

ANALISIS DINAMICO DE ESTRUCTURAS SOMETIDAS A CARGAS ALEATORIAS DE VIENTO

Daniel Ambrosini, Rodolfo Danesi

*Laboratorio de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán, Casilla de Correo 134, 4000 Tucumán, Argentina*

RESUMEN

En este trabajo se propone un esquema eficiente para el análisis dinámico de estructuras tipo torre y/o atirantadas sometidas a carga aleatoria de viento. Para tal fin se utiliza un método de integración numérica en el dominio de la frecuencia. Como modelo de estructura se adoptó una formulación general de vigas con ley constitutiva viscoelástica lineal general. Además se utilizó el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT) para trabajar en el dominio de la frecuencia.

El viento en la atmósfera es un fluido con movimiento turbulento y, por lo tanto, es aconsejable considerarlo como un proceso aleatorio Gaussiano estacionario utilizando cantidades estadísticas. Pueden considerarse, por ejemplo, el valor esperado y la función de densidad espectral de potencia para caracterizar los dos primeros órdenes estadísticos de este proceso. Debido a esto, la carga de viento fue incorporada por un procedimiento de simulación de un proceso aleatorio estacionario, Gaussiano y correlacionado en sentido vertical. Finalmente, se presenta un ejemplo numérico de simulación para mostrar las capacidades del modelo propuesto.

ABSTRACT

An efficient scheme is proposed for the analysis of free-standing guyed structures subjected to random wind loading, by using a numerical integration method in the frequency domain. The physical model of the structure is based on a general beam formulation. In addition, a linear viscoelastic constitutive law was incorporated and the fast Fourier transform algorithm (FFT) was used in order to work in the frequency domain.

The wind is a fluid with turbulent motion and is commonly idealised as a stationary, correlated, Gaussian stochastic process. The mean value and the power spectral density function can be used as the first two statistical orders. Then, a simulation process was used to model the wind load. Finally, a numerical simulation example is presented in order to show the capabilities of the models proposed

INTRODUCCION

En el análisis dinámico de sistemas tipo torre y/o atirantadas han sido ampliamente usados los métodos de matrices de transferencia e integración numérica directa, los cuales están estrechamente vinculados entre sí. La principal diferencia entre ambos esquemas es que, en el segundo caso, se utiliza la integración numérica, vía Runge-Kutta o predictor-corrector, para la obtención de las matrices de transferencia de campo, mientras que, en el primer caso, cuando existen disponibles soluciones conocidas para las matrices de campo, el esquema es conocido como "método de matrices de transferencia"

Un procedimiento sistemático fue propuesto por Falk¹ y posteriormente fue desarrollado extensivamente por Kersten², Pflüger³ y Riera et al⁴, entre otros, realizaron aplicaciones para los casos de inestabilidad estática como así también consideraciones sobre los efectos de segundo orden. La determinación de frecuencias naturales y modos de vibración de vigas continuas no amortiguadas fue discutida en detalle por Pestel and Leckie⁵ que también describieron el cálculo de la respuesta dinámica ante excitación armónica. Ebner and Billington⁶ emplearon integración numérica para estudiar las vibraciones estacionarias de vigas de Timoshenko amortiguadas. En la literatura pueden encontrarse numerosas aplicaciones relacionadas con vigas rectas y curvas como así también arcos y cáscaras.

El método presentado en este trabajo puede ser utilizado para el estudio de diferentes tipologías estructurales como las presentadas en diversos trabajos, por ejemplo, edificios esbeltos^{7, 8}, chimeneas^{9, 10}, torres de aeropuerto¹¹, torres de enfriamiento¹², torres de TV y teléfono¹³, como así también para el análisis de puentes bajo la acción de viento.

