

Elements for numerical simulation of wind time series

Elementos para la simulación numérica de series temporales de velocidad de viento

I. Fernández ^{1*}, V. Elena Parnás *

* Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). CUBA

Fecha de Recepción: 13/12/2016

Fecha de Aceptación: 22/02/2017

PAG 85-92

Abstract

Dynamic characteristics of structures determine the methods to be used for their analysis and design against environmental loads such as wind. In some structures, the effect of the energy contained in gusts sequences must be attended, emphasizing the fluctuating components of the gusts that resonate with them. In these cases, dynamic methods in time domain are frequently used. Numerical simulation of wind loads is a tool that has been widely developed and applied. The aim of this study is to perform a literature review to determine the necessary parameters for simulating wind time series as well as the existing numerical methods for this purpose, emphasizing in tropical cyclone-prone region.

Keywords: Wind velocity, mean velocity, turbulence, numerical simulation, time history series

Resumen

Las características dinámicas de las tipologías estructurales determinan los métodos que deben emplearse para el análisis y diseño ante cargas ecológicas como el viento. En algunas estructuras, el efecto de la energía contenida en secuencias de ráfagas debe ser atendido, fundamentalmente los componentes fluctuantes de las ráfagas que entran en resonancia con ellas. Frente a estos casos los métodos dinámicos en el dominio del tiempo son empleados con frecuencia. La simulación numérica para generar las series temporales de velocidad que serán procesadas como cargas en las estructuras, es una herramienta que ha tenido amplia evolución y aplicación. El objetivo de este estudio es realizar un análisis bibliográfico para determinar los parámetros del viento necesarios, con énfasis en las zonas propensas a la ocurrencia de huracanes, para la simulación de las series temporales así como los métodos numéricos existentes.

Palabras clave: Velocidad de viento, componente media, turbulencia, métodos simulación numérica, series temporales

1. Introducción

El viento puede verse representado de acuerdo a sus movimientos en dos escalas diferentes de tiempo: 1) los movimientos relacionados con las variaciones de los sistemas climáticos planetarios y 2) las ráfagas. Este comportamiento fue explicado por Van der Hoven (1957), quien identificó dos fases dentro del espectro de potencia del viento. La primera fase está asociada con el primer y mayor pico dentro del espectro, al que denomina pico macro o meso-meteorológico que muestra una concentración de energía por un período aproximado de cuatro días, correspondiendo con el tiempo de tránsito típico de un sistema climático plenamente desarrollado. El segundo pico importante, micro-meteorológico, contiene energías con periodicidades del orden de 1 min hasta décimas de segundos y es causado por turbulencias generadas por los efectos topográficos: rugosidad del terreno u obstáculos alrededor del sitio.

El rango de frecuencia entre los dos picos carece de energía, y es conocido como brecha espectral. La mayor significación de esa brecha es que posibilita que el viento pueda ser representado en términos de una velocidad media dependiente de la altura sobre el nivel del terreno, que refleja solo las variaciones sinópticas, con la superposición de fluctuaciones en las tres direcciones y dependientes del tiempo, las llamadas ráfagas.

El tipo de estructura a analizar, determina también la forma en la que se va a asignar esa carga sobre la misma, ya sea como una fuerza estática o como una fuerza dinámica dependiente del tiempo, dada la naturaleza fluctuante de la acción y por consiguiente de la respuesta. Algunas estructuras, responden mucho menos a la intensidad de una ráfaga individual que a la energía contenida en secuencias de ráfagas, en particular ante aquellos componentes fluctuantes de las ráfagas que entran en resonancia con ellas. Es por esto que para el análisis y diseño de esos tipos estructurales, métodos dinámicos en el dominio del tiempo o de la frecuencia son los recomendados, y para aquellos que tengan además comportamiento no lineal pronunciado, el dominio del tiempo es más fiable.

¹ Autor de correspondencia:

Ingeniera Civil del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). Máster en Reducción de Desastres, Mención estructural CUJAE. Actual estudiante de doctorado. Profesora del departamento de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil del CUJAE
E-mail: ingridf@civil.cujae.edu.cu



La simulación numérica de series temporales sintéticas es una herramienta que ha tenido amplia evolución y aplicación en la generación de funciones temporales de viento que puedan ser aplicadas posteriormente como carga en las estructuras. Para la simulación, las dos componentes del viento, media y fluctuante, tienen que ser estudiadas, y definidos sus elementos con especial atención para reflejar de forma certera los movimientos a gran y pequeña escala del viento. El objetivo de este trabajo es conformar una base de referencia teórica para la determinación de los parámetros y métodos de simulación de series temporales de velocidad de viento diferenciados de acuerdo a las dos componentes, con énfasis en zonas propensas al paso de huracanes.

1.1 Componente media de la velocidad del viento. Perfiles verticales

La componente media de la velocidad del viento, está condicionada fundamentalmente por la temperatura y las interacciones friccionales que se establecen con el terreno producto de la rugosidad y la orografía, que intentan retardar el flujo formando un perfil vertical.

Existen varios modelos analíticos para describir el perfil vertical de velocidades, los tres más conocidos y empleados son: la ley logarítmica, la potencial y el modelo de Deaves y Harris. De acuerdo a Tamura y Kareem (2013), la ley logarítmica es el modelo más adecuado para regímenes de fuertes vientos; sin embargo presenta algunas complicaciones matemáticas que los ingenieros a fines prácticos prefieren obviar haciendo uso de la ley potencial. Estudios realizados por Yaojun et al. (2010), donde comparan la normativa China con un total de 15 códigos y normas de diseño ante cargas de viento de varios países de la región nombrada por ellos como economías "Asia-Pacífico", reafirman que la ley potencial es preferida al ser empleada por el 87% de los códigos estudiados (Canadá, China, Hong Kong, India, Indonesia, Japón, Korea, Malasia, Filipinas, Taiwan, Tailandia, Estados Unidos y Vietnam).

