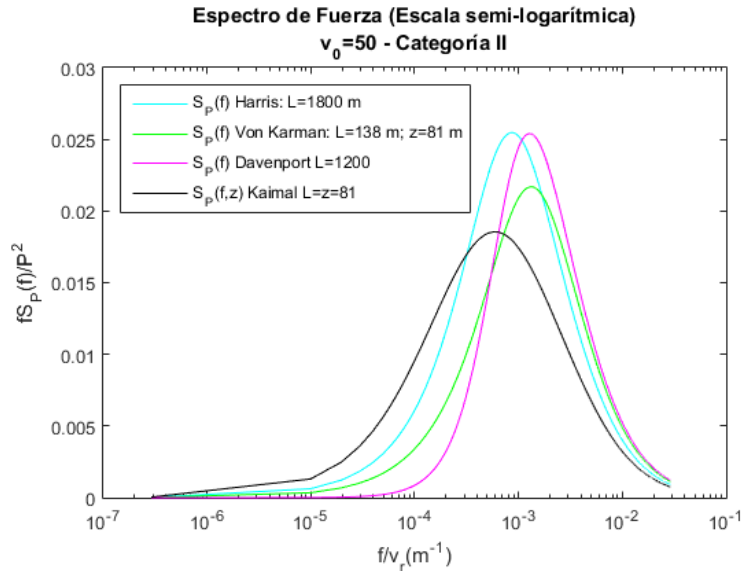


Figura 7. Espectros de Fuerza (escala semilogarítmica) - fS_P/P^2 vs f/v_r .

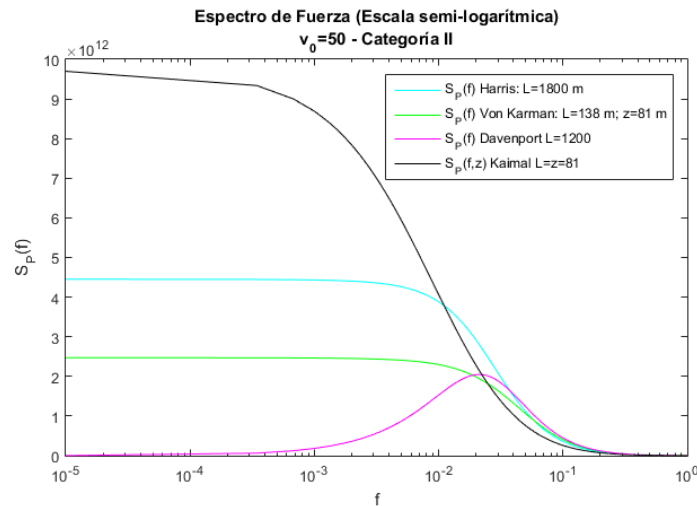


Figura 8. Espectros de Fuerza (escala semilogarítmica) - S_P vs f .

Con la presentación de la Figura 7, se observa que las 4 curvas tienen una distribución aproximadamente normal (para la escala semilogarítmica). El menor valor pico se obtiene para el espectro de Kaimal y el máximo valor pico para el espectro de Harris y Davenport que son aproximadamente iguales. El pico del espectro de fuerza para el espectro de Karman es un valor intermedio a los anteriores.

4.3 Espectro de Respuesta

En las Figuras 9 y 10 se muestran las curvas de las funciones de densidad espectral de respuesta que fueron calculados en función a los espectros de fuerzas del apartado anterior, se encuentran en escala semilogarítmica. Para la Figura 9 en abscisas se tiene f/\bar{V}_{ref} y en ordenadas $f S_X/X^2$, para la Figura 10 se tienen los mismos datos, en abscisas se tiene la frecuencia f y en ordenadas el espectro de respuesta S_X . Todas las curvas de espectros de fuerza se encuentran en función a la frecuencia f . Se aprecia que la forma de las curvas es similar para los espectros de Harris, Kaimal y Von Karman y difieren en sus inicios con la curva del espectro de Davenport, así como ocurrió con las curvas de densidad espectral de velocidad y de fuerza.