El objetivo principal es la extensión del método para la evaluación de la respuesta estructural ante excitación aleatoria de viento. Prenninger and Schuëller¹⁴ aplicaron matrices de transferencia para estudiar la confiabilidad de edificios altos bajo carga de viento, pero siguiendo el método clásico de determinar la función de densidad espectral de potencia (PSDF) de variables seleccionadas de la respuesta de funciones de admitancia previamente calculadas. Aunque la idea básica es también aplicable para elementos finitos y diferencias finitas y para otros tipos de cargas estocásticas, el método presentado es particularmente adecuado en combinación con técnicas de integración numérica o matrices de transferencia.

MODELO DE ESTRUCTURA

Para modelar la estructura se utilizó una formulación de continuo partiendo de un esquema de análisis de estructuras de pared delgada y sección abierta en el dominio de la frecuencia Ambrosini¹⁵, el cual se describirá brevemente.

El modelo físico de la estructura está constituido por las ecuaciones de la teoría de Vlasov¹⁶ modificadas con la incorporación de las deformaciones angulares inducidas por el esfuerzo de corte, sección variable en la dirección longitudinal e inercias rotacionales en los esfuerzos internos (Ambrosini et al¹⁷). Se adopta una ley constitutiva viscoelástica lineal general, la cual permite introducir amortiguamiento a la estructura. Con estos elementos se llega a un conjunto de tres ecuaciones diferenciales parciales de cuarto orden con tres incógnitas o, luego de realizar la transformada de Fourier para trabajar en el dominio de la frecuencia, un sistema equivalente en variables de estado de doce ecuaciones diferenciales parciales de primer orden con 12 incógnitas. Si se adoptan como variables de estado los desplazamientos según los ejes x e y , ξ y η , los giros de flexión respecto de esos ejes, ϕ_x y ϕ_y ; los esfuerzos de corte Q_x y Q_y ; los momentos flectores M_x y M_y ; el giro de torsión y su derivada espacial θ y θ' , el momento torsor total M_T y el bimomento B ; se tiene:

$$\mathbf{v}(z, \omega) = \{\eta, \phi_y, Q_y, M_x, \xi, \phi_x, Q_x, M_y, \theta, \theta', M_T, B\}^T \quad (1)$$

Con \mathbf{v} = vector de estado. El sistema es:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \mathbf{A} \mathbf{v} + \mathbf{q} \quad (2)$$

Donde \mathbf{A} es la matriz del sistema y \mathbf{q} el vector de carga externa:

$$\mathbf{q}(z, \omega) = \{0, 0, -q_x, 0, 0, 0, -q_y, 0, 0, 0, -m_A, 0\}^T \quad (3)$$

q_x y q_y son cargas externas por unidad de longitud y m_A el momento torsor externo por unidad de longitud. Debe aclararse que, por comodidad, se ha mantenido la notación de las deformaciones y esfuerzos generalizados en el

dominio de la frecuencia, aunque estas funciones son dependientes de z y ω y no de z y t como las variables originales.

Si, para facilitar la solución numérica, se separan la parte real e imaginaria de todas las funciones y se incorpora la ley constitutiva viscoelástica, el sistema será de 24 ecuaciones con 24 incógnitas.

Obviamente, en aplicaciones numéricas se utiliza el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT). Entonces, para cada frecuencia ω , puede resolverse el problema definido por las ecuaciones (2) más la condiciones de contorno usando métodos de integración numérica estándares como así también técnicas para transformar un problema de valores de borde en dos puntos en un problema de valores iniciales (Pestel y Leckie⁵). Si se repite este procedimiento para todo el conjunto de frecuencias ω , se puede obtener la FFT de las componentes del vector de estado. Por último, puede realizarse la transformada inversa de las variables de interés para obtener las mismas en el dominio del tiempo.

DETERMINACION DEL VECTOR DE CARGA

La consideración de la carga de viento como un proceso estocástico aleatorio estacionario y la obtención de registros de viento por simulación fue presentada por Riera y Ambrosini¹⁸ y Ambrosini et al¹⁹ en trabajos previos y los desarrollos básicos son resumidos en los siguientes puntos.

