

Acción del viento sobre estructuras soporte y cables conductores de líneas de transmisión de energía eléctrica en media tensión en la provincia de Misiones

Camila I. Korpys^{a,*}, Luis A. Cerdán^a, Diego A. García^b, Daniel H. Pizzutti^b, Julio A. Mercanti^b y Fernando R. Detke^b

^aAlumno del Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^bDocente del Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina

e-mails: korpyscamila@gmail.com, luiscerdan7@gmail.com, garciadiego@fio.unam.edu.ar

Resumen

Se desarrolla un procedimiento para aproximar numéricamente la acción dinámica del viento horizontal en dirección perpendicular a una línea de energía eléctrica en media tensión en la provincia de Misiones, para su utilización en el análisis estructural de sistemas de transmisión de energía. Se parte del modelo clásico de representación de la velocidad del viento como suma de un valor medio constante más una componente fluctuante originada debido a las variaciones del mismo. La acción del viento se considera como proceso estocástico para representar razonablemente la característica aleatoria del efecto dinámico. Se utiliza el espectro de potencia de Davenport para generar funciones de la componente turbulenta, miembros del proceso estocástico simulados a través del Método de Representación Espectral (MRE), considerando la correlación tanto espacial a lo largo de la línea como temporal. El procesamiento numérico se aplicará a un modelo estructural simplificado representativo de una estructura de suspensión simple de una línea de transmisión de media tensión, para la Provincia de Misiones, Argentina, con el objetivo de realizar estudios de optimización y de confiabilidad estructural.

Palabras Clave – Acción del viento, Proceso estocástico, Estructuras para líneas de media tensión.

1. Introducción

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación del Departamento de Ingeniería Civil de Facultad de Ingeniería de Oberá denominado: “Optimización comparativa, con restricciones de confiabilidad, de estructuras soporte para líneas de media tensión en madera y hormigón”. Particularmente este trabajo trata sobre el estudio de la acción dinámica del viento sobre estructuras de soporte de tendidos eléctricos de media tensión.

En conjunto con la temperatura, la acción del viento es uno de los principales factores que producen la falla estructural de los tendidos eléctricos. La velocidad del viento es una de las principales variables consideradas en los reglamentos para el diseño de estructuras soportes (CIRSOC 102 [1], AEA 95301[2]). Estos analizan los distintos componentes de sistemas estructurales mediante la utilización de cargas estáticas equivalentes que contemplan la acción de las ráfagas (turbulencia) con magnitudes tales que provoquen desplazamientos similares a los que ocurrirían si sus efectos dinámicos fueran detalladamente considerados.

*Autor en correspondencia.

Sin embargo, para el análisis de la confiabilidad estructural de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, caracterizadas por su gran flexibilidad, adquiere gran importancia la incidencia de las fuerzas dinámicas generadas por la acción en los conductores y estructuras de soporte. Las fuerzas resultantes de la integración de las presiones actuantes sobre las superficies en que inciden, presentan un carácter no determinístico, pues derivan de la velocidad del viento; la que puede abordarse con adecuada aproximación a través de su consideración como procesos aleatorios o estocásticos [3].

El colapso de torres de transmisión bajo acción del viento, fue analizado por Rodrigues[4] en 1999, avanzando hasta la modelación del conjunto torre-cadenas de aisladores-conductores. Más tarde, en 2004, la misma autora [5] amplió sus estudios sobre la mecánica de colapso aeroelástico, con importante aporte a la evaluación de la acción del viento bajo enfoques no determinísticos. A fin de representar numéricamente la acción dinámica del viento horizontal, Ribeiro de Oliveira [6] utilizó en 2006 un modelo de comportamiento, presentado como proceso estocástico con correlación temporal y espacial, apta para su utilización en sistemas estructurales con desarrollo lineal en el espacio.