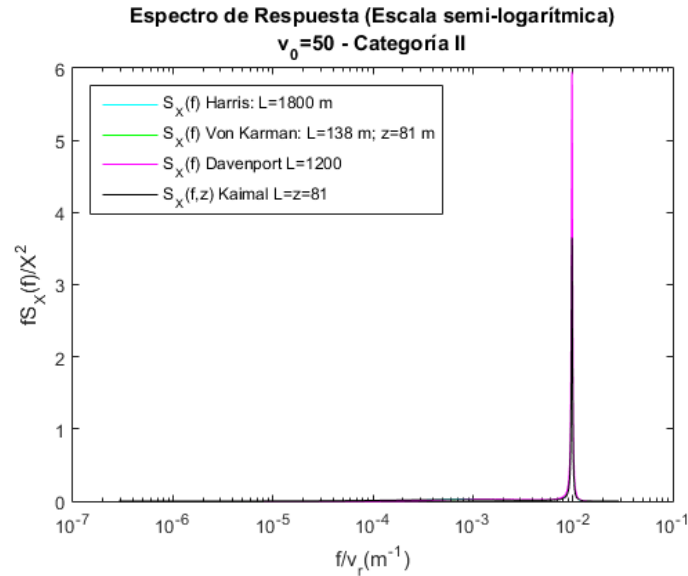


Figura 9. Espectros de Respuesta (escala semilogarítmica) fS_x/X^2 vs f/v_r .

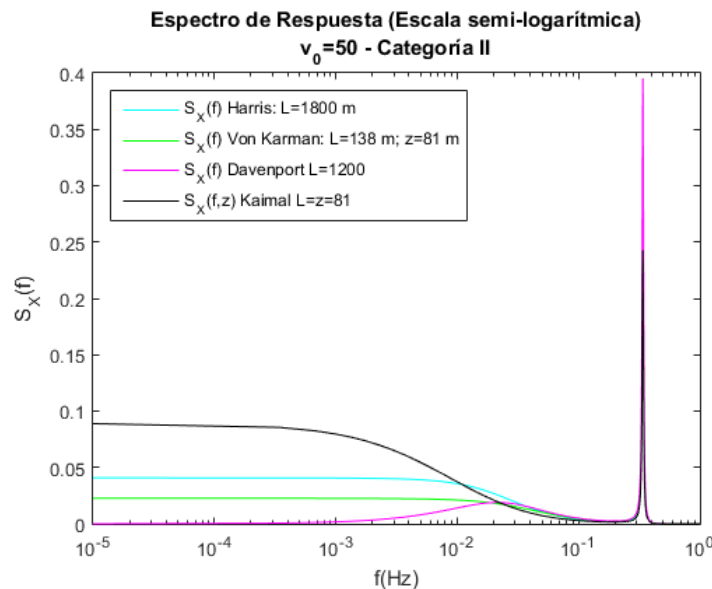


Figura 10. Espectros de Respuesta (escala semilogarítmica) S_x vs f .

El menor valor pico se obtiene para el espectro de Kaimal y el máximo valor pico para el espectro de Davenport. Los picos intermedios son de Harris y Karman.

En la Figura 10 se aprecian las componentes cuasi-estáticas y las resonantes. El pico de todos los espectros se encuentra en la frecuencia 0,3388 Hz que es la frecuencia resonante y coincide con la frecuencia natural de la estructura que es 0,3390 Hz.

4.4 Factor de Respuesta de Ráfaga (Gust Response Factor – G)

Para el cálculo del Factor de Respuesta de Ráfaga, se ha tomado como variables la velocidad básica del viento ($v_0= 10, 20, 30, 40$ y 50 m/s) y la categoría del terreno (del I al V). En ordenadas se coloca el factor G y en abscisas $v_0/(f_n * L)$. Como la Escala Longitudinal varía con z, para el caso de Kaimal y Karman, se ha adoptado L para $z=81$ m para obtener los valores en abscisas. Se podrá observar que los valores de G aumentan a medida que lo hacen los valores de v_0 .

Factor de Respuesta de Ráfaga para Categoría I

En la Tabla 5 se resumen los valores de G calculados para las diferentes hipótesis. En la Figura 11 se grafican estos resultados.

Tabla 5. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. I, todos los espectros y v_0

Categoría I								
V_0	Davenport		Harris		Kaimal		Karman	
	$V_0/f_n L$	G	$V_0/f_n L$	G	$V_0/f_n L$	G	$V_0/f_n L$	G
10	0,02	1,77	0,02	1,78	0,36	1,73	0,18	1,75
20	0,05	2,01	0,03	1,98	0,73	1,89	0,36	1,95
30	0,07	2,24	0,05	2,16	1,09	2,04	0,54	2,14
40	0,10	2,43	0,07	2,32	1,46	2,18	0,73	2,31
50	0,12	2,60	0,08	2,46	1,82	2,30	0,91	2,46