El ajuste del comportamiento del viento medio a los perfiles anteriores en zonas propensas al paso de ciclones tropicales ha sido estudiado. Entre los cuestionamientos principales de la comunidad científica ha estado la comparación de los perfiles cerca de la pared del ojo del ciclón con los de las regiones exteriores del vórtice central del mismo. En 2009, Vickery et al. (2009), estudiaron esta dependencia radial determinando que en las zonas bajas cercanas al nivel del terreno (sobre los 100 m), la variación de la velocidad media del viento es aproximadamente logarítmica y a medida que se aumenta en altura, la aplicabilidad de la ley logarítmica se rompe y las velocidades del viento comienzan a disminuir, observándose un comportamiento similar en las zonas interiores y exteriores del vórtice ciclónico. Los autores proponen un nuevo modelo empírico reconociendo que se ajusta de forma de adecuada para la superficie marina, pero recomiendan ampliar los estudios para su aplicación tierra adentro. En 2012 y 2013, Giammanco et al. (2012) y Giammanco et al. (2013), obtienen resultados ajustables en gran medida a los de Vickery et al. (2009). Tamura et al. (2012), estudian los perfiles verticales durante el paso del tifón Maemi por Japón, llegando a la conclusión de que la variación con la altura de la velocidad media del viento en la regiones cercanas a la superficie puede ser obtenida mediante la ley logarítmica o potencial clásicas, y ratifican que no se encontraron

diferencias significativas en las características del perfil en la región interna o externa del centro del tifón. Teniendo como base las investigaciones de Vickery et al. (2009); Giammanco et al. (2012); Giammanco y Schoeder (2013) y Tse et al. (2013), emplean la ley de potencia, la ley logarítmica y el perfil empírico obtenido por Vickery et al. (2009), para ajustar los perfiles medios de tifones observados desde el 2007 hasta el 2009 en Hong Kong en promedios de 1 h y 10 min. De acuerdo a sus resultados, no recomiendan utilizar la ley empírica de Vickery et al. (2009) para promedios en 10 min y alturas superiores a los 300 m, por el contrario tanto la ley de potencia como la logarítmica dieron resultados adecuados para estas mismas condiciones.

1.2 Componente fluctuante de la velocidad del viento

La turbulencia atmosférica $\vec{V}_t(x, y, z, t)$, es un proceso estocástico tri-variante $(3V)(u, v, w)$ y cuatro-dimensional $(4D)(x, y, z, t)$. Usualmente se asume como un campo aleatorio estacionario, de media cero, con comportamiento gaussiano y dependiente del tiempo, en esta revisión ese comportamiento es el aceptado. Se puede asumir que las componentes estocásticas (u, v, w) son estadísticamente independientes una de otra, cambiando de un proceso $3V - 4D$ hacia $3(1V - 4D)$. A través de la discretización del dominio espacial en N puntos, locaciones donde el viento actúa en la estructura, cada componente de la turbulencia (u, v, w) puede ser vista como un vector estocástico. Cada vector componente es un campo estocástico $(1V - 1D)$ (representando una de las componentes de la velocidad fluctuante del viento en una locación específica, dependiente del parámetro determinístico t , que está correlacionado con las otras componentes del mismo vector). Mediante esta forma se puede cambiar de un proceso $1V - 4D$ a tres procesos $NV - 1D$, cada uno correspondiente a una de las componentes espaciales de la turbulencia. Esta forma conduce a un modelo simplificado donde se desestima cualquier vínculo con otro punto cercano al que fue considerado; siendo más correcto tomar en consideración la distribución espacial del campo de viento, desde una caracterización probabilística completa del campo estocástico alcanzada con el empleo de la forma compleja de la función de potencia de densidad espectral (CPSD, siglas en inglés). Generalmente para determinar la respuesta longitudinal dinámica de estructuras frente a la acción del viento las componentes ortogonales a la dirección del fluido (x) pueden ser despreciadas, quedando expresada la CPSD para dos puntos situados sobre el plano perpendicular a la acción del viento $(y - z)$ mediante la Fórmula 1, suponiendo que la parte imaginaria del espectro cruzado es despreciable (Ubertini y Giuliano, 2010).

$$S_{u_1 u_2}(\omega) = \sqrt{S_{u_1}(\omega) S_{u_2}(\omega)} \exp(-f_{12}(\omega)) \quad (1)$$

$\exp(-f_{12}(\omega))$, es la función de coherencia, la cual cuantifica la correlación cruzada de componentes análogas de la turbulencia, en diferentes puntos del campo estocástico.

Una de las alternativas de formulación para $f_{12}(\omega)$ puede ser obtenida mediante la Fórmula 2 (Cottone y Di Paola, 2011; Huang et al., 2013; Koulatsou et al., 2013).

$$f_{12}(\omega) = + \frac{n \sqrt{k_y^2 \eta^2 + k_z^2 \xi^2}}{[(\bar{u}(z_1) + \bar{u}(z_2))]} \quad (2)$$

Donde $n = \frac{\omega}{2\pi}$, $\eta = y_1 - y_2$, $\xi = z_1 - z_2$, \bar{u} es la velocidad media y k_y y k_z son coeficientes de decaimiento determinados experimentalmente (Di Paola y Gullo, 2001). Estos últimos, son diferentes para cada componente de la turbulencia y dependen de varios factores como: la altura, la rugosidad de la superficie, la estabilidad atmosférica, entre otros. De acuerdo a Chen et al. (2014), los factores

normalmente oscilan entre 7 y 20, y según Xu et al. (2014) están entre 6 y 26. Solari y Piccardo (2001) analizan 39 fuentes bibliográficas para estudiar la variabilidad de los coeficientes de decaimiento y sobre las mismas llegan a la tabla resumen 1 para las distintas direcciones de acción del viento y componentes de la velocidad turbulenta.