Carga aleatoria estacionaria

La carga de viento es idealizada comúnmente como un proceso estocástico Gaussiano estacionario correlacionado. Si ahora se supone que la coordenada espacial z denota altura sobre el nivel del suelo y que solo una componente del vector de carga tiene que ser especificado. La componente longitudinal (de la parte fluctuante) de la velocidad de viento será considerada como un ejemplo. Puede verse más adelante que el procedimiento puede ser extendido sin dificultad a situaciones más generales.

La componente de interés de la velocidad es definida por su PSDF $S_v(\omega)$, la cual está relacionada con las partes real $\text{Re}(\omega)$ e imaginaria $\text{Im}(\omega)$ de la transformada de Fourier de la carga (Se realiza la hipótesis usual de que la parte fluctuante de la presión es directamente proporcional de la parte fluctuante de la velocidad) por medio de:

$$S_v(\omega) = E[\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)] \quad (4)$$

En donde $E(\)$ denota valor esperado. Además, como será discutido en la siguiente sección, la correlación espacial de la velocidad (carga) debe ser especificada. En este punto debe notarse que la ecuación (4) sugiere una alternativa atractiva para la generación de registros de viento artificiales para el diseño estructural. Teniendo en cuenta el hecho que si la parte fluctuante de la velocidad de viento es Gaussiana, entonces las partes real e imaginaria de su transformada de Fourier también serán variables Gaussianas, por lo que:

$$\text{Re}(\omega) = N[0, 0.5 S_v] \quad (5)$$

$$\text{Im}(\omega) = N[0, 0.5 S_v] \quad (6)$$

La notación N indica una variable normal. En este caso, estas variables Re e Im tienen media cero y desvío estándar $0.5 S_v$. Por lo tanto, el procedimiento recomendado por Prenninger²⁰ para la generación de registros de viento artificiales es adoptada en lo subsiguiente. La idea es extremadamente simple: si se pueden especificar por simulación las componentes del vector de carga en la ecuación (2), entonces la FFT de la todas las variables de la respuesta pueden obtenerse inmediatamente.

El espectro de potencia de cualquier variable deseada, por ejemplo el desplazamiento en la parte superior de la estructura o los momentos en la base, están dados por la suma de los cuadrados de los valores de la parte real e imaginaria de la respectiva FFT. Tal espectro de potencia será un estimador crudo de la PSDF. Para evaluar esta

última, serán necesarias varias simulaciones en orden de estimar la función de densidad espectral de potencia (PSDF) con confianza. Sin embargo, en aplicaciones prácticas, todo lo que se necesita es la varianza de la variable de respuesta v . Esta es dada por:

$$\sigma_v^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_v(\omega) d\omega \quad (7)$$

Obviamente, la variabilidad de σ_v^2 es mucho menor que la del integrando. Esto puede visualizarse claramente al notar que, para propósitos computacionales, la integral de la ecuación (7) es reemplazada por una suma finita en el rango de las frecuencias de interés. Debido a que, normalmente se toma un número de términos grande, la varianza de la suma, representada por el valor estimado σ_v^2 , es mucho menor que los valores individuales de $S_v(\omega)$. Por lo tanto, para caracterizar adecuadamente la respuesta aleatoria de la estructura son necesarias muy pocas simulaciones. Raramente serán necesarias más que tres simulaciones. Es importante remarcar que, en los estudios en túnel de viento, el valor cuadrático medio de cualquier variable es solamente medido una vez. En el mejor de los casos, el experimento es repetido de 3 a 5 veces; práctica que es compatible con el criterio propuesto.

Generación de registros de viento

El tratamiento de la correlación espacial será descrito en el marco de un ejemplo de registro de viento generado artificialmente. Debe notarse que la ecuación (2) requiere la especificación del vector de carga transformado en el plano espacio-frecuencia ($z-\omega$).