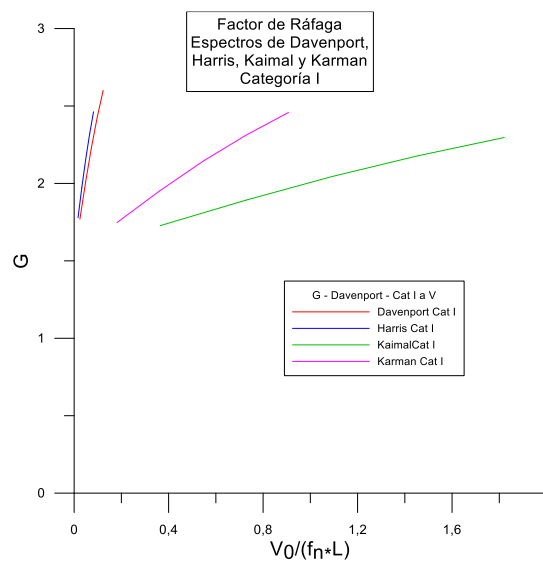


Figura 11. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. I, todos los espectros y v_0

Se observa que cada curva tiene una variación aproximadamente lineal, además se observa que para $v_0 = 10m/s$, los valores de G para todos los espectros son aproximadamente iguales; sin embargo, para $v_0 = 50m/s$ se tiene una mayor dispersión, siendo el valor máximo para el espectro de Davenport. Se aprecia también que G para una misma v_0 son aproximadamente iguales para Harris y Karman.

Factor de Respuesta de Ráfaga para Categoría II

En la Tabla 6 se resumen los valores de G calculados para las diferentes hipótesis. En la Figura 12 se grafican estos resultados.

Tabla 6. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. II, todos los espectros y v_0

Categoría II								
V_0	Davenport		Harris		Kaimal		Karman	
	$V_0/f_n L$	G	$V_0/f_n L$	G	$V_0/f_n L$	G	$V_0/f_n L$	G
10	0,02	2,00	0,02	2,03	0,36	1,97	0,18	2,00
20	0,05	2,28	0,03	2,25	0,73	2,17	0,36	2,27
30	0,07	2,55	0,05	2,47	1,09	2,35	0,54	2,52
40	0,10	2,79	0,07	2,67	1,46	2,52	0,73	2,75
50	0,12	3,00	0,08	2,84	1,82	2,68	0,91	2,95

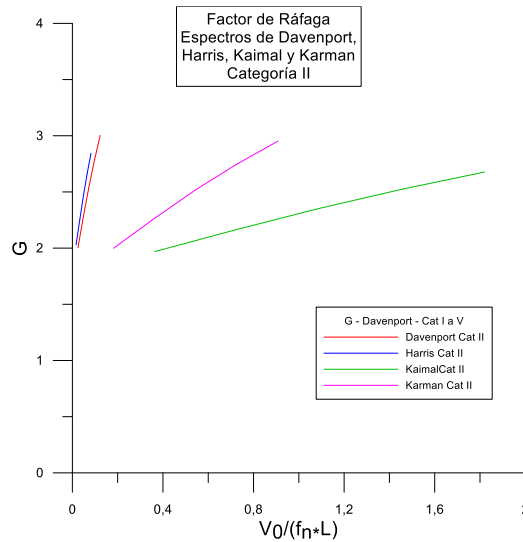


Figura 12. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. II, todos los espectros y v_0

Se observa que cada curva tiene una variación aproximadamente lineal, además se observa que para $v_0=10\text{m/s}$, los valores de G para todos los espectros son aproximadamente iguales; sin embargo, para $v_0=50\text{m/s}$ se tiene una mayor dispersión, siendo el valor máximo para el espectro de Davenport. Se aprecia también que G para Davenport y Karman y una misma v_0 son aproximadamente iguales.

Factor de Respuesta de Ráfaga para Categoría III

Tabla 7. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. III, todos los espectros y v_0

Categoría III								
V_0	Davenport		Harris		Kaimal		Karman	
	$V_0/fn/L$	G	$V_0/fn/L$	G	$V_0/fn/L$	G	$V_0/fn/L$	G
10	0,02	2,15	0,02	2,19	0,36	2,13	0,18	2,16
20	0,05	2,44	0,03	2,43	0,73	2,34	0,36	2,46
30	0,07	2,73	0,05	2,65	1,09	2,54	0,54	2,74
40	0,10	2,99	0,07	2,86	1,46	2,73	0,73	3,01
50	0,12	3,22	0,08	3,06	1,82	2,90	0,91	3,25

En la Tabla 7 se resumen los valores de G calculados para las diferentes hipótesis. En la Figura 13 se grafican estos resultados.