Tabla 1. Coeficientes propuestos por Solari y Piccardo (2011). x, y, z, direcciones: longitudinal, transversal o lateral y vertical de la acción del viento

	k_{xu}	k_{xv}	k_{xw}	k_{yu}	k_{yv}	k_{yw}	k_{zu}	k_{zv}	k_{zw}
k	3.0	3.0	0.5	10.0	6.5	6.5	10.0	6.5	3.0

Con relación a estos coeficientes en las regiones propensas al paso de huracanes existen algunos trabajos basados en mediciones de campo. El estudio de Tamura et al. (2012) es uno de ellos, mostrando valores que no difieren en gran medida a los propuestos por Solari y Piccardo (2001).

De la Fórmula 1, $S_{u_1}(\omega)$ y $S_{u_2}(\omega)$ son las funciones de densidad espectral determinadas en cada punto. Para ellas existen diferentes fórmulas matemáticas empleadas en la meteorología e ingeniería de viento.

En 1948, von Kármán (1948), como resultado de una extensa experimentación desarrollada en túnel de viento con flujo de aire turbulento de régimen isotrópico y homogéneo, propuso la primera fórmula reconocida para $S_u(\omega)$, Fórmula 3, enunciada específicamente para la componente longitudinal de las fluctuaciones.

$$S_u(\omega) = \frac{4\sigma_u^2 f L_u / z}{n[1+70.8(f L_u / z)^2]^{5/6}} \quad (3)$$

Donde $f = \frac{nz}{\bar{u}}$, siendo z la altura medida desde el terreno al punto, L_u la escala integral de la componente u de la turbulencia, σ_u^2 la varianza de la componentey u_*^2 el cuadrado de la velocidad de fricción.

A partir de la expresión de von Kármán, han surgido otras derivadas. El espectro de Davenport (1961), el de Kaimal et al. (1972) y el propuesto por Solari y Piccardo (2001) son ejemplos de esto. De ellos, los espectros de Solari y Piccardo (Ciampoli et al., 2011; Cottone y Di Paola, 2011; Ubertini y Giuliano, 2010), Kaimal (Hernandez et al., 2013; Li et al., 2011; Pinheiro, 2010) y von Kármán (An, Quan, & Gu, 2012; Fu, Wu, Xu, Li, & Xiao, 2012; Q. S. Li, Lunhai Zhi, & Fei Hu, 2010) son los que más comúnmente emplea la comunidad científica internacional. El espectro de von Kármán, es el que utilizan la normativa de Australia y Nueva Zelanda (AS/NZS1170.2-2011, 2011) y la normativa internacional ISO (International Organization for Standardization, 2009) y de acuerdo a Tamura y Kareem (2013), y avalado por un grupo de trabajos resultados del monitoreo de estructuras sometidas a la acción de huracanes (Fu et al., 2012; Li et al., 2010; Tamura et al., 2012), este espectro es la representación más adecuada para la descripción de la turbulencia del viento durante el paso de ese tipo de tormentas.

1.3 Parámetros de la turbulencia asociados al espectro

Del espectro de la Fórmula 3 se derivan algunos

parámetros que merecen particular estudio debido a la discrepancia bibliográfica que existe para sus determinaciones. Estos parámetros son fundamentalmente: la escala integral y la intensidad de turbulencia, definiendo para esta última los términos varianza, velocidad de fricción y factor de intensidad de turbulencia.

La escala integral o longitud de turbulencia, L_u , define la posición del contenido espectral de la turbulencia. Es una medida del tamaño promedio de los vórtices en el fluido dentro de la capa límite atmosférica. Depende fundamentalmente de la longitud de rugosidad, Z_o , de la altura desde el terreno z , de la velocidad media, \bar{u} , y de los parámetros de Coriolis que son dependientes de la latitud del sitio de observación (WMO, 2010). La Z_o es la altura respecto al suelo donde la velocidad de viento es teóricamente cero cuando se asume logarítmico el perfil. Existen dos tipos de enfoques para determinar este parámetro dentro de la capa límite atmosférica (Li et al., 2015; Li et al., 2010): 1) los métodos morfométricos, que utilizan las características de la superficie para determinar la rugosidad y 2) los métodos micro-meteorológicos. En el trabajo de Li et al. (2015), se realiza una revisión de algunos de los principales trabajos de cada uno de estos métodos.

Para obtener L_u existen varias vías que pueden ser consultadas en la bibliografía (Li et al., 2012; Wang et al., 2011). Solari y Piccardo (2001), basado en el estudio de alrededor de 20 fuentes bibliográficas, proponen la Fórmula 4 para determinar la escala integral de la turbulencia. La Fórmula 4 ha sido empleada por varios autores que reconocen su validez (Carassale y Solari, 2006; Cottone y Di Paola, 2011; Torrielli, 2011).

$$L_u = 300(z/200)^v \text{ con } v = 0.67 + 0.05 \ln(z_o) \quad (4)$$

Existen algunos trabajos donde obtienen L_u a partir de mediciones de campo en presencia de tifones (Shiau, 2000; Tamura et al., 2012; Wang et al., 2011). Los mismos registran que las L_u aumentan con el incremento de la velocidad media siendo mayores que las escalas integrales para las restantes componentes de la turbulencia.

De acuerdo a un estudio de Li et al. (2015), las L_u son mayores en los tifones que en los huracanes, asociando esos resultados a que las cuencas y latitudes de génesis de los tifones y huracanes son una fuente potencial de variaciones. En el citado artículo se hace una comparación entre los valores medidos experimentalmente y los resultados de aplicar la formulación propuesta por la normativa



estadounidense ASCE (ASCE7-10, 2010), dada por la Fórmula 5.

$$L_u = l(z/10)\bar{\epsilon} \quad (5)$$

Siendo l , igual a 97.54, 152.4 y 198.12 y $\bar{\epsilon}$ igual a 1/3, 1/5 y 1/8 para las categorías de exposición B, C y D respectivamente. Concluyen que la formulación de la ASCE presenta buenas aproximaciones para velocidades inferiores a 25 m/s y que subestima el valor de acuerdo a las mediciones reales cuando la velocidad es superior a los 30 m/s.