Los pasos para cada frecuencia ω_j son:

- Seleccionar la frecuencia máxima o de corte y el número de puntos en el que el intervalo será dividido. En general, $N \geq 256$
- Generar una muestra de una variable con distribución de probabilidad uniforme en el intervalo $[0, 1]$
- Transformar la muestra obtenida en (b) a una variable con distribución normal con media 0 y desvío estándar X_n .
- Obtener las componentes deseadas de la FFT de la velocidad de viento por medio de:

$$X = X_n(0.5S_v(\omega_j))^{1/2} \quad (8)$$

Para caracterizar el viento se utiliza el espectro de Davenport²¹ $S_v(f)$ dado por:

$$\frac{fS_v(f)}{\sigma_v^2} = \frac{2}{3} \frac{n^2}{(1+n^2)^{4/3}} \quad (9)$$

donde f es la frecuencia en Hertz, y:

$$n = \frac{fL_0}{V_{10}} \quad (10)$$

$$\sigma_v^2 = IV_{10}^2 \quad (11)$$

donde V_{10} es la velocidad media a la altura de referencia de 10 m, I el coeficiente de variación (0.10 a 0.18) que representa la intensidad de la turbulencia y $L_0 = 1200$ m según medidas empíricas de Davenport. A modo de ejemplo, el espectro generado considerando $V_{10} = 20$ m/seg, $I = 0.15$, $\Delta t = 0.04$ seg y $\Delta f = 0.006$ Hz, es graficado en Figura 1.

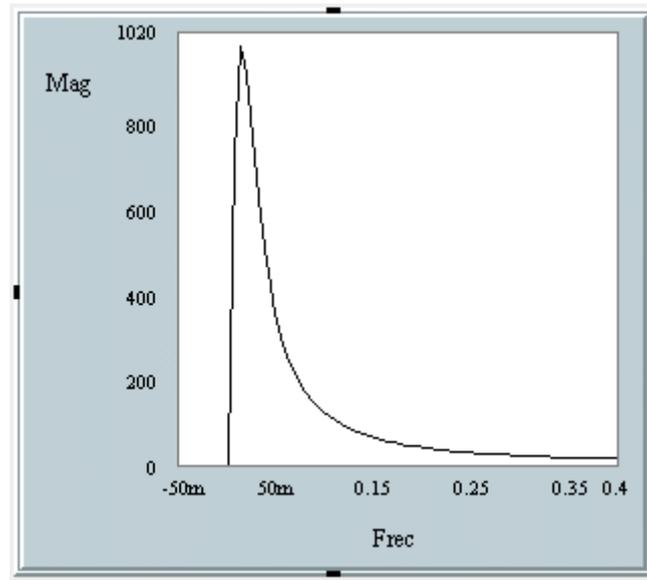


Figura 1: Espectro de Davenport

Los pasos esquematizados en (a) a (d) conducen a la FFT de las muestras independientes de la velocidad del viento. Por otra parte, la expresión para la “longitud de correlación” propuesta por Davenport²² fue utilizada para tener en cuenta la correlación espacial. La longitud de correlación L_c es definida como el área bajo la curva de correlación.

$$L_c(\omega) = \int_0^{\infty} \exp\left(\frac{C_1 \omega x}{2\pi V_{10}}\right) dx \tag{12}$$

Mediciones del parámetro C_1 para la correlación vertical son debidas, entre otros, a Shiotani and Iwatani²³. Debe notarse que:

$$L_c(\omega) = \frac{2\pi V_{10}}{C_1 \omega} \tag{13}$$

Considerando ahora la variable

$$x = \frac{a_1 u_1 + a_2 u_2}{(a_1^2 + a_2^2)^{1/2}} \tag{14}$$

En la cual u_1 y u_2 son variables aleatorias independientes normales con $a_1 = 1 - \xi$, $a_2 = \xi$ y $\xi = \Delta z / L_c$, siendo Δz la distancia entre los puntos a los cuales u_1 y u_2 son simulados. El coeficiente de correlación normalizado resulta:

$$\rho_{u_1 u_2} = 1 - \xi \tag{15}$$

Teniendo en cuenta la escasa y contradictoria evidencia experimental sobre la correlación espacial de la parte fluctuante del movimiento turbulento del viento, en la ecuación (14) se da un coeficiente lineal $\rho_{u_1 u_2}$. Entonces, para cada frecuencia ω_j , se genera un proceso u_1 al comienzo del intervalo ($z = 0$). Luego, se genera un proceso independiente u_2 en $z = L_c$. Las ordenadas de la FFT para $0 \leq z \leq L_c$ son evaluadas utilizando la ecuación (13). La dependencia de la altura de la velocidad media del viento puede ser descrita por la conocida ley de Hellmann²⁴:

$$V(z) = V_{10} \left(\frac{z}{10}\right)^\alpha \tag{16}$$

Vector de carga

En este punto, serán determinadas las componentes del vector de carga (3). La fuerza del viento F_w que actúa sobre una estructura es:

$$F_w(z,t) = 1/2\rho_a A C V(z,t)^2 \quad (17)$$

en donde ρ_a es la densidad del aire, A el área expuesta al viento y C el coeficiente de arrastre. La velocidad de viento $V(z,t)$ está dada por:

$$V(z,t) = V(z) + \Delta v(t) - \dot{x}(t) \quad (18)$$

en donde $V(z)$ es el flujo estático, la turbulencia $\Delta v(t)$ es un proceso Gaussiano estacionario con media cero, simulado de acuerdo al método descrito precedentemente, mientras que $\dot{x}(t)$ es la velocidad estructural. Esta velocidad es despreciada en la mayoría de los casos, puesto que se supone que la estructura es rígida. Con esta simplificación y reemplazando (18) en (17), se obtiene:

$$F_w(z,t) = 1/2\rho_a A C [V(z)^2 + 2V(z)\Delta v(t) + \Delta v(t)^2] \quad (19)$$

El miembro derecho de (19) constituye la excitación efectiva que es no lineal y, por lo tanto no Gaussiana, aún si $\Delta v(t)$ es Gaussiana. Para encontrar la respuesta a esta excitación, en la práctica ingenieril se utiliza la llamada "teoría cuasi-estática" de Davenport²⁵, por la cual:

$$F_w(z,t) \approx 1/2\rho_a A C [V(z)^2 + 2V(z)\Delta v(t)] \quad (20)$$

Puede observarse que este procedimiento es una linealización estadística aplicada a la excitación (Floris²⁴). Entonces, la carga por unidad de longitud $q(z,t)$ es:

$$q(z,t) = 1/2\rho_a b C [V(z)^2 + 2V(z)\Delta v(t)] \quad (21)$$

en donde b es la dimensión estructural perpendicular al viento. Finalmente, las componentes del vector de carga (3) son:

$$q_x(z,t) = 1/2\rho_a b C_x [V(z)^2 + 2V(z)\Delta v(t)] \quad (22)$$

$$q_y(z,t) = 1/2\rho_a b C_y [V(z)^2 + 2V(z)\Delta v(t)] \quad (23)$$

$$m_A(z,t) = 1/2\rho_a b^2 C_T [V(z)^2 + 2V(z)\Delta v(t)] \quad (24)$$

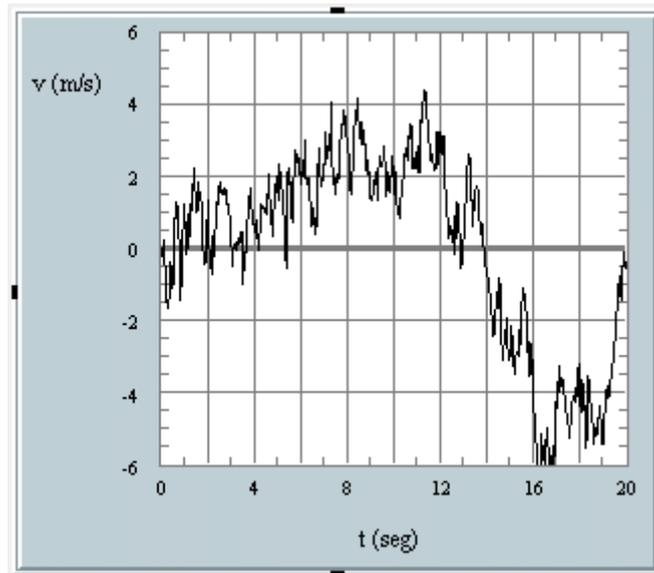
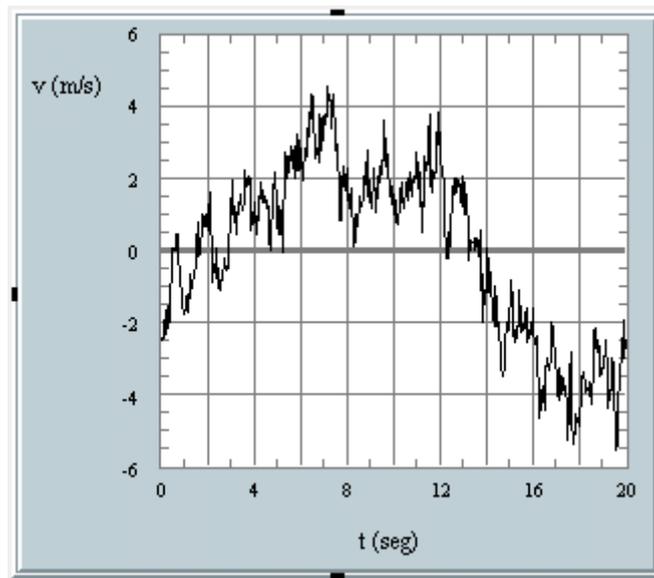
APLICACION DEL METODO

Con el objetivo de resaltar las características del método de simulación, se presenta a continuación un ejemplo numérico. Con este propósito se desarrolló el programa RAN que tiene incorporado el proceso de simulación descrito en los párrafos anteriores. En este ejemplo se usan los siguientes datos:

$H = 50$ m	$V_{10} = 20$ m/seg
$\Delta t = 0.04$ seg	$T_{total} = 20.48$ seg.
$\Delta f = 0.049$ Hz	$f_{max} = 25$ Hz
$I = 0.15$	$C_I = 5$

El proceso de generación de números aleatorios requiere de una "semilla" o número inicial para dar comienzo al mismo. En este caso, la semilla es $IY = 25$.

Las velocidades obtenidas para los casos de $z = 0, 0.05H, 0.95 H$ y H son graficadas en figuras 2 a 5.

Figura 2: Velocidades de viento simuladas. $z = 0$ Figura 3: Velocidades de viento simuladas. $z = 0.05 H$

Se observa claramente en las figuras 2 y 3 que las velocidades de viento correspondientes a $z = 0$ y $z = 0.05 H$ están claramente correlacionadas, especialmente en lo que hace a las frecuencias más bajas. Esto mismo sucede con las velocidades presentadas en las figuras 4 y 5 que corresponden a $z = 0.95 H$ y $z = H$. Por último, se observa en las figuras 2 a 5 que no hay ninguna relación entre las velocidades obtenidas entre el extremo inferior de la estructura ($z = 0$ y $z = 0.05 H$) con las correspondientes al extremo superior de la misma ($z = 0.95 H$ y $z = H$).