Se puede observar que cada curva tiene una variación aproximadamente lineal, además se observa que para $v_0=10\text{m/s}$, los valores de G para todos los espectros son aproximadamente iguales; sin embargo, para $v_0=50\text{m/s}$ se tiene una mayor dispersión, siendo el valor máximo para el espectro de Karman. Se aprecia también que G para Davenport y Karman y una misma v_0 son aproximadamente iguales.

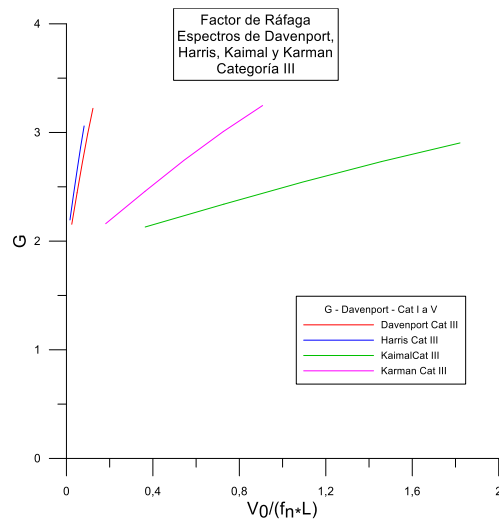


Figura 13. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ.III, todos los espectros y v_0

Factor de Respuestas de Ráfaga para Categoría IV

En la Tabla 8 se resumen los valores de G calculados para las diferentes hipótesis. En la Figura 14 se grafican estos resultados.

Tabla 8. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. IV, todos los espectros y v_0

Categoría IV								
V_0	Davenport		Harris		Kaimal		Karman	
	$V_0/f_n/L$	G	$V_0/f_n/L$	G	$V_0/f_n/L$	G	$V_0/f_n/L$	G
10	0,02	2,50	0,02	2,57	0,36	2,49	0,18	2,52
20	0,05	2,82	0,03	2,83	0,73	2,73	0,36	2,87
30	0,07	3,15	0,05	3,08	1,09	2,97	0,54	3,23
40	0,10	3,45	0,07	3,33	1,46	3,20	0,73	3,56
50	0,12	3,74	0,08	3,57	1,82	3,42	0,91	3,87

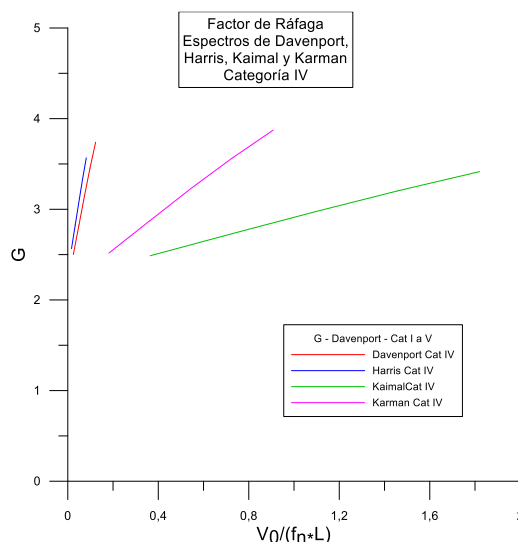


Figura 14. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. IV, todos los espectros y v_0

Se puede observar que cada curva tiene una variación aproximadamente lineal, además se observa que para $v_0=10\text{m/s}$, el valor de G para Harris se aleja un poco de los demás espectros que son aproximadamente iguales, sin embargo, para $v_0=50\text{m/s}$ se tiene una mayor dispersión, siendo el valor máximo para el espectro de Karman. No se aprecia mucha similitud entre algunos espectros.

Factor de Respuesta de Ráfaga para Categoría V

En la Tabla 9 se resumen los valores de G calculados para las diferentes hipótesis. En la Figura 15 se grafican estos resultados.

Se observa que cada curva tiene una variación aproximadamente lineal, además se observa que para $v_0=10\text{m/s}$, el valor de G para Harris se aleja un poco de los demás espectros que son aproximadamente iguales, sin embargo, para $v_0=50\text{m/s}$ se tiene una mayor dispersión, siendo el valor máximo para el espectro de Karman, que se aleja bastante de los demás espectros.