Con el objeto de aportar respuestas a esas cuestiones, en una etapa anterior, en el Departamento de Ingeniería se ha abordado el estudio de los sistemas estructurales para líneas en el nivel de 132kV con soportes de hormigón armado y pretensado [7]. El grupo de investigación comienza sus actividades en el año 2008, y hasta la fecha se continúa con la misma temática: el estudio del comportamiento de estructuras de soporte de líneas de transmisión eléctrica de madera, hormigón armado y pretensado, la simulación de la carga estocástica del viento, la representación numérica del comportamiento de cables conductores y la optimización de dichas estructuras.

El método que se utilizó para simular cargas dinámicas de viento, fue el Método de Representación Espectral (SRM según sus siglas en inglés), desarrollado por Shinozuka y Jan [8], que permite obtener una simulación de proceso estocástico, conocidos de antemano su espectro de frecuencias y las funciones de correlación espacial. Mediante el SRM se puede obtener la componente “fluctuante” o “turbulenta” del viento. Esto requiere como elementos de partida el espectro de frecuencias y funciones de coherencia, elegidos de acuerdo con el problema a simularse. A continuación, se crean señales aleatorias como una superposición de funciones armónicas con ángulos de fase aleatorios, ponderadas por coeficientes que representan la importancia de la frecuencia de la función dentro del espectro y consideran la correlación espacial. La función de densidad espectral se trabaja en conjunto con las frecuencias de forma aleatoria para evitar que la función final resulte periódica. El equipo adaptó el procedimiento utilizado por Ballaben en su tesis de doctorado [9], en el cuál hallaba la carga de viento a aplicarse en el análisis de mástiles arriostrados, al modelo geométrico que se describirá más adelante.

2. Descripción geométrica

El objetivo de este trabajo es la obtención de la acción dinámico determinística del viento sobre la línea de transmisión, incluyendo ésta a los conductores y estructuras de soporte. Para el tramo que se tomó como modelo en el análisis, se cuenta con un vano de 120m entre eje y eje de los postes (estructura soporte). Los tres cables cuentan con sección transversal de 282.5 mm^2 y poseen una flecha máxima de 1.76m cuya curva esta descrita por la ecuación de una catenaria. El cable superior tiene una cota máxima de 10.80m, el del medio de 10m y el inferior de 9.20m. El poste tiene una forma tronco cónica, con una longitud de 14m en total, una longitud libre de 11.6m referida al nivel de terreno y empotrado 2.4m en el suelo. El diámetro de la base es de 0.26m y el diámetro en la cima es de 0.14m. Para el análisis de las cargas se discretizaron los cables y el poste en 20 segmentos cada uno, y se hallaron las coordenadas de los puntos medios de estos.

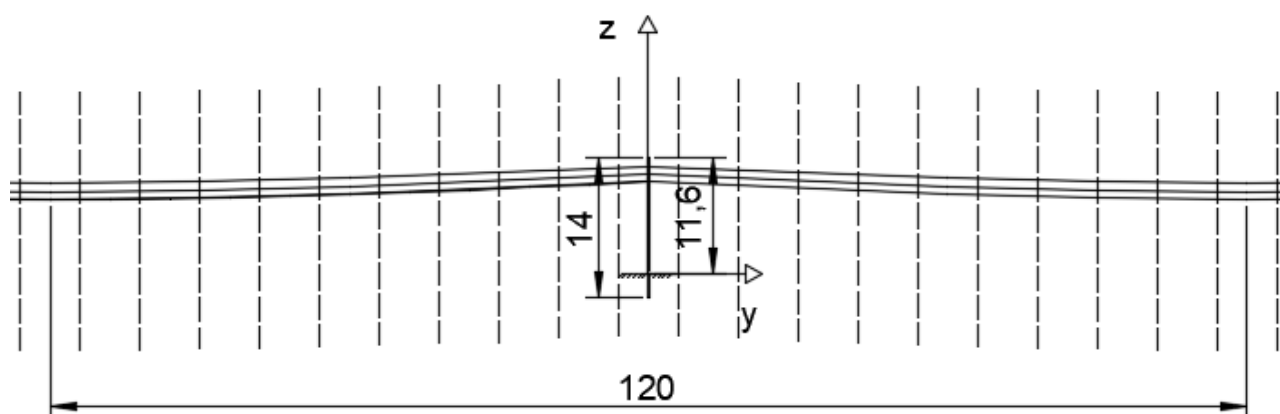


Fig. 1. Sistema estructural analizado: estructura soporte (postes) y cables conductores.