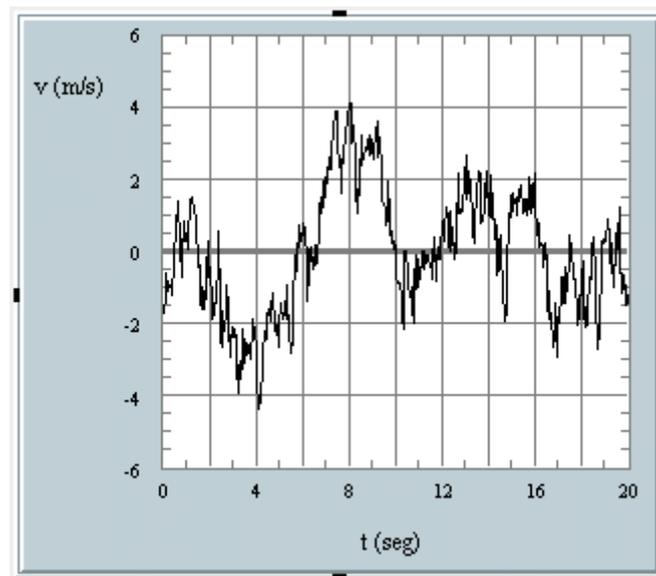


Figura 4: Velocidades de viento simuladas. $z = 0.95 H$

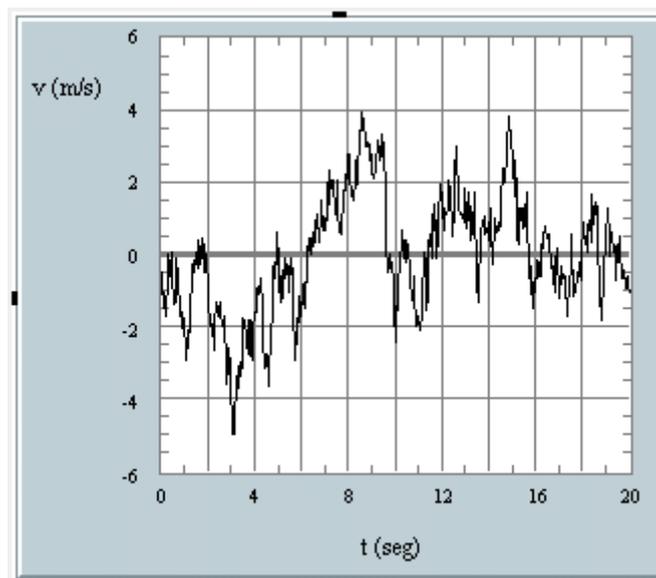


Figura 5: Velocidades de viento simuladas. $z = H$

Otros ejemplos con la determinación de la carga y su aplicación efectiva en estructuras pueden encontrarse en los trabajos de Ambrosini et al¹⁹ y Montanaro et al²⁵.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un método para emplear métodos de integración numérica o, alternativamente, el método de matrices de transferencia para analizar estructuras tipo torre o atirantadas sujetas a cargas aleatorias de viento.

Este esquema ofrece varias ventajas comparativas en relación con otras alternativas: En primer lugar permite la consideración de cualquier tipo de modelo constitutivo viscoelástico lineal, como así también cualquier distribución espacial de las fuerzas disipativas. Además, no es necesario imponer restricciones sobre el carácter y la correlación de la carga aplicada.

El ejemplo numérico demuestra la versatilidad y confiabilidad del método, sobre todo en lo que hace a la correlación espacial.

AGRADECIMIENTOS

Se agradecen las invalorable sugerencias y comentarios del Prof. Jorge Riera (Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil) y el apoyo financiero del CONICET y de la Universidad Nacional de Tucumán.