Tabla 9. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. V, todos los espectros y v_0

V_0	Categoría V							
	Davenport		Harris		Kaimal		Karman	
	$V_0/fn/L$	G	$V_0/fn/L$	G	$V_0/fn/L$	G	$V_0/fn/L$	G
10	0,02	2,87	0,02	2,98	0,36	2,88	0,18	2,89
20	0,05	3,17	0,03	3,22	0,73	3,13	0,36	3,25
30	0,07	3,48	0,05	3,47	1,09	3,37	0,54	3,62
40	0,10	3,78	0,07	3,71	1,46	3,61	0,73	3,99
50	0,12	4,07	0,08	3,94	1,82	3,84	0,91	4,34

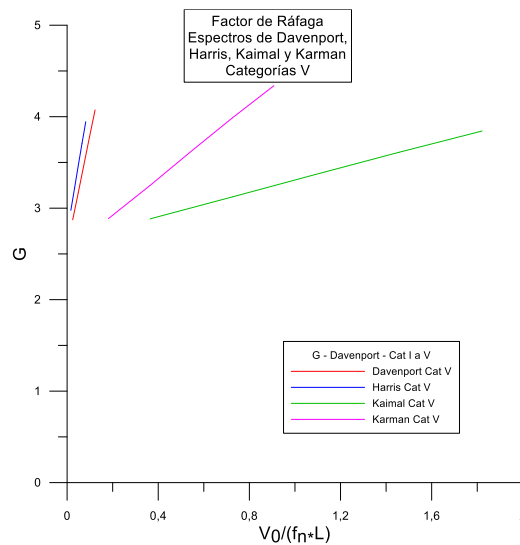


Figura 15. Factor de Respuesta de Ráfaga para Categ. V, todos los espectros y v_0

4.5 Fuerza media

En la Figura 16 se presenta la Fuerza Media en función a la altura z, que fue calculada para una velocidad básica de 50 m/s y Categoría del terreno igual a II. La fuerza media es la misma para todos los espectros considerados, puesto que su valor no depende del análisis espectral realizado. Se presentan unos quiebres en el inicio y fin de la curva debido al valor del área considerado para el primer y último elemento discretizado. La fuerza media permanece es la igual para los mismos valores de velocidad básica y la misma categoría de terreno.

4.6 Fuerza Fluctuante

En la Figura 17 se presentan las curvas de las fuerzas fluctuantes en función de z, que fueron calculadas para una velocidad básica de 50 m/s y Categoría del terreno igual a II (NBR 6123; 1988) para cuatro espectros de velocidad considerados. Se observa que las fuerzas varían desde cero hasta un valor máximo para la altura $z=81\text{(m)}$. Para todos los casos considerados, existe una variación que no supera $\pm 10\%$ con respecto al valor promedio de la fuerza fluctuante para los cuatro espectros.

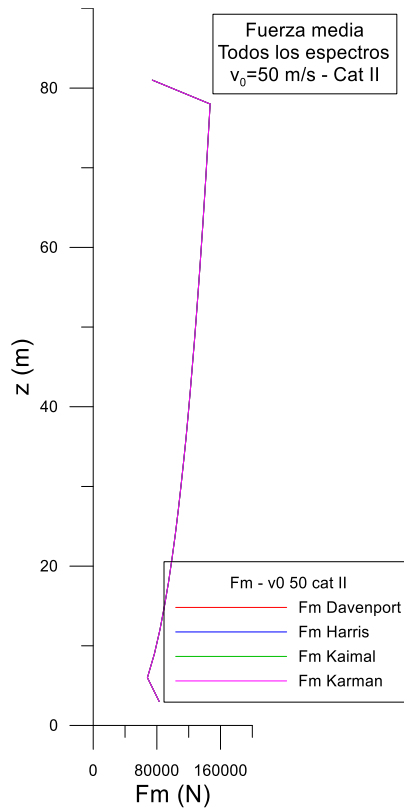


Figura 16. Fuerza Media para todos los espectros ($v_0=50$ m/s - Categoría II)

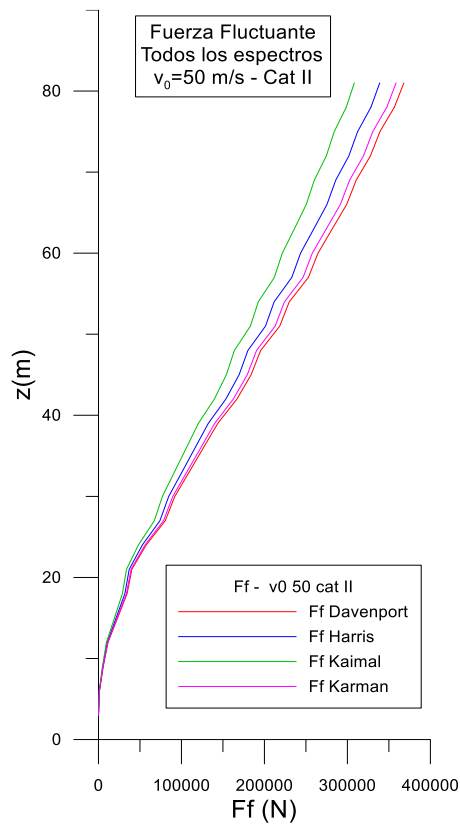


Figura 17. Fuerza Fluctuante para todos los espectros ($v_0=50$ m/s - Categoría II)