El código de Japón AIJ-RLB del 2004 recomienda emplear la Fórmula 6 para determinar la escala integral (Fu et al., 2012; Li et al., 2010).

$$L_u = 100(z/30)^{0.5} \quad (6)$$

De acuerdo al trabajo de Li et al. (2010) donde se hace una comparación entre los resultados de hallar la L_u de las mediciones en el campo de una estructura instrumentada en la ciudad de Beijing y las formulaciones empíricas propuesta por AIJ-RLB (6) y ASCE (5), es válido aplicar la formulación ofrecida por la AIJ-RLB pues ofrece buenos ajustes. Otro es el criterio de An et al. (2012) y Fu et al. (2012) quienes concluyen que la expresión del código japonés no ofrece buenas aproximaciones de la escala de la turbulencia en comparación con las mediciones realizadas durante el paso del tifón Muifa y el tifón Megi por las ciudades chinas de Shanghai y Guangzhou, respectivamente.

Algunas formulaciones propuestas por cuatro de los principales código de viento además del japonés y el estadounidense se resumen en la Tabla 2.

La varianza de la componente longitudinal de la turbulencia, $\sigma_u^2 = \beta u_*^2$ donde β es un coeficiente adimensional denominado factor de intensidad de turbulencia, depende de los mismos parámetros que la escala integral. Para su obtención los términos factor de intensidad de turbulencia y velocidad de fricción deben ser especificados.

De acuerdo al estudio de un amplio número de trabajos, que Solari y Piccardo (2001) citan de Bietry, Sacré y Simiu de 1978, los primeros proponen la Fórmula 7 para determinar el valor del factor de intensidad de turbulencia en el sentido longitudinal del viento, la que ha sido adoptada como válida en varias investigaciones publicadas (Ciampoli et al., 2011; Cottone y Di Paola, 2011; Ubertini y Giuliano, 2010).

$$\beta_u = 6 - 1.1 \arctan(\ln(z_o) + 1.75) \quad (7)$$

Durante el paso de ciclones tropicales, la mezcla turbulenta es fuerte, lo que conduce a mayores factores de intensidad de turbulencia. Li et al. (2012) proponen la Fórmula 8 para calcular el factor β , obtenido de mediciones sobre el tifón Hagupit, que afectó la costa sur de China en el año 2008. En ese artículo se realiza una comparación con los resultados de Masters et al. (2010), concluyendo que ambos estudios presentan buena concordancia.

$$\beta_u = 2.74 - 0.17 \ln(z_o) \quad (8)$$

En otro artículo más actualizado Li et al. (2015), haciendo uso de un mayor número de huracanes proponen un mejor ajuste de la Fórmula 8, resultando la Fórmula 9.

$$\beta_u = 2.72 - 0.25 \ln(z_o) \quad (9)$$

En cuanto a la determinación de u_* , velocidad de fricción, dos enfoques son frecuentemente empleados: 1) extrapolaciones a partir del perfil logarítmico 2) la expresión $u_*^2 = \sqrt{u'v'^2 + w'u'^2}$ que está basada en el intercambio turbulento de cantidad de movimiento (Li et al., 2015; Wang et al., 2011). Este segundo método puede ser empleado cuando se tiene mediciones de anemómetros que registren en las tres direcciones.

Sobre la intensidad de turbulencia, $I = \sigma_u/\bar{u}$, puede percibirse que la misma tiende a disminuir a medida que la velocidad media aumenta, y en regiones propensas al paso de huracanes, hay una tendencia a que sea mayor que en las regiones extra-tropicales.

Fu et al. (2012) en el estudio de los resultados de la instrumentación de una edificación en Guangzhou, China, durante el paso del tifón Megi concluyen respecto a la intensidad de turbulencia que los valores obtenidos están en concordancia con los que resultan de aplicar el modelo de Solari y Piccardo (2001) para determinar la varianza, al igual que resultados de Li et al. (2010) sobre observaciones desarrolladas en Beijing.

En el trabajo de Li et al. (2015) se compara la intensidad de turbulencia obtenida experimentalmente durante el paso de tifones y huracanes, con la expresión que propone el ASCE (ASCE7-10, 2010) dada por la Fórmula 10.

$$I_u = c(10/z)^{(1/6)} \quad (10)$$

Tabla 2. Formulaciones para la escala integral de la turbulencia de acuerdo a algunas normativas

Código	Expresión
India (IWC, 2012)	$L_u = 100(z/10)^{0.25}$
Australia y Nueva Zelanda (AS/NZS1170.2-2011, 2011)	$L_u = 85(z/10)^{0.25}$
Norma Internacional (International Organization for Standardization, 2009)	$L_u = 100(z/30)^{0.5}$
Eurodódigo 1. Wind Actions (EN1991-1-4, 2004)	$L_u = 300(z/200)^{(0.67 + 0.05 \ln(z_o))}$

Donde c es 0.30, 0.20 y 0.15 para las categorías de exposición B, C y D de esa normativa. De la comparación concluyen que el ASCE (ASCE7-10, 2010) ofrece buenas aproximaciones para una altura de hasta 60 m sobre el terreno para las categorías D y C, mientras que para B sobreestima el valor. Estos resultados difieren de los obtenidos por el trabajo previo de Li et al. (2010) donde se comparan las mediciones a escala real con los valores empíricos resultantes del empleo de las formulaciones propuestas por el ASCE (10) y el AIJ-RLB (11). La comparación fue realizada para la categoría de terreno B, según el ASCE y a partir de una altura de 47 m sobre el nivel del terreno.

$$I_u = 0.1(Z_g/z)^{\alpha+0.05} \quad (11)$$

α es 0.27 para un terreno urbano.