REFERENCIAS

- [1] S. Falk, Biegen, Knicken und Schwingen des Mehrfeldrigen geraden Balkens, Abhandlungen der Braunschweig'schen Wissenschaft-lichen Gesellschaft, Band VII, 1955.
- [2] R. Kersten, Das Reduktionsverfahren der Baustatic, 2 Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1984.
- [3] A. Pflüger, Stabilitätsprobleme der Elastostaik, Springer-Verlag, Berlin, 1964.
- [4] J.D: Riera, J.C. Reimundín and R.O. Cudmani, Análisis de estructuras de barras considerando el efecto de fuerzas axiales y deformaciones por corte, Informe Técnico, Inst. de Ing. Civil, Univ. Nac. De Tucumán, Argentina, 1971.
- [5] E. Pestel and F. Leckie, Matrix Methods in Elastomechanics, McGraw-Hill, NY, 1963.
- [6] A.M. Ebner and D. Billington, Steady State Vibrations of Damped Timoshenko Beams. Journal of the Structural Division, ASCE, pp .737-760, 1968.
- [7] K. Ohtake, Y. Mataka, T. Ohkuma, J. Kanda and H. Kitamura, Full-scale Measurements of Wind Actions on Chiba Port Tower, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp. 2225-2236, 1992.
- [8] Y.L. Xu, K.C.S. Kwok and B. Samali, Control of wind-induced tall building vibration by tuned mass dampers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 40, pp. 1-32, 1992.
- [9] J.L. Waldeck, The measured and predicted response of a 300 m concrete chimney, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp. 229-240, 1992
- [10] Th. Galemann and H. Ruscheweyh, Measurements of wind induced vibrations of a full-scale steel chimney, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp. 221-252, 1992.
- [11] Y. Tamura, R. Kohsaka, O. Nakamura, K. Miyashita and V. Modi, Wind-induced responses of an airport tower – efficiency of tuned liquid damper, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 65, pp. 121-131, 1996.
- [12] T.F. Sun, Z.F. Gu, L.M. Zhou, P.H. Li and G.L. Cai, Full-scale measurements and wind-tunnel testing of wind loading on two neighboring cooling towers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp. 2213-2224, 1992.
- [13] U. Peil and H. Nölle, Guyed Mast under Wind Load, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp. 2129-2140, 1992
- [14] P.H. Preninger and G.I. Schuëller, Reliability of tall buildings under wind excitation considering coupled modes and soil-structure interaction, Probabilistic Engng. Mech., 4(1) pp. 19-31, 1992.
- [15] R.D. Ambrosini, Análisis Dinámico de Estructuras de Pared Delgada y Sección Abierta en el Dominio de la Frecuencia, Tesis de Magister en Ingeniería Estructural, Universidad Nacional de Tucumán, 1991.

- [16] V. Vlasov, *Thin-walled Elastic Beams*, Israel Program for Scientific Translations, 2ed. Jerusalem. 1963
- [17] R.D. Ambrosini, J.D. Riera and R.F. Danesi, Dynamic Analysis of Thin-Walled and Variable Open Section Beams with Shear Flexibility, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 38(17) pp. 2867-2885, 1995.
- [18] J.D. Riera and R.D. Ambrosini, Analysis of structures subjected to random loading using the transfer matrix or numerical integration methods, *Engineering Structures*, 14(3), pp. 176-179, 1992.
- [19] R.D. Ambrosini, J.D. Riera and R.F. Danesi, Analysis of Structures Subjected to Random Wind Loading, Jubileum Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, WEBS 98, Gramado, Brasil, Vol II, pag. 101-108, 1998.
- [20] P.H. Preninger, Generation of wind records considering the statistical properties of wind spectra, *Z. Angew. Math. Mech.*, 68(1), pp. 334-336, 1988.
- [21] A.G. Davenport, The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, *J. Roy Meteorol. Soc.*, 87, pp.199-211, 1961.
- [22] A.G. Davenport, The dependence of wind loads upon meteorological parameters, *Proc. Int. Seminar Wind Effects on Buildings and Structures*, University of Toronto Press, Toronto, pp.19-82, 1992.
- [23] M. Shiotani and Y. Iwatani, Correlation of wind velocity in relation to the gust loading, *Proc. 3rd Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures*, Saikon Tokyo, 1978.
- [24] G. Hellmann, Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre, *Meteorol. Zeit.*, 34, S.273, 1916.
- [26] A.G. Davenport, The application of statistical concepts to the wind loading of structures, *Proc. Inst. Civ. Engrs.*, 19, pp.449-461, 1961.
- [27] C. Floris, Equivalent Gaussian Process in Stochastic Dynamics with Application to Along-Wind Response of Structures, *Int. Journal of Non-Linear Mechanics*, 31(5), pp. 779-794, 1996.
- [28] M.I. Montanaro, R.D. Ambrosini, R.F. Danesi, Análisis Computacional de Sistemas de Control Pasivo de Vibraciones, Congreso de Mecánica Computacional, MECOM99, Mendoza, Septiembre de 1999. En prensa.