4.7 Fuerza Total

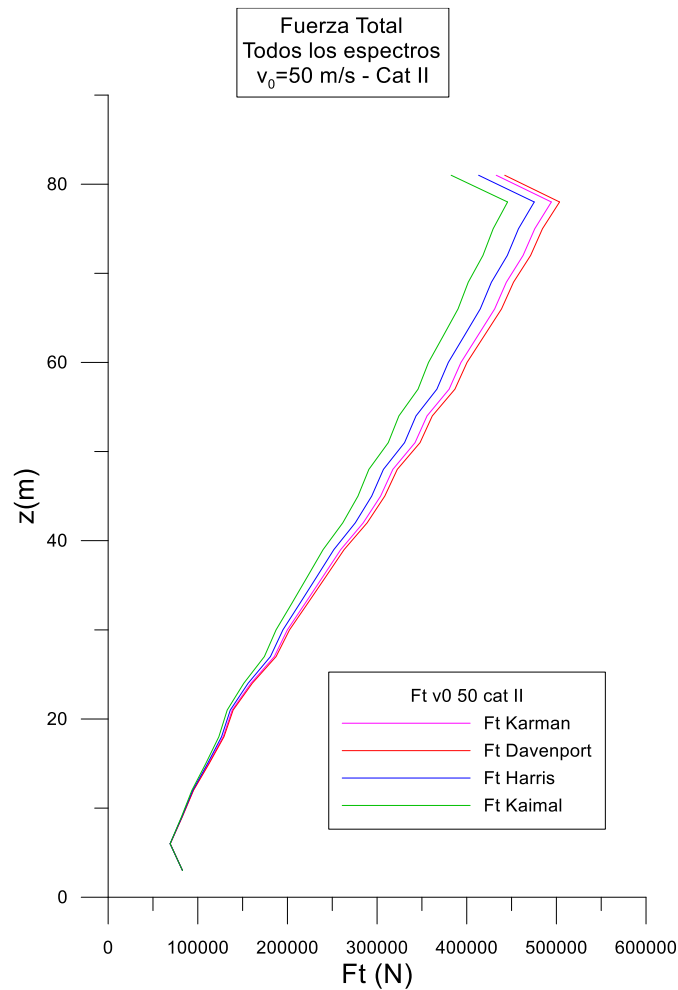


Figura 18. Fuerza Total para todos los espectros ($v_0=50$ m/s - Categoría II)

En la Figura 18 se presentan las curvas de las fuerzas totales en función de z , que corresponde a la suma de la fuerza media y la fuerza fluctuante. Se observa que las curvas tienen los mismos quiebres debidos a las áreas de exposición consideradas, y el gráfico ya no es continuo, pues presenta ligeros cambio de curvatura producto de la fuerza fluctuante. Para todos los casos considerados, existe una variación que no supera $\pm 7\%$ con respecto al valor promedio de las fuerzas totales para los cuatro espectros.

4.8 Fuerza Estática Equivalente

En la Figura 19 se presentan las curvas de las fuerzas estáticas equivalentes en función de z , que se obtiene del producto del Factor de Respuesta de Ráfaga G y la Fuerza Media. Como es de esperar, estas curvas siguen la misma forma que las correspondientes fuerzas medias, pues son directamente proporcionales a las mismos, para todos los casos considerados.

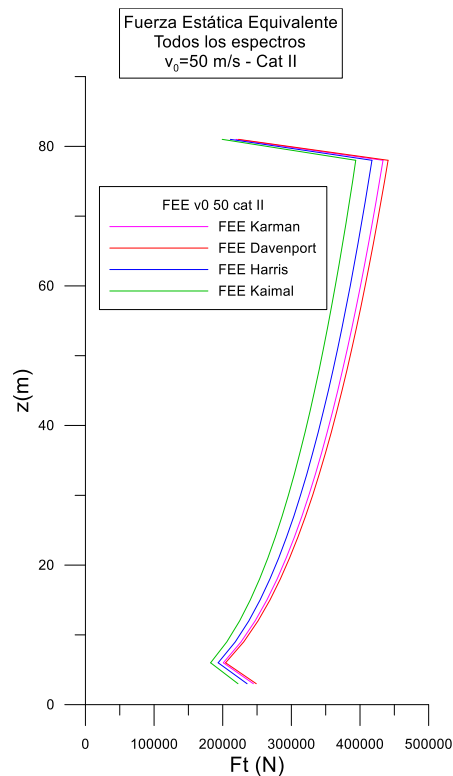


Figura 19. Fuerza Estática Equivalente para todos los espectros ($v_0=50\text{m/s}$ - Categoría II)