Los autores de ese estudio concluyeron que los valores experimentales no se ajustaron propiamente a ninguno de los perfiles empíricos de los códigos ASCE o AIJ-RLB, no siendo válida la aplicación de los mismos para estructuras altas.

1.4 Simulación de series temporales de velocidad de viento para procesos gaussianos

Existen varios métodos de simulación para la generación de campos estocásticos estacionarios con comportamiento gaussiano, las redes neuronales (Wu y Kareem, 2011) y la transformación de ondas (Benowitz y Deodatis, 2015), son alternativas que están siendo aplicadas; sin embargo los métodos más utilizados pueden clasificarse de acuerdo al esquema de la Figura 1.

Los modelos (AR) y (MA) son casos particulares de los (ARMA) (Rossi et al., 2004). El trabajo de Samaras et al. (1985) es uno de los pioneros en introducir el empleo de los modelos (ARMA). Especial uso de estos métodos se percibe en modelaciones de estructuras complejas y dominios de simulación grandes (Di Paola y Gullo, 2001; Li y Li, 2012; Rossi et al., 2004). Una extensión de los modelos (ARMA) son los (ARIMA), empleados fundamentalmente en los casos de comportamiento no estacionario de las series de viento. La principal fortaleza de los (ARIMA) radica en la capacidad de revelar las interdependencias temporales en las series (Zhang y Moore, 2015).

El segundo de los enfoques tradicionales es utilizar la superposición de funciones trigonométricas con ángulos de fase aleatoria, "métodos de representación espectral". Las ideas básicas tienen sus orígenes en los años 50 (Chen et al., 2014), pero su implementación en la dinámica estructural comenzó a estudiarse a partir de la década del 70, con Shinozuka y Jan (1972) como precursores. Estos autores desarrollaron sus fórmulas de simulación con posibilidad de ser aplicadas para procesos estocásticos incluyendo casos multi-variables, multi-dimensionales y no estacionarios; pero cuando el número de variables a considerar aumentaba se tornaba ineficiente computacionalmente. En aras de mejorar la eficiencia computacional, Yang (1972) introduce en 1972, que la suma de las funciones trigonométricas puede llevarse a cabo mediante el empleo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT, siglas en inglés) y propone una fórmula para simular la envolvente de los procesos. En 1996 Deodatis (1996) desarrolló un algoritmo que mejoró las fórmulas de simulación establecidas por Shinozuka, pues garantizó la generación de series ergódicas optimizando la implementación de la FFT. El uso de la FFT, sin embargo, aumenta la demanda de almacenamiento informático que es un problema particular para las simulaciones de procesos multi-

variables y multi-dimensionales que exigen tiempos largos de procesamiento de datos (Chen et al., 2014; Li et al., 2015); por lo que para mejorar la eficiencia computacional han surgido técnicas que requieren de la descomposición de la matriz espectral de potencia XPSD (siglas en inglés).

El concepto de la descomposición de la XPSD, fue introducido por Li y Kareem (1991) en la década del 90 para la simulación de procesos estacionarios aleatorios, y con posibilidad de aplicación en procesos aleatorios multivariados y no estacionarios (Li y Kareem, 1997). Dos técnicas de descomposición son empleadas fundamentalmente: 1) la descomposición de Cholesky y 2) el procedimiento de descomposición modal POD (siglas relativas a Proper Orthogonal Decomposition) (Chen et al., 2014; Ubertini y Giuliano, 2010).

El procedimiento mejorado, resultado de los estudios combinados de Shinozuka y Jan (1972) y Deodatis (1996), hace empleo de la descomposición de Cholesky de la matriz espectral de potencia.

Solari et al. (2007) hacen una revisión del uso de la POD. De acuerdo a ese trabajo, el empleo en la dinámica estructural comenzó en la década del 80. En la aplicación de esta técnica, los trabajos de Di Paola y Gullo (2001) y Carassale y Solari (2006) son algunos de los más citados por la comunidad científica.

Existen algunos trabajos que hacen uso de estas técnicas en un mismo problema para establecer una comparación en cuanto a precisión de los resultados y eficiencia computacional. Ubertini y Giuliano (2010) realizan dos ejemplos numéricos. En el primero simulan el campo de viento para estudiar el comportamiento de una torre (en 9 nodos) de un puente colgante, para este caso evalúa la eficiencia del modelo AR, del método de Shinozuka y Deodatis, y de la POD con las mejoras que proponen Carassale y Solari (2006). El segundo ejemplo consiste en la simulación del campo de viento para el puente completo (83 nodos), solamente utilizando el modelo AR y la POD. Concluyen que el método de Shinozuka y Deodatis, es el más preciso, pero demanda, de acuerdo al primer ejemplo, 10 veces más memoria de cómputo y demora aproximadamente 8 veces más. Para este primer caso, las variaciones de los otros dos métodos no fueron significativas entre ellos. En cuanto al segundo concluyen que la POD es más precisa y eficiente computacionalmente en cuanto a tiempo, pero el AR consume 5 veces menos memoria de cómputo.

En concordancia con estos resultados se identifica un grupo de autores que para el análisis de estructuras flexibles como torres y edificios altos (Serrano et al., 2014), torres de transmisión (Mercanti et al., 2011; Zhang et al., 2013a; Zhang et al., 2013b) o torres atirantadas (Bu et al., 2012; Clobes y Peil, 2011; Gani y Légeron, 2010) prefieren emplear el método de representación espectral, vía descomposición de Cholesky; mientras cuando se necesita simular campos de viento extensos en correspondencia con estructuras como puentes colgantes o atirantados técnicas como la POD (Carassale y Solari, 2006; Huang y Yang, 2011) o los modelos de filtros lineales (Proppe y Zhang, 2015) son seleccionados.