3. Determinación de las cargas de viento

A continuación, se desarrollará el procedimiento seguido para hallar la fuerza que se aplicará en los puntos de la estructura soporte (postes) y en los cables en los cuales la misma se aplicará. Para obtener la fuerza total se ha implementado el procedimiento descrito a continuación en el software de programación Matlab utilizando el apoyo de planillas de cálculo.

3.1. Análisis determinístico

El mismo se realizó siguiendo lo especificado en el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones [1] y en la Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de media y Alta

Tensión de la Asociación Electrotécnica Argentina [2]. Según el Reglamento CIRSOC 102 se partió de la siguiente expresión para hallar la presión del viento, qz , en la estructura de soporte:

$$qz = 0,613.kz.kzt.kd.V^2.I \quad (1)$$

siendo kd el factor de direccionalidad del viento, kz el coeficiente de exposición para la presión dinámica (depende de la altura), kzt el factor topográfico, V la velocidad básica del viento de las isotacas del Reglamento, e I el factor de importancia. La fuerza de viento de diseño en Newton (N) será entonces:

$$F = qz.G.Cf.Af \quad (2)$$

en donde G es el factor de efecto de ráfaga (igual a 0.85 ya que la frecuencia fundamental de la estructura es mayor a 1Hz), Cf el coeficiente de fuerza neta y Af el área proyectada normal al viento. Se adoptó una **Exposición C**, que implica obstrucciones dispersas menores a 10m, campo abierto plano y terrenos agrícolas, ya que se consideró que esta situación era la que más se asemejaba a la zona de estudio. La clasificación de la estructura para la determinación del factor de importancia es III. En la Tabla 1, se observan los valores de los coeficientes utilizados.

Tabla 1: Coeficientes utilizados para simular la acción del viento sobre los postes

| G | V | I | Kzt | Kd | α | Zg | Cf |
|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----|-------|
| [1/1] | [m/s] | [1/1] | [1/1] | [1/1] | [1/1] | [m] | [1/1] |
| 0,85 | 45 | 1,15 | 1 | 0,95 | 9,5 | 274 | 1,2 |

Se utilizaron los lineamientos del Reglamento Argentino CIRSOC 102 [1] para la determinación de la fuerza en el poste porque la norma de la AEA [2] contempla algunos coeficientes a partir de los 10mts de altura y el sistema en estudio se desarrolla hasta una altura de 11.6m.

Según el reglamento de la AEA [2] se partió de la siguiente expresión para hallar la fuerza del viento en los conductores y cables de guardia:

$$F = Q(Z_p.V)^2.F_c.G.C_F.A.cos^2\Psi \quad (3)$$

en donde F es la fuerza del viento en daN, Q es igual a 0.0613 y es un factor que depende de la densidad del aire, Z_p es un factor del terreno que contempla la variación de la velocidad del viento debida a la altura y exposición, F_c es un factor de carga, V es la velocidad básica del viento, G es el factor de ráfaga para conductores, C_F es el coeficiente de presión dinámica o de forma igual a 1 para todos los diámetros, A es el área proyectada en m^2 y Ψ es el ángulo del viento con el eje perpendicular de la línea (en este estudio se adopta igual a 0°). En la Tabla 2 se pueden observar los valores de los coeficientes adoptados.