4.9 Fuerza Total vs Fuerza Estática Equivalente

En la Figura 20 se comparan las curvas de Fuerza Total y Fuerza Estática Equivalente, cada una para los espectros de Davenport, Harris, Kaimal y Karman, considerando $v_0=50\text{m/s}$ y categoría II de terreno. Se puede observar que todas las fuerzas totales calculadas por el método probabilístico de Davenport, para alturas bajas tiene menores valores que los de las fuerzas estáticas equivalentes, ambas fuerzas se igualan aproximadamente en la altura de $z=60$ (m), y luego pasan a ser ligeramente mayor las fuerzas totales.

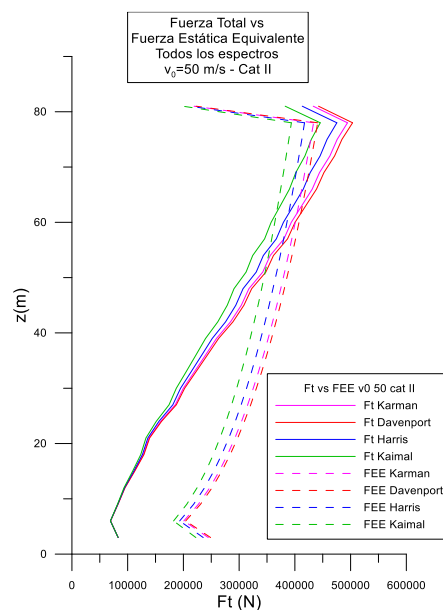


Figura 20. Fuerza Estática Equivalente vs Fuerza Total para todos los espectros ($v_0=50\text{m/s}$ - Categoría II)

5 Conclusiones

El objetivo principal del presente trabajo consistió en analizar las metodologías disponibles en la literatura para llevar en consideración la acción dinámica del viento en estructuras esbeltas. El análisis permitió realizar recomendaciones pertinentes para la elaboración de una futura propuesta de cálculo de la acción dinámica del viento en estructuras para la NP-196.

En este contexto fue analizado un edificio esbelto con una frecuencia fundamental de 0,339 Hz, que se encuentra dentro del intervalo de frecuencias susceptibles a la acción dinámica del viento (≤ 1 [Hz] según la NBR 6132, 1988). Fueron considerados cuatro espectros teóricos de la componente fluctuante del viento: Davenport (1961b), Harris (1970), Kaimal, et. al. (1972) y Von Kármán (1948). Posteriormente fue calculada la densidad espectral de la respuesta del edificio para cada uno de estos espectros variando diversos parámetros como la velocidad del viento y tipo de terreno (NBR 6123, 1988). Finalmente, los resultados fueron asociados con las metodologías simplificadas que utilizan las normativas y fueron destacadas las diferencias principales entre las diferentes metodologías y entre los diferentes espectros de la velocidad.

Con respecto a las funciones de densidad espectral de la velocidad fluctuante del viento, se observó que las curvas presentan gran variación (de aproximadamente 350 %), de un espectro a otro, dentro del intervalo [0 Hz-0,01 Hz]. Posteriormente sus valores convergen entre sí (para frecuencias superiores a 0,01 Hz) y tienden a ser nulos para valores de la frecuencia superiores a 1 Hz. En el diagrama que relaciona el espectro de velocidad fluctuante con la frecuencia, se observa que los diferentes espectros poseen valores descendentes con el aumento de la frecuencia. No obstante, el espectro propuesto por Davenport (1961b) presenta un aumento del espectro de velocidad con el aumento de frecuencia dentro del intervalo [0 Hz-0,01 Hz].

Los gráficos de los espectros de fuerzas varían de forma similar a los de los correspondientes espectros de velocidad. El espectro de Davenport (1961b) presentó los menores valores de este espectro, y el propuesto por Von Karman (1948) derivó en los mayores valores para frecuencias de hasta 0,01 Hz. Sin embargo, para frecuencias superiores a 0,01 Hz el espectro de Davenport (1961b) posee los valores máximos de la densidad espectral y el de Von Karman (1948) los valores mínimos. Para los espectros de Kaimal y Harris se tienen valores intermedios del espectro de la fuerza.