Teniendo como base los métodos presentados, se han desarrollado varios trabajos que los perfeccionan (Chen et al., 2014; Guoqing Huang et al., 2013; J. Li et al., 2011) o combinan. De esta última variante son ejemplos los artículos de Huang (Huang, 2015; Huang, 2014) para simular procesos no estacionarios.



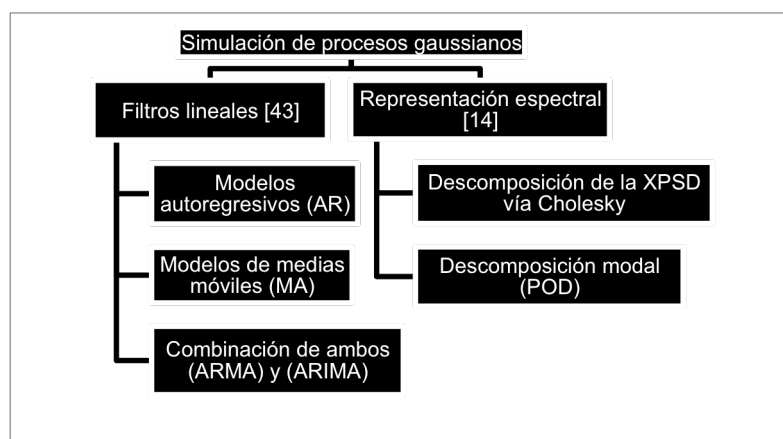


Figura 1. Esquema de métodos más empleados para la simulación de procesos gaussianos

2. Conclusiones

Del estudio bibliográfico para la simulación de series temporales de velocidad de viento se concluye sobre los perfiles verticales de velocidad media del viento que, tanto la ley de potencia como la logarítmica pueden ser empleadas para simular el comportamiento de la componente media de la velocidad del viento bajo condiciones de tormenta. Respecto a las formulaciones para obtener el espectro, la expresión de von Kármán es aparentemente la más adecuada para la descripción de la turbulencia del viento durante el paso de tormentas fuertes como son los huracanes. Debido a la dispersión de criterios en cuanto determinación de la escala de la turbulencia, se propone emplear el modelo de Solari y Piccardo (2001) y respecto al parámetro factor de intensidad de turbulencia, se propone hacer una comparación entre la aplicación de la Fórmula 7 y 9.

En cuanto a los métodos de generación sintética de

series temporales de velocidad de viento se concluye que los métodos de filtrado digital para la generación de series temporales de viento, no requieren de grandes memorias de almacenaje a diferencia de aquellos que emplean la FFT pero son menos precisos que el método de representación espectral. De los dos principales procedimientos de descomposición de la XPSD, en el método de representación espectral: la descomposición de Cholesky conduce a mayores costos computacionales en memoria y tiempo; pero es más preciso en la predicción de la respuesta inducida por el viento siendo importante este aspecto en el análisis de estructuras flexibles y altamente no lineales como las torres de líneas de transmisión, puentes y torres atirantadas. El método de descomposición modal, POD, es adecuado utilizarlo cuando se necesita densificar la discretización del campo de velocidades.

3. Referencias

- An Y., Quan Y. y Gu, M. (2012), Field Measurement of Wind Characteristics of Typhoon Muifa on the Shanghai World Financial Center. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 11. doi: 10.1155/2012/893739
- AS/NZS1170.2-2011. (2011), Australian/New Zealand Standard: Structural Design actions, Part 2: Wind Actions.
- ASCE7-10. (2010), American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.
- Benowitz B. A. y Deodatis, G. (2015). Simulation of wind velocities on long span structures: A novel stochastic wave based model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 147, 154-163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2015.10.004>
- Bu J. Q., Law S. y Zhu X. (2012), Time-varying Wind Speed Identification from Structural Responses by Modified Iterative Method. Journal of Civil Engineering and Construction, 1(1).
- Carassale L. y Solari G. (2006), Monte Carlo simulation of wind velocity fields on complex structures. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94(5), 323-339, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2006.01.004>
- Chen N., Li Y. y Xiang H. (2014), A new simulation algorithm of multivariate short-term stochastic wind velocity field based on inverse fast Fourier transform. Engineering Structures, 80, 251-259, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.09.012>
- Ciampoli M., Petrini F. y Augusti G. (2011), Performance-based wind engineering: towards a general procedure. Structural Safety, 33(6), 367-378, <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.07.001>
- Clobes M. y Peil U. (2011), Unsteady buffeting wind loads in the time domain and their effect on the life-cycle prediction of guyed masts. Structure and Infrastructure Engineering, 7(1-2), 187-196, <http://dx.doi.org/10.1080/15732471003588783>
- Cottone G. y Di Paola M. (2011), Fractional spectral moments for digital simulation of multivariate wind velocity fields. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99(6-7), 741-747, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2011.03.006>
- Davenport A. G. (1961), The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Q.J.R. Meteorol. Soc., 87, 194-211, <http://dx.doi.org/10.1002/qj.49708737208>
- Deodatis G. (1996), Simulation of Ergodic Multivariate Stochastic Processes. Journal of Engineering Mechanics, 122(8), 778-787, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1996\)122:8\(778\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1996)122:8(778))