Se emplearon las expresiones correspondientes al coeficiente kz del CIRSOC 102 [1] para obtener Z_p , ya que el de la norma de la AEA [2] solo contempla la variación de la velocidad del viento en altura a partir de los 10m. Se adoptó para el cálculo que la acción del viento sobre los conductores, la clase de línea de **transmisión B**, correspondiente a Media Tensión, y una **Exposición B**, correspondiente a zonas llanas, poco onduladas, con obstrucciones dispersas menores a 10m de altura, por ejemplo: campo abierto, granjas o sembrados en correspondencia con la clase de exposición adoptada para el poste.

Tabla 2: Coeficientes utilizados para simular la acción del viento sobre los cables conductores

| Coeficientes para hallar G | | | | Coeficientes para hallar F | | | | |
|----------------------------|----------|-----------|----------|----------------------------|-------------------|-----------|-------------|--------------|
| k | α | Ls [m] | L [m] | Fc [1/1] | α [1/1] | Zg [m] | Cf [1/1] | $\cos^2\Psi$ |
| 0,005 | 7,5 | 67 | 120 | 1 | 9,5 | 274 | 1 | 1 |

En base al análisis estático, se obtuvo un vector velocidad media igual a:

$$U(z) = kz \cdot V \quad (4)$$

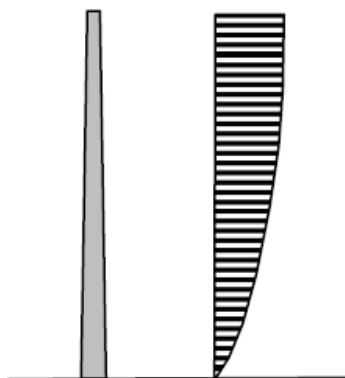


Fig. 2. Hipótesis de acción dinámica del viento sobre el poste.

3.2. Análisis estocástico: Método de Representación espectral

Se desarrollará paso a paso, la implementación del SRM para simular registros de viento. En primer lugar, se adoptó una función de densidad espectral $S(z, \omega)$, en este caso, la propuesta por Davenport reportada en Dyrbye and Hansen [10], que se muestra en la Fig. 3:

$$R_N(z, \omega) = \frac{\omega \cdot S(z, \omega)}{\sigma^2(z)} = 2/3 \cdot \frac{f_L^2}{(1 + f_L^2)^{4/3}} \quad (5)$$

en el cual ω es el vector de la frecuencia en Hz (armado de 0 a 2.5Hz con incrementos de 0.004Hz), σ^2 es la varianza igual a 43.53 y f_L es la frecuencia adimensional:

$$f_L = \omega \cdot \frac{L_u}{U(z)} \quad (6)$$

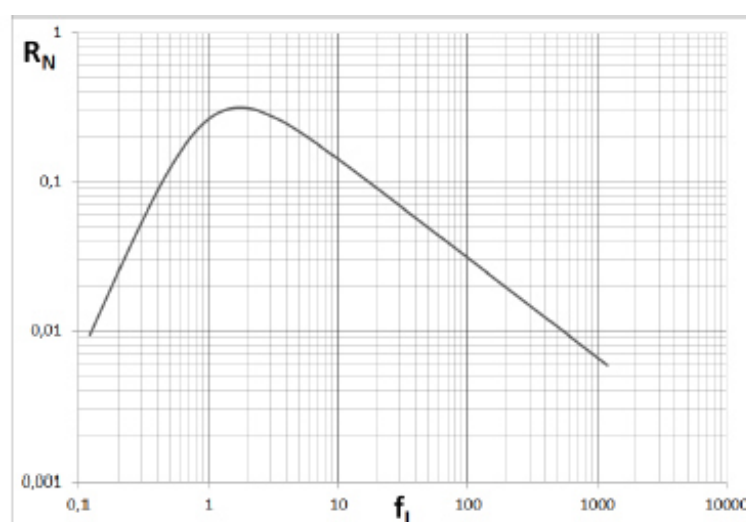


Fig. 3. Espectro de viento propuesto por Davenport.

