

ANÁLISIS DEL EFECTO DE ARRASTRE DE LA ACCIÓN DEL VIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN

ANALYSIS OF THE DRAG EFFECT OF WIND ACTION ON MEDIUM VOLTAGE ELECTRICAL TRANSMISSION LINES

Oscar Möller¹, Franco Bande Worde², Javier Duarte², Julio Mercanti²,

¹ Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura,
Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina.
e-mail: moller@fceia.unr.edu.ar

² Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones,
Juan Manuel de Rosas 325, N3360 Oberá, Misiones, Argentina.

Palabras clave: Procesos estocásticos, Acción del viento, Líneas de transmisión eléctrica,
Variables aleatorias principales y secundarias, Estadística de respuesta.

Resumen. La acción del viento sobre líneas de transmisión eléctrica se puede caracterizar como un proceso estocástico aplicando la técnica de representación espectral con correlación espacial, y la variación temporal a partir de una función de densidad espectral de potencia. Se incorpora el arribo de ráfagas como un proceso de Poisson. En este trabajo se analiza el efecto de arrastre sobre una línea de transmisión eléctrica de media tensión. Las variables aleatorias se agrupan en principales y secundarias. Se realiza el análisis dinámico no lineal del sistema para 250 combinaciones aleatorias de las variables principales, y para cada una se procesan 10 sub-combinaciones para valores aleatorios de las variables secundarias. Se presentan resultados de funciones de viento generadas y respuestas en desplazamientos y fuerzas internas del sistema estructural. El análisis estadístico muestra que de la influencia de las variables aleatorias secundarias se puede representar con distribución Normal o Uniforme. La variable aleatoria principal que predomina en la respuesta de los conductores es la velocidad básica del viento, mientras que en la respuesta del poste todas las variables principales influyen conjuntamente. Se obtienen conclusiones de interés para el diseño óptimo.

Keywords: Stochastic processes, Wind action, Electrical transmission lines, Primary and secondary random variables, Response statistics.

Abstract. The action of wind on power transmission lines can be characterized as a stochastic process by applying the spectral representation technique with spatial correlation, and the temporal variation from a power spectral density function. The arrival of gusts is incorporated as a Poisson process. In this work, the drag effect on a medium voltage power transmission line is analyzed. The random variables are grouped into main and secondary variables. The nonlinear dynamic analysis of the system is performed for 250 random combinations of the main variables, and for each one, 10 sub-combinations are processed for random values of the secondary variables. Results of generated wind functions and responses in displacements and internal forces of the structural system are presented. The statistical analysis shows that the influence of the secondary random variables can be represented with a Normal or Uniform distribution. The main random variable that predominates in the response of the conductors is the basic wind speed, while in the response of the pole all the main variables influence together. Conclusions of interest for the optimal design are obtained.

1 INTRODUCCIÓN

Dentro del proyecto de investigación del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, denominado “Optimización del costo del ciclo de vida considerando incertidumbres para postes de hormigón y de madera soporte de líneas eléctricas”, se presenta en este trabajo un análisis estadístico del efecto de arrastre del viento sobre una línea de transmisión eléctrica de media tensión de 33kV, compuesto por dos vanos de 120 m de longitud y una estructura de suspensión formada por un poste de hormigón pretensado y su fundación que sostiene 3 cables conductores y un hilo de guardia.

La acción del viento sobre líneas de transmisión eléctrica se puede caracterizar como un proceso estocástico debido a su variabilidad aleatoria tanto en el tiempo como en el espacio. Numerosos trabajos se han publicado sobre este tema, siendo los más referenciados las publicaciones de Davenport (1961, 1962, 1967, 1968), Shinozuka et al. (1972, 1991). Algunas aplicaciones más actuales pueden consultarse en Ballaben et al. (2011, 2013), Castro et al. (2015), Payán Serrano et al. (2014). Trabajos anteriores de este grupo de investigación que incluyen la acción del viento y la respuesta estructural considerando variables aleatorias fueron presentados en Mercanti et al. (2011), Detke et al. (2011, 2012, 2013, 2014), Pizzutti et al. (2013). Aguirre et al. (2014), García et al. (2018), Duarte et al. (2022).

Como avances en la modelización de la acción del viento, aplicando la técnica de representación espectral, se considera ahora la correlación espacial entre los diferentes puntos del sistema estructural, además de la variación temporal a partir de una función de densidad espectral de potencia. También se incorpora el arribo de ráfagas suponiendo que se puede representar en forma simplificada como un proceso de Poisson. En el modelo estructural se reemplaza la modelización tridimensional del suelo circundante a la fundación por resortes y amortiguadores equivalentes (Mercanti et al., 2024).

2 CARACTERIZACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA ACCIÓN DEL VIENTO

2.1 Acciones del viento sobre las estructuras

La caracterización de la acción del viento sobre las construcciones puede realizarse de numerosas maneras, dependiendo no solamente del fenómeno físico real y de los datos disponibles, sino también del tipo de análisis estructural a realizar. La componente longitudinal es la más significativa y sus efectos han sido adecuadamente estimados utilizando las teorías cuasi-estáticas expresada en términos de las fluctuaciones de velocidad con:

$$F(t) = \frac{1}{2} \rho A C_D [\bar{U} + u(t)]^2 \cong \frac{1}{2} \rho A C_D \bar{U}^2 + \rho A C_D \bar{U} u(t) \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del aire, A es el área cargada por el viento y C_D es el coeficiente de arrastre. \bar{U} es la velocidad media y $u(t)$ es la parte fluctuante. La ec.(1) posibilita efectuar desarrollos que consideran la aleatoriedad de comportamiento de la velocidad del viento abordándola como miembros de procesos estocásticos que, convertidos a fuerzas, se aplican al modelo estructural. La expresión del CIRSOC 102 (2005) es:

$$F_z = q_z G C_F A \quad (2)$$

Esta expresión se utiliza para análisis estáticos donde el efecto de ráfagas se incorpora con el coeficiente G . También se evalúa la presión dinámica q_z , a la altura z :

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \tag{3}$$

en la que K_z es el coeficiente de exposición para la presión dinámica; K_{zt} es el factor topográfico; K_d es el factor de direccionalidad del viento; V es la velocidad básica del viento; e I es el factor de importancia.

2.2 Modelo numérico de la velocidad de viento

El viento presenta una distribución de velocidades aleatorias correlacionadas espacialmente, y entonces una descripción adecuada se puede realizar mediante procesos estocásticos. Se aplica el método de representación espectral para obtener la componente turbulenta o fluctuante mediante un proceso estocástico estacionario de media nula. Esta metodología necesita como información inicial la función de densidad espectral de potencia y una función de coherencia.

Densidad espectral de potencia

Para representar la velocidad turbulenta del viento se utiliza la función de densidad espectral de potencia $S_{XX}(f)$ propuesta por Davenport (1961, 1962) cuya expresión general es

$$\frac{f S_{XX}(f)}{\sigma^2(z)} = \frac{2}{3} \frac{f_L^2}{[1 + f_L^2]^{4/3}} \quad \text{con} \quad f_L = f \frac{L_u}{U(z)} \tag{4}$$

donde f es la frecuencia en Hz definida desde 0 a ∞ , $\sigma^2(z)$ es la variancia del proceso, z la altura desde el nivel del terreno, f_L es la frecuencia adimensional, L_u es la longitud de turbulencia y $U(z)$ la velocidad media con ley potencial función de la altura:

$$U(z) = b \left(\frac{z}{10} \right)^\alpha V_{10} \tag{5}$$

Si se utilizan los parámetros para $V_{10} = 45$ m/s, la velocidad media a 10 m de altura, y condición de exposición “C” del CIRSOC 102 (2005), la función de densidad espectral de potencia para velocidad de ráfaga de 3 s, (\hat{V}_z con $\hat{b} = 1.00, \hat{\alpha} = 1/9.5$), y para velocidad media horaria (\bar{V}_z con $\bar{b} = 0.65, \bar{\alpha} = 1/6.5$), ver Figura1, resulta:

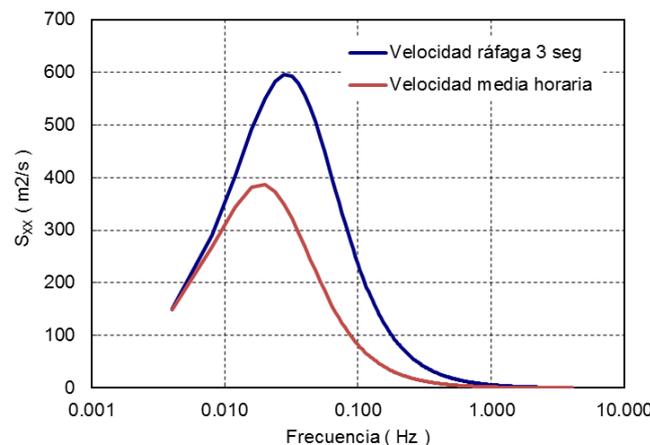


Figura 1: Espectro de Davenport con parámetros de CIRSOC 102 para $V_{10} = 45$ m/s y exposición C

La variancia del proceso es $\sigma^2(z) = (I_{\bar{z}} U(z))^2$ con $I_{\bar{z}} = c (10/\bar{z})^{1/6}$ intensidad de turbulencia y $c = 0.20$.

Función de coherencia

Se incluye la función de coherencia para evaluar la correlación espacial entre los procesos estocásticos calculados en coordenadas (y_j, z_j) y (y_k, z_k) , siendo z la altura desde el terreno e y la coordenada en dirección perpendicular a la acción del viento. El modelo propuesto por Dyrbye and Hansen es

$$Coh(y, z, f) = \exp \left\{ - \frac{2f \left[(C_Y (y_k - y_j))^2 + (C_Z (z_k - z_j))^2 \right]^{1/2}}{U(z_j) + U(z_k)} \right\} \quad (6)$$

con valores de los coeficientes $C_Y = 16$, $C_Z = 10$. Luego, la función de densidad espectral cruzada se calcula con

$$S_{jk}(y_j, z_j, y_k, z_k, f) = \sqrt{S_{XX}(z_j, f) S_{XX}(z_k, f)} Coh(y, z, f) \quad (7)$$

Miembros del proceso estacionario

Se discretiza la superficie donde actúa el viento en M puntos con coordenadas para un punto genérico $j : (y_j, z_j)$, se define la matriz de densidad espectral cruzada $\mathbf{S}(f)$ de acuerdo con la ec.(7) y se aplica la descomposición de Cholesky $\mathbf{S}(f) = \overline{\mathbf{H}}(f) \overline{\mathbf{H}}^T(f)$. Luego, un miembro r del proceso estocástico para un punto genérico $j : (y_j, z_j)$, correlacionado espacialmente con los otros puntos $1, 2, \dots, j, \dots, M$, resulta:

$$x_{j,r}(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{n=0}^N |H_{jk}(f_n)| \sqrt{2 \Delta f} \cos \left[2\pi f_n t + \theta_{jk}(f_n) + \phi_{kn,r} \right] \quad (8)$$

Donde M es el número de puntos, N es el número de frecuencias en que se discretiza el espectro, Δf es el intervalo de frecuencias, siendo entonces $f_n = n \Delta f$, ϕ_{kn} son ángulos de fase aleatorios con distribución uniforme $0, 2\pi$, y $\theta_{jk}(f_n) = \text{tg}^{-1} [\text{Im } H_{jk}(f_n) / \text{Re } H_{jk}(f_n)]$. Si $S_{jk}(f_n)$ es real, como en este caso, resulta $\theta_{jk}(f_n) = 0$ y el módulo $|H_{jk}(f_n)| = \text{Re } H_{jk}(f_n) = H_{jk}(f_n)$.

Arribo de ráfagas – Condiciones no estacionarias

Cuando se realiza análisis dinámico para calcular la respuesta de la estructura en función del tiempo, no se puede utilizar la velocidad de ráfaga de 3 seg durante toda la duración de la simulación, por ejemplo 300 seg, porque no es real. Una mejor aproximación es considerar la velocidad media horaria, cuyos parámetros para la ley potencial están dados en CIRSOC 102, y agregar ráfagas con arribo aleatorio como un proceso de Poisson.

Para aplicar estos conceptos, se propone el siguiente procedimiento: (a) Elegir aleatoriamente el número de ráfagas mediante una variable con distribución uniforme $NR = U(1, NR_{max})$; (b) Elegir aleatoriamente la duración de la n -ésima ráfaga mediante una variable con distribución uniforme $DR_n = U(DR_{min}, DR_{max})$; (c) Calcular la frecuencia media $\nu = NR / (T_2 - T_1)$, siendo T_1 y T_2 los tiempos de inicio y fin de la parte intensa de la acción del viento; (d) Calcular el tiempo medio de arribo de la n -ésima ráfaga $\bar{t}_n = T_1 + n/\nu$; (e) Elegir aleatoriamente el tiempo de inicio de la n -ésima ráfaga, utilizando una variable con distribución uniforme $U(0,1)$ teniendo en cuenta que su duración no se superponga con la ráfaga siguiente

$$TIR_n = \bar{t}_n - 0.5 \frac{1}{\nu} + U(0,1) \frac{1}{\nu} \leq \bar{t}_{n+1} - 0.5 \frac{1}{\nu} - DR_n \quad (9)$$

Para este trabajo se considera $NR_{max} = 10$, $DR_{min} = 2$ seg, $DR_{max} = 5$ seg. La Figura 2 presenta un miembro del proceso de velocidad de viento para el cable medio, en el centro del vano izquierdo del sistema en estudio, ver Figura 3, donde se indica el tiempo central del arribo de cada una de las 5 ráfagas

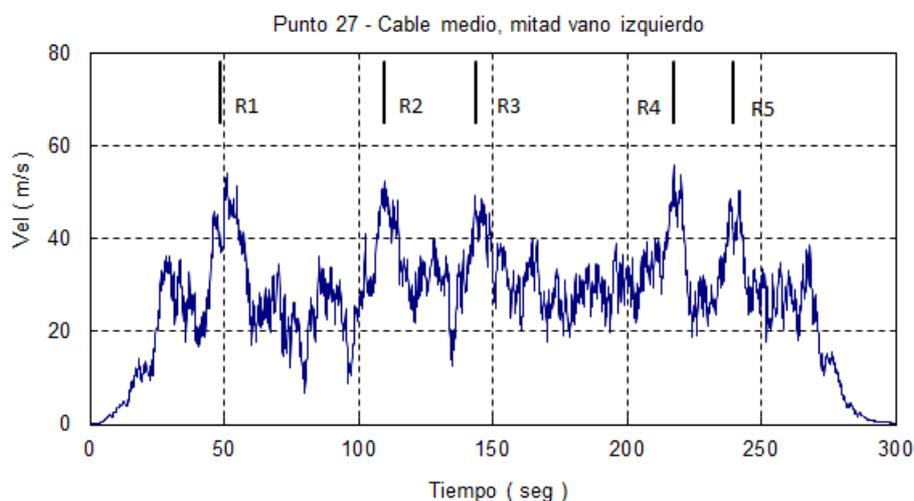


Figura 2: Velocidades de viento sobre conductores en el centro del vano izquierdo

3 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA

3.1 Diseño geométrico

La Figura 3 muestra la línea de transmisión eléctrica de 33 kV con altura de postes de 12 m y vanos de 120 m. El sistema se discretizó con $M = 87$ puntos, asignándose 21 puntos a cada uno de los 4 cables y los restantes se ubican en el poste hasta la base.

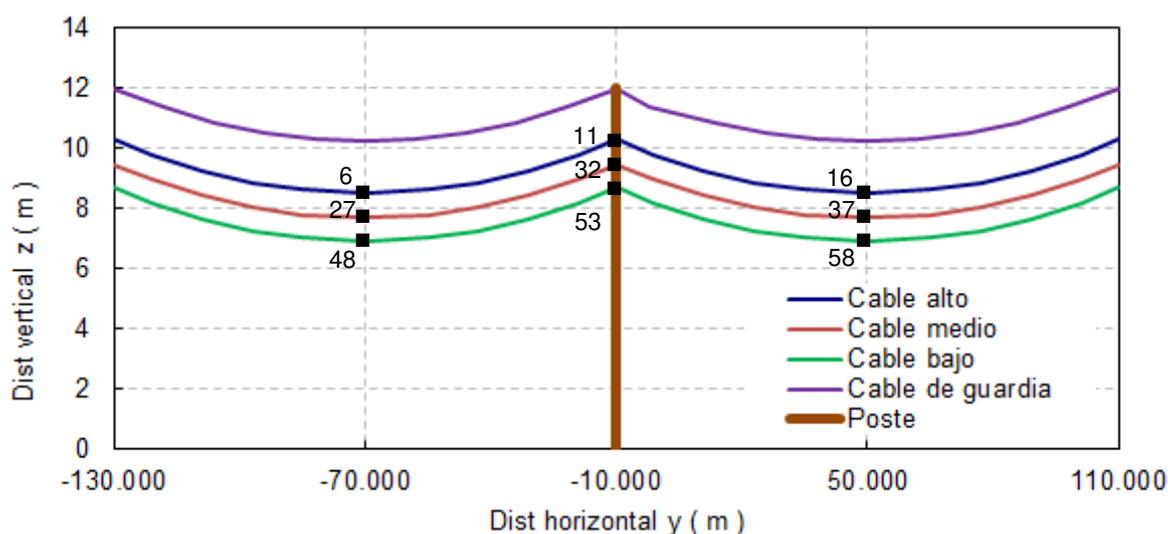


Figura 3: Esquema de la línea de transmisión eléctrica

3.2 Variables aleatorias

Se consideran las incertidumbres mediante variables aleatorias agrupadas en principales y secundarias. Las variables aleatorias principales y sus límites se presentan en la Tabla 1.

Variable	Símb	Denom.	Lím. inf.	Lím. sup.	Ud.
Diámetro de la cima del poste	D_{pc}	X(1)	0.20	0.45	<i>m</i>
Espesor del poste	e_p	X(2)	0.05	0.12	<i>m</i>
Cuantía de armadura de pretensado	ρ_{pret}	X(3)	0.2	2.5	%
Cuantía de armadura pasiva	ρ_{pas}	X(4)	0.5	6	%
Lado de la base cuadrada	a_b	X(5)	0.80	1.50	<i>m</i>
Profundidad de la base	h_b	X(6)	1.40	2.80	<i>m</i>
Velocidad onda de corte del suelo	V_s	X(7)	150	400	<i>m/s</i>
Densidad del suelo	γ_s	X(8)	1.43	1.84	<i>tn/m³</i>
Coefficiente de Poisson del suelo	ν_s	X(9)	0.2	0.3	
Velocidad básica del viento	V_0	X(10)	5	60	<i>m/s</i>

Tabla 1: Variables aleatorias principales

Las variables aleatorias secundarias son: (a) Parámetros de la relación momento curvatura de la sección de empotramiento del poste en la fundación: momento de fluencia M_y , rigidez secante de la rama elástica EI y momento resistente M_r , obtenidas de un pre-procesamiento considerando aleatoriedad en la resistencia del hormigón y tensión de fluencia de los aceros pasivos y activos; (b) El conjunto de ángulos de fase aleatorios ϕ_{kn} de ec.(8) para generar la función de la velocidad del viento, luego escalada a V_0 de esa combinación particular.

3.3 Análisis dinámico no lineal

Con el objetivo de evaluar la respuesta del sistema estructural considerando las incertidumbres, se seleccionan $NP = 250$ combinaciones de las variables aleatorias principales \mathbf{X} : $X(1)$, $X(2)$, ..., $X(10)$ de Tabla 1, utilizando el procedimiento de diseño de experimentos Latin Hypercube Design (Zhang, 2003). Para cada combinación se generan $NS = 10$ subcombinaciones con variaciones en las variables aleatorias secundarias.

Para cada combinación y subcombinación, se evalúan varios parámetros de respuesta estructural $R(\mathbf{X})$ del modelo mostrado en la Figura 3, utilizando el software SAP2000. Para estudiar la estadística del efecto de arrastre del viento se selecciona el desplazamiento horizontal del nodo 37 ubicado en el centro del vano, ver Figura 3, el desplazamiento de la cima del poste, y la tracción en un conductor, elem C48 en el centro del vano derecho.

Como ejemplo, los resultados para la combinación 242 de variables principales se muestran en la Figura 4, con la evolución en el tiempo de las 10 subcombinaciones mostradas en colores diferentes, el valor medio de los picos máximos y el valor medio del proceso en la zona intensa, sin considerar los primeros y últimos 30 seg de viento creciente y decreciente.

La fuerza de tracción en el conductor sin la acción del viento es $T = 3.41$ kN que resulta del peso propio del conductor y la flecha de instalación 1.76m. El modelo numérico lo reproduce con precisión como se observa en la última imagen de la Figura 4 para tiempo inicial y final.

Se observa la influencia de las subcombinaciones, especialmente la generación de velocidades de viento con diferente secuencia de ángulos de fase aleatoria, ec.(8), y el arribo de ráfagas como proceso de Poisson, que producen historias de respuesta diferentes, haciendo necesario el análisis estadístico.

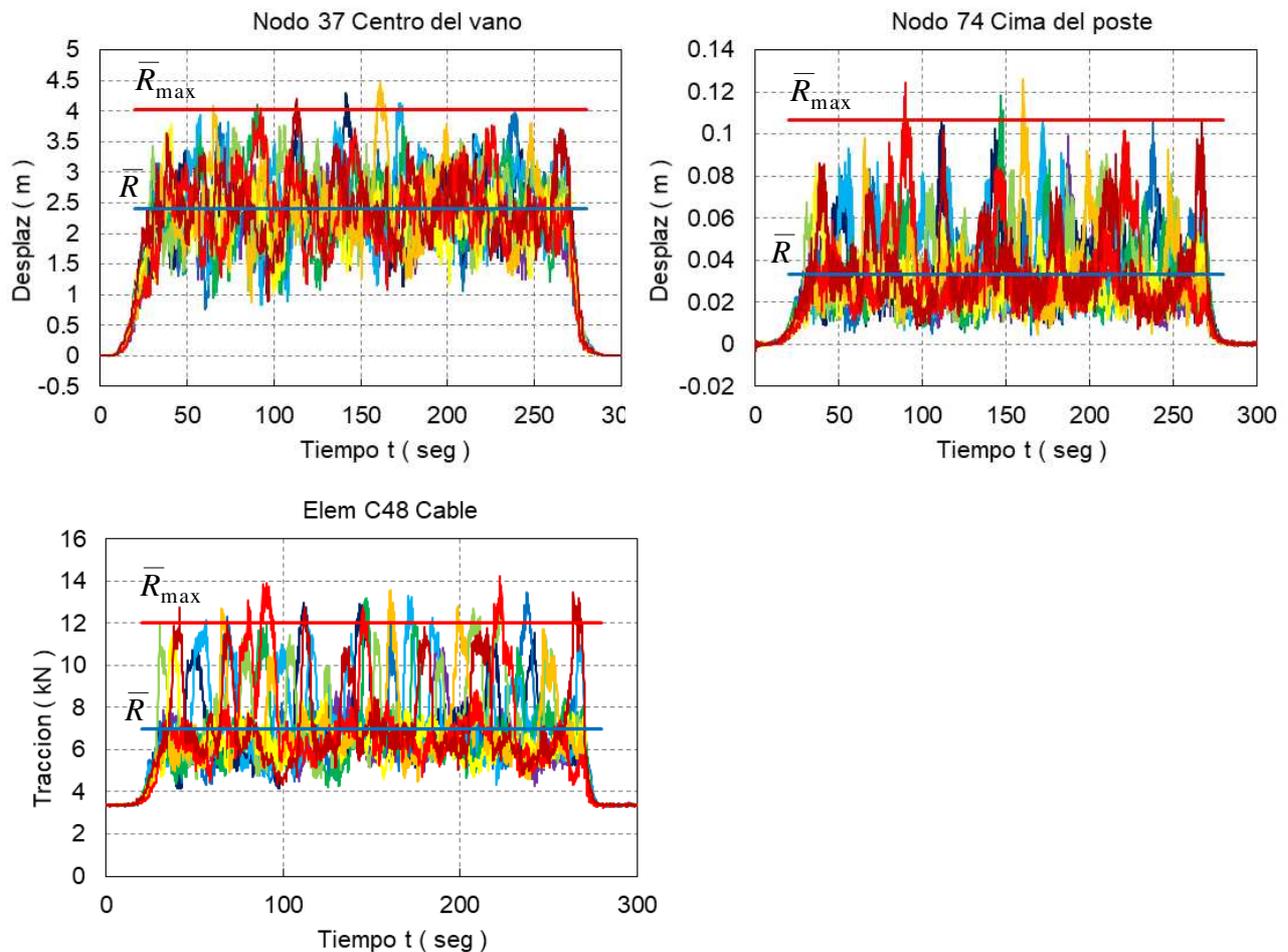


Figura 4: Parámetros de respuesta para la combinación 242

3.4 Estadística de los resultados

La Figura 5 muestra, como ejemplos, la influencia de las variables aleatorias secundarias a través de los histogramas con sus valores mínimos y máximos, la función de densidad y distribución de probabilidades, que resultan de las 10 subcombinaciones para dos casos: desplazamientos máximos del nodo 37 en la combinación C10 y del nodo 74 en la combinación C135.

Se analizan las funciones de densidad de probabilidades Normal y la Uniforme para representar los resultados. Ambas satisfacen las pruebas de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. No hay una tendencia clara sobre cual se ajusta mejor, incluyendo muchos otros casos no mostrados acá. Se debe a que influyen los ángulos de fase con distribución uniforme en la generación de las funciones de velocidad de viento, pero también los