- Di Paola M. y Gullo, I. (2001)**, Digital generation of multivariate wind field processes. Probabilistic Engineering Mechanics, 16(1), [http://dx.doi.org/1-10.1016/S0266-8920\(99\)00032-6](http://dx.doi.org/1-10.1016/S0266-8920(99)00032-6)
- EN1991-1-4. (2004)**, Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions.
- Fu J.Y., Wu J.R., Xu A., Li Q. S. y Xiao Y. Q. (2012)**, Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower. Engineering Structures 35, 120-139, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.022>
- Gani F. y Légeron F. (2010)**, Dynamic response of transmission lines guyed towers under wind loading. Canadian Journal of Civil Engineering, 37(3), 450-465, <http://dx.doi.org/10.1139/l09-160>
- Giammanco I. M., Schroeder J. L. y Powell M. D. (2012)**, Observed characteristics of tropical cyclone vertical wind profiles. Wind and Structures, 15(1), 65-86, <http://dx.doi.org/10.12989/was.2012.15.1.065>
- Giammanco I. M. y Schroeder J. L. (2013)**, GPS Dropwindsonde and WSR-88D Observations of Tropical Cyclone Vertical Wind Profiles and Their Characteristics. Weather and Forecasting, 28(1), 77-99, <http://dx.doi.org/10.1175/WAF-D-11-00155.1>
- Hernandez E. M., Bernal D. y Caracoglia L. (2013)**, On-line monitoring of wind-induced stresses and fatigue damage in instrumented structures. Structural Control and Health Monitoring, 20(10), 1291-1302, <http://dx.doi.org/10.1002/stc.1536>
- Huang G. (2015)**, Application of Proper Orthogonal Decomposition in Fast Fourier Transform—Assisted Multivariate Nonstationary Process Simulation. Journal of Engineering Mechanics, 141(7), 04015015, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000923](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000923)
- Huang G. (2014)**, An efficient simulation approach for multivariate nonstationary process: Hybrid of wavelet and spectral representation method. Probabilistic Engineering Mechanics, 37, 74-83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.probengmech.2014.06.001>
- Huang G., Liao H. y Li M. (2013)**, New formulation of Cholesky decomposition and applications in stochastic simulation. Probabilistic Engineering Mechanics, 34, 40-47, <http://dx.doi.org/10.1016/j.probengmech.2013.04.003>
- Huang Y. F. y Yang J. X. (2011)**, Simulation of Wind Field on Long-Span Cable-Stayed Bridge Based on SPT. Applied Mechanics and Materials, 90-93, 2451-2455, <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.90-93.2451>
- ISO 4354. (2009)**, Wind action on structures. Geneva. Switzerland.
- IWC, Indian Wind Code (2012)**, Wind Loads on Buildings and Structures - Proposed draft & Commentary. Document No: IITK GSDMA-Wind 02-V 50 IS: 875 (Part 3). India.
- Kaimal J. C., Wyngaard J. C., Izumi Y. y Coté O. R. (1972)**, Spectral characteristics of surface layer turbulence. Quart J Roy Meteorol Soc, 98, 563-589. Available in: http://www.planta.cn/forum/files_planta/spectral_characteristics_of_surface_layer_turbulence_412.pdf
- Koulatsou K., Petrini F., Vernardos S. y Gantes C. J. (2013)**, Artificial Time Histories of Wind Actions For Structural Analysis of Wind Turbines. Paper presented at the 2nd International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, Epoka University, Tirana, Albania. Available in: <http://ecs.epoka.edu.al/index.php/bccce/bccce2013/paper/viewFile/419/315>
- Li J. y Li C. (2012)**, Simulation of non-Gaussian stochastic process with target power spectral density and lower-order moments. Journal of Engineering Mechanics, 138(5), 391-404, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000349](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000349)
- Li J., Li C. y Chen S. (2011)**, Spline-Interpolation-Based FFT Approach to Fast Simulation of Multivariate Stochastic Processes. Mathematical Problems in Engineering, 2011, 24, <http://dx.doi.org/10.1155/2011/842183>
- Li J., Li C., He L. y Shen J. (2015)**, Extended modulating functions for simulation of wind velocities with weak and strong nonstationarity. Renewable Energy, 83, 384-397, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.044>
- Li L., Kareem A., Xiao Y., Song L. y Zhou C. (2015)**, A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 140, 49-66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.008>
- Li L., Xiao Y., Kareem A., Song L. y Qin P. (2012)**, Modeling typhoon wind power spectra near sea surface based on measurements in the South China sea. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 104-106, 565-576, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2012.04.005>
- Li Q. S., Zhi L. y Hu F. (2010)**, Boundary layer wind structure from observations on a 325 m tower. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98(12), 818-832, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.08.001>
- Li Y. y Kareem A. (1997)**, Simulation of Multivariate Nonstationary Random Processes: Hybrid DFT and Digital Filtering Approach. Journal of Engineering Mechanics, 123(12), 1302-1310, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:12\(1302\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:12(1302))
- Li Y. y Kareem A. (1991)**, Simulation of Multivariate Nonstationary Random Processes by FFT. Journal of Engineering Mechanics, 117(5), 1037-1058, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:5\(1037\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:5(1037))
- Masters F. J., Tieleman H. W. y Balderrama J. A. (2010)**, Surface wind measurements in three Gulf Coast hurricanes of 2005. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98(10-11), 533-547, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.04.003>
- Mercanti J. A., Pizzutti H. D., Aguirre M. A., Fank P. Y. y Möller O. (2011)**, Acción del viento como proceso estocástico aplicado a líneas de transmisión de energía eléctrica. Mecánica Computacional, 30(35). Available in: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/3945/3862>
- Pinheiro M. A. S. (2010)**, Simulação numérica da ação de vento turbulento considerando correlação espacial. Paper presented at the Proceedings of the 9th Brazilian Conference on Dynamics Control and their Applications. Serra Negra, SP, Brazil. Available in: <http://www.sbmec.org.br/dincon/trabalhos/PDF/methods/69117.pdf>
- Proppe C. y Zhang X. (2015)**, Influence of Uncertainties on Crosswind Stability of Vehicles. Procedia IUTAM, 13, 98-107, <http://dx.doi.org/10.1016/j.piutam.2015.01.006>
- Rossi R., Lazzari M. y Vitaliani R. (2004)**, Wind field simulation for structural engineering purposes. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 61(5), 738-763, <http://dx.doi.org/10.1002/nme.1083>
- Samaras E., Shinzuka M. y Tsurui A. (1985)**, ARMA Representation of Random Processes. Journal of Engineering Mechanics, 111(3), 449-461, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1985\)111:3\(449\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:3(449))
- Serrano O. J. P., Mora E. B. y Salazar A. R. (2014)**, Simulación de la componente longitudinal del viento por representación espectral y el análisis dinámico en edificios de cortante. Paper presented at the XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, México. Available in: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_18/te_05/ar_05.pdf
- Shiau B.S. (2000)**, Velocity spectra and turbulence statistics at the northeastern coast of Taiwan under high-wind conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 88(2-3), 139-151, [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(00\)00045-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(00)00045-3)
- Shinozuka M. y Jan C. M. (1972)**, Digital simulation of random processes and its applications. Journal of Sound and Vibration, 25(1), 111-128, [http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90600-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X(72)90600-1)
- Solari G. y Piccardo G. (2001)**, Probabilistic 3-D turbulence modeling for gust buffeting of structures. Probabilistic Engineering Mechanics, 16(1), 73-86, [http://dx.doi.org/10.1016/S0266-8920\(00\)00010-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0266-8920(00)00010-2)
- Solari G., Carassale L. y Tubino F. (2007)**, Proper orthogonal decomposition in wind engineering. Part 1: A state-of-the-art and some prospects. Wind and Structures, 10(2), 153-176, <http://dx.doi.org/10.12989/was.2007.10.2.153>
- Tamura Y. y Kareem A. (2013)**, Advanced Structural Wind Engineering. Japan: Springer. 414 p.p. 6-11, 16-18, 263-268. ISBN 978-4-431-54337-4 (eBook). <http://dx.doi.org/10.1007/978-4-431-54337-4>