Como es de esperarse, la variación de la densidad espectral de la respuesta en la zona cuasi-estática es similar a la variación observada para el espectro de velocidad. En relación con la zona de resonancia, los valores pico para los diferentes espectros varían hasta un $\pm 22\%$ con relación al promedio de estos. Además, se resalta que los valores picos se producen para la frecuencia de 0,3388 Hz, que corresponde a la frecuencia resonante, que coincide con el valor esperado de la frecuencia natural de la estructura que es 0,3390 Hz.

Las fuerzas medias son iguales para todos los métodos, pues no dependen del análisis espectral realizado. Al comparar los valores obtenidos de las fuerzas fluctuantes, resultantes del análisis espectral realizado, se observa una variación máxima de $\pm 10\%$ con respecto al promedio de estos valores. La respuesta total varía en torno a $\pm 7\%$ con respecto al promedio de respuestas de todos los espectros. Este hecho puede responder al cuestionamiento de que, a pesar de la variabilidad de espectros encontrados empíricamente, el efecto que poseen en las estructuras es similar y, por tanto, válida la utilización del análisis probabilístico general. Esta afirmación responde a una de las interrogantes principales del presente trabajo. Más concretamente, se concluye que es posible utilizar cualquiera de estos espectros para calcular las fuerzas fluctuantes.

Comparando los valores del Factor de Respuesta de Ráfaga G para los diferentes espectros, si bien todos los espectros generan valores aproximadamente similares, se comprueba que el espectro de Von Karman genera mayores valores de G para categorías de terreno IV y V (categorías extraídas de la NBR 6123, 1988).

Para posible inclusión del análisis dinámico de la acción del viento en estructuras en la NP 196, se puede adoptar el método de Factor de Respuesta de Ráfaga, como aplica por ejemplo la ASCE 7-2016, cuya aplicación y determinación es más simple, pues obtenido el valor de G, por un método simplificado, se multiplica por la fuerza media y se obtiene la fuerza estática equivalente. Si bien el cálculo de las acciones es más simple por este método, tiende a ser conservador pues se utiliza un

mismo factor para amplificar los valores de la fuerza media. Se sugiere adoptar un método similar al establecido por la NBR 6123, pues éste permite el cálculo de la fuerza fluctuante para cada altura z , produciendo valores más próximos al análisis dinámico general. La desventaja de esta metodología es que su aplicación es revista de mayor complejidad que la aplicada por la ASCE 7-16.

Como los valores de la fuerza fluctuante obtenidos por los cuatro espectros fueron aproximados, se podría aplicar cualquiera de ellos para la inclusión del estudio dinámico en la NP 196, pero se sugiere la utilización del espectro de velocidad propuesto por Von Karman (1948), pues produjo valores mayores para el espectro de la fuerza fluctuantes para frecuencias hasta 0,01 Hz. Este hecho indica que la zona cuasi-estática del espectro de respuesta genera mayor influencia en el coeficiente de amplificación dinámica.

Agradecimientos

Gracias a todos los coautores y profesores con los que he podido disfrutar de la agradable experiencia de compartir horas de trabajo y que además han sido parte fundamental de todo el proceso.

Referencias

- [1] Reglamento CIRSOC 102-2005 “Acción del viento sobre las construcciones”. *Centro De Investigación De Los Reglamentos Nacionales De Seguridad Para Las Obras Civiles (CIRSOC). Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)*. Argentina.
- [2] NBR 6123 - Forças devidas ao vento em edificações. *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)*. (1988). Brasil.
- [3] Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. *American Society of Civil Engineers, S. E. ASCE/SEI 7-16* (2016). USA.
- [4] Loading for buildings. Part 2: Code of practice for wind loads. BS 6399-2:1997. *British Standard*.
- [5] Davenport, A. (1964). Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 28(2), 187-196.
- [6] Davenport, A. G. (1967). Gust Loading Factors. *Journal of the Structural Division*, 11-34.
- [7] Davenport, A. (1961). The Application of Statistical Concepts to the Wind Loading of Structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 449-472.
- [8] Karman, T. (1948). Progress in the statistical theory of turbulence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 34(11), 530-539.
- [9] Kaimal, J. C. (jul de 1972). Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98(417), 563-589.
- [10] Acción del Viento en las Construcciones Norma Paraguaya 196 (NP 196). Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología. INTN. (1991).
- [11] Cachuçó, F. (2014). Estudo da incerteza em estimativas de frequências naturais de vibração livre de edifícios altos em concreto armado. Porto Alegre. Brasil.
- [12] Blessman, J. (2013). O vento na engenharia estrutural. Porto Alegre, Brasil: UFRGS.