siendo L_u la longitud de la escala de la turbulencia (adoptada como 1200m) y $U(z)$ la velocidad media del viento hallada con (4). La función de coherencia adoptada es:

$$Coh(\omega, y_i, y_j, z_i, z_j) = \exp\left(\frac{\omega \left[(C_y(y_j - y_i))^2 + (C_z(z_j - z_i))^2 \right]^{1/2}}{1/2 [U(z_i) + U(z_j)]}\right) \quad (7)$$

en dónde y_i e y_j son las coordenadas a lo largo de la línea y z_i y z_j son las alturas de dos puntos dados, $C_z=10$ y $C_y=16$. A continuación, cada elemento S_{ij} de la matriz $S(\omega)$, para un determinado valor de frecuencia puede ser calculado como:

$$S_{ij}(y_i, y_j, z_i, z_j, \omega) = \sqrt{S(z_i, \omega)S(z_j, \omega)Coh(\omega, y_i, y_j, z_i, z_j)} \quad (8)$$

Mediante este procedimiento se obtienen N matrices, una para cada uno de los valores de la frecuencia. Estas matrices deben ser transformadas en triangulares inferiores, para lo cual se usa la Transformada de Cholesky, obteniéndose N matrices H(ω). Luego se construyen las series temporales de la componente fluctuante (con media cero) de la velocidad del viento $uz(z_j, t)$ para cada altura z_j y como un conjunto de m procesos gaussianos estacionarios (para cada instante de tiempo) es por medio de la ecuación

$$uz(z_j, t) = \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^N |H_{jk}(\omega_n)| \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\widehat{\omega}_n t + \varphi_{kn}] \quad (9)$$

dónde $\widehat{\omega}_n$ y φ_{kn} son generados de forma aleatoria en el programa confeccionado en Matlab. Para finalizar, se calculó la fuerza en cada uno de los puntos en función del tiempo y la altura, usando como base a (2) y (3), determinadas por los reglamentos; pero componiendo la velocidad al cuadrado por kz ó Z_p como la multiplicación de la velocidad básica V por la componente fluctuante, de la siguiente forma

$$kz.V^2(z_i, t) = V.(U(z_i) + uz(z_j, t)) \quad (10)$$

4. Resultados

Los resultados obtenidos de la adecuación e implementación de los temas desarrollados en los puntos anteriores se presentan a continuación. Los conceptos teóricos y la adecuación de la metodología utilizada al sistema estructural en estudio fueron volcados en un programa desarrollado en Matlab. El mismo permitió obtener la simulación estocástica de cargas en función del tiempo para los puntos del plano que contiene al sistema estructural.

A continuación, en la Fig. 4, se muestra el registro de fuerzas en N de una carga aplicada en el centro del vano de uno de los cables para un tiempo considerado de **300 s**. Esto constituye una realización del proceso estocástico para ese punto del sistema estructural. Con cada corrida del programa escrito en Matlab se obtiene una realización para un punto del sistema en el tiempo considerado. En rojo, en la misma figura, se observa el valor medio. Estos valores de fuerza están en congruencia con los reportados en otros trabajos con la misma temática. Para obtener los registros se consideró una velocidad básica del **viento de 45 m/s** a partir de las curvas isotacas del Reglamento CIRSOC 102[1] para la provincia de Misiones. En la Fig. 5 se presenta el registro obtenido para la cima del poste también bajo las mismas condiciones de simulación. En la Fig. 6 se

muestra el registro para un punto del centro del vano del cable a igual distancia del poste y altura que el punto considerado en la Fig. 4.

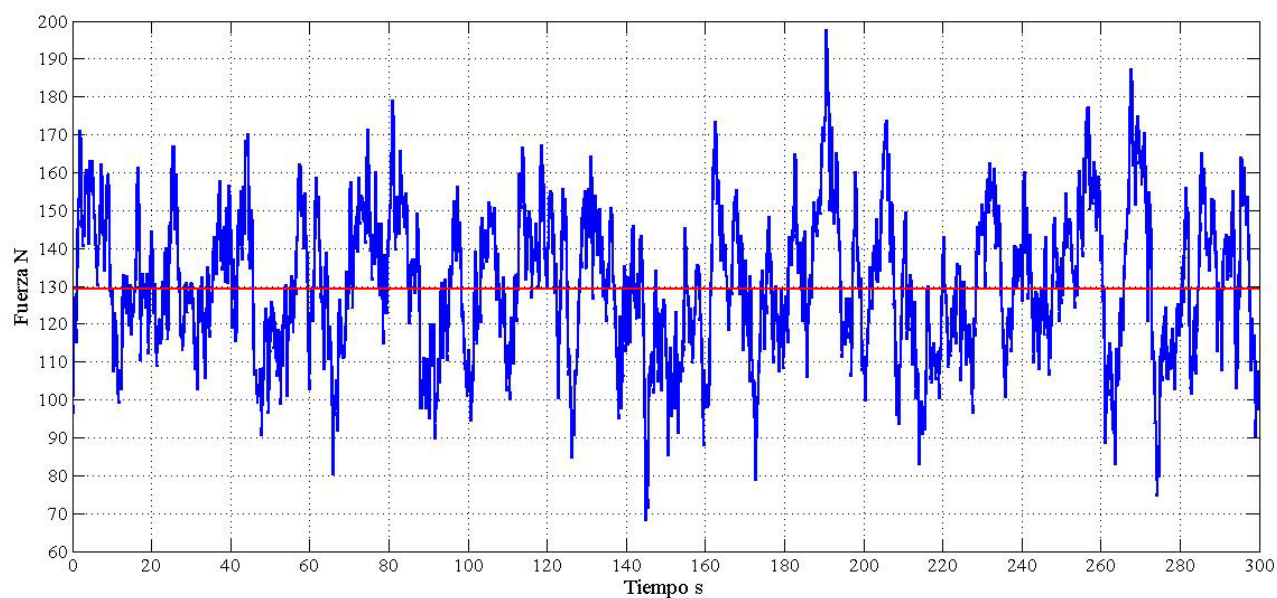


Fig. 4. Registro de la fuerza generada por la acción del viento en el centro del vano del cable a un lado del poste. Registro completo y valor medio de la fuerza obtenidos en 300 s de exposición.

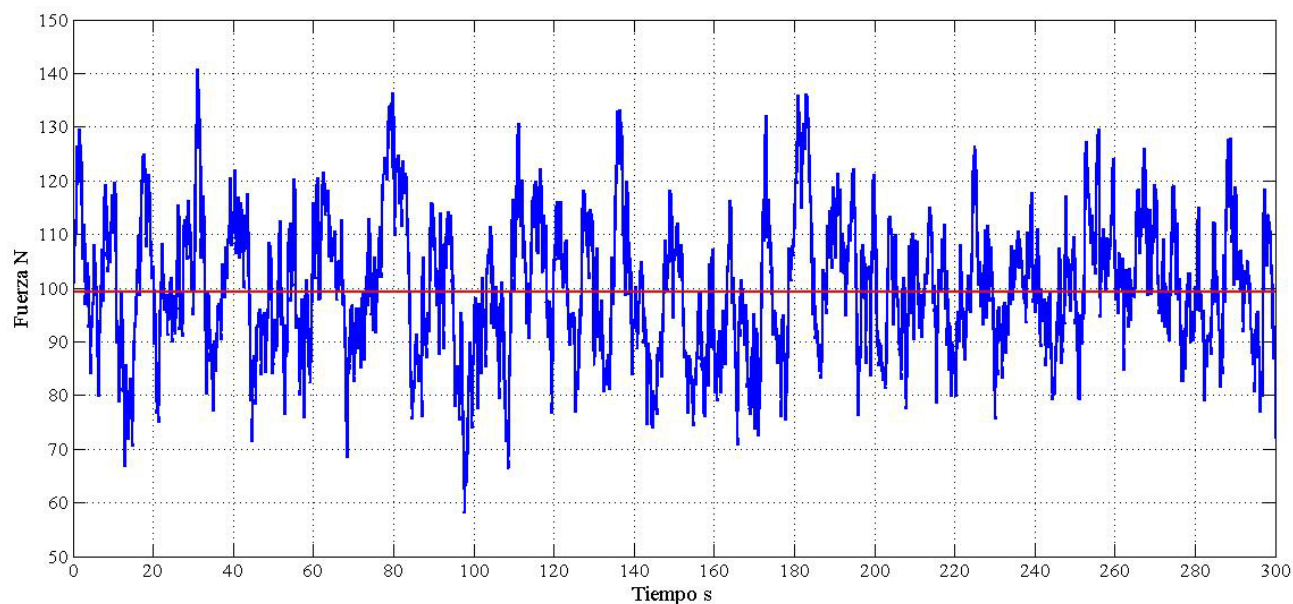


Fig. 5. Registro de la fuerza generada por la acción del viento en la cima del poste. Registro completo y valor medio de la fuerza obtenidos en 300 s de exposición.

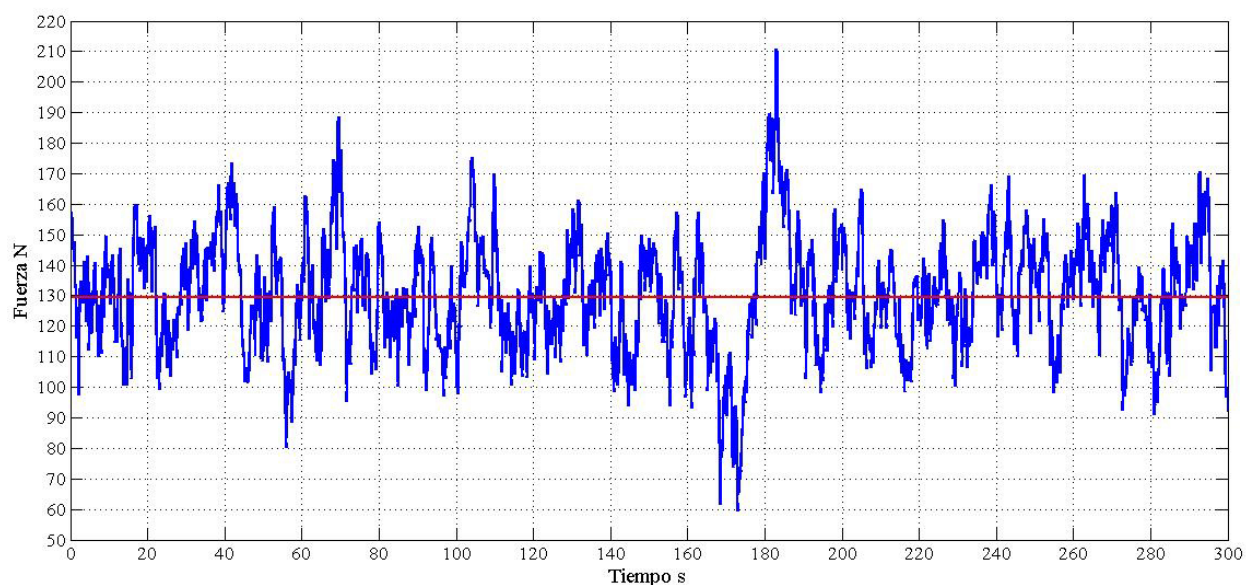


Fig. 6. Registro de la fuerza generada por la acción del viento en el centro del vano del cable al otro lado del poste. Registro completo y valor medio de la fuerza obtenidos en 300 s de exposición.

5. Conclusiones

En el presente trabajo se adecuó e implementó un método para simular la variabilidad de la velocidad del viento tanto espacial como temporal contemplando su característica estocástica. El procedimiento utilizado, denominado Método de Representación Espectral, permite simular un proceso estocástico múltiple partiendo de un espectro de potencia y una función de coherencia que correlaciona los puntos del espacio. Esta representación más real de la variabilidad de la velocidad del viento, teniendo en cuenta su componente fluctuante, permite obtener registros de acciones sobre el sistema estructural en estudio, en este caso, una línea de transmisión de energía eléctrica en media tensión para la provincia de Misiones. El Método de Representación Espectral fue adecuado al sistema estructural a través de un programa desarrollado en Matlab que permite realizar cálculos extensivos y simulaciones. La función de coherencia adoptada en este trabajo permite correlacionar

las velocidades encontradas para cada tiempo en los puntos del plano, a diferencia de trabajos anteriores en los que fueron utilizadas variantes de esta función que solo consideraban la correlación respecto a una dirección, la altura del poste.

Luego de simulada la variabilidad de la velocidad del viento, partiendo de un valor medio indicado para la provincia de Misiones, se procedió a la generación de la fuerza. La velocidad del viento se convierte en presión y luego en fuerza puntual a través de los lineamientos establecidos en las normativas argentinas para considerar este tipo de acciones sobre las estructuras. La comparación de la normativa (Reglamento CIRSOC 102[1] y norma de la AEA[2]) arrojó diferencias en cuanto a los lineamientos a seguir para el análisis de los elementos constitutivos del sistema estructural estudiado, postes y cables conductores. La principal diferencia radica en la variación del perfil de velocidades para alturas menores a 10 m y en el periodo de retorno de la velocidad de referencia obtenida para esta región del país.

Los resultados obtenidos a través de la simulación estocástica de cargas en función del tiempo para los puntos del plano que contiene al sistema estructural, serán luego utilizados para el análisis de los elementos constitutivos de la misma en forma individual y en conjunto en otros trabajos. Esto con vistas a estudiar el desempeño de este tipo de estructuras en términos de condiciones de servicio y de resistencia, con la finalidad de realizar un proceso de optimización que permita obtener soluciones técnicas-económicas que satisfagan las necesidades de suministro de energía eléctrica de la población de la provincia de Misiones.

6. Referencias

- [1] Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones CIRSOC 102; Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI); Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires; 2005
- [2] Reglamentación de Líneas Aéreas Exteriores de Media Tensión y Alta Tensión AEA 95301. Asociación Electrotécnica Argentina, Noviembre 2007
- [3] Mercanti J.A.; Pizzutti H.D.; Aguirre M.A.; Fank P.Y.; Moller O.: “Acción del viento como proceso estocástico aplicado a líneas de transmisión de energía eléctrica”. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones - ENIEF 2011.
- [4] Rodrigues R. S.: “Colapso de Torres TEE sobAcao do Vento”, Tesis de Maestría, COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil. 1999
- [5] Rodrigues, R. S.: “Mecânica do Colapso Aeroelástico de Torres TEE”, Tesis de Doctorado, COPPE/UFRJ. Río de Janeiro, Brasil. 2004
- [6] Ribeiro de Oliveira, M. I. : “Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas a os efeitos dinâmicos induzidos pelo vento”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006
- [7] Detke F.R.; Reinert H.O.; Duarte J.A.; Pizzutti H.D.; Fank P.Y.; Golemba J.L.; Moller, O.: “Análisis estructural por elementos finitos aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de

- Misiones, Argentina”. XIX Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones - ENIEF 2011”.
- [8] Shinozuka, M. and Jan, C.: “Digital simulation of random processes and its applications”, Journal of Sound and Vibration, 25(1):111-128, 1972.
- [9] Ballaben J.S.: “Mástiles Arriostrados: Análisis Dinámico No Lineal y Cuantificación de Incertidumbres”, Bahía Blanca, Argentina, 2016.
- [10] Dyrbye,C. and Hansen,S.: ”Wind Loads On Structures”, John Willey and Sons, West Sussex, England, 1 edition, 1994.