- Tamura Y., Cao S. y Giang L. T. (2012)**, Wind characteristics of strong tropical cyclones. Paper presented at the VI National Conference on Wind Engineering, Roorkee at New Delhi, India.
- Torrielli Alessio (2011)**, Long term simulation and reliability analysis of structures subjected to the wind action. (PhD), Università degli Studi di Genova, Italia. Available in: <http://www.scuoladottorato-sti.unige.it>
- Tse K. T., Li S. W., Chan P. W., Mok H. Y. y Weerasuriya A. U. (2013)**, Wind profile observations in tropical cyclone events using wind-profilers and doppler SODARS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115(0), 93-103, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.003>
- Ubertini F. y Giuliano F. (2010)**, Computer Simulation of Stochastic Wind Velocity Fields for Structural Response Analysis: Comparisons and Applications. *Advances in Civil Engineering*, 2010. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/749578>
- Van der Hoven Isaac (1957)**, Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. *Journal of Meteorology*, 14(2), 160-164. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1957\)014<0160:PSOHWS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0160:PSOHWS>2.0.CO;2)
- Vickery P. J., Wadhwa D., Powell M. D. y Chen Y. (2009)**, A Hurricane Boundary Layer and Wind Field Model for Use in Engineering Applications. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(2), 381-405, <http://dx.doi.org/10.1175/2008jamc1841.1>
- Von Kármán T. (1948)**, Progress in the statistical theory of turbulence. Paper presented at the Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 34(11), 530-539. Available in: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1079162/pdf/pnas01712-0042.pdf>
- Wang B., Hu F. y Cheng X. (2011)**, Wind gust and turbulence statistics of typhoons in South China. *Acta Meteorologica Sinica*, 25(1), 113-127, <http://dx.doi.org/10.1007/s13351-011-0009-8>
- WMO (2010)**, Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions WMO/TD-No.1555. Geneva, Switzerland World Meteorological Organization.
- Wu T. y Kareem A. (2011)**, Modeling hysteretic nonlinear behavior of bridge aerodynamics via cellular automata nested neural network. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4), 378-388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2010.12.011>
- Xu K., Zhao L., Cao S. Y., Yoshida A., Tamura Y. y Ge Y. J. (2014)**, Investigation of Spatial Coherences of Aerodynamic Loads on a Streamlined Bridge Deck in an Actively-Controlled Wind Tunnel. *Advances in Structural Engineering*, 17(1), 53-66, <http://dx.doi.org/10.1260/1369-4332.17.1.53>
- Yang J. N. (1972)**, Simulation of random envelope processes. *Journal of Sound and Vibration*, 21(1), 73-85, [http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X\(72\)90207-6](http://dx.doi.org/10.1016/0022-460X(72)90207-6)
- Yaojun G., Xinyang J. y Cao S. (2010)**, Comparison of APEC wind loading codification and revision of Chinese National Code. Paper presented at the Proceedings of 6th workshop on regional harmonization of wind loading and wind environmental specifications in Asia-Pacific economies, Korea. Available in: <http://wind.arch.t-kougei.ac.jp/APECWW/Report/2010/CHN.pdf>
- Zhang T., Lin Y. Y. y Bai H. F. (2013a)**, Numerical Analysis of Transmission Towers-lines Construction on Wind Forces. *Journal of Applied Sciences*, 13(9), 1587-1591, <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2013.1587.1591>
- Zhang Z. y Moore J. C. (2015)**, Chapter 8 - Autoregressive Moving Average Models. In Zhihua Zhang John C. Moore (Ed.), *Mathematical and Physical Fundamentals of Climate Change* (239-290). Boston: Elsevier.
- Zhang Z., Li H., Li G., Wang W. y Tian L. (2013b)**, The Numerical Analysis of Transmission Tower-Line System Wind-Induced Collapsed Performance. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 11, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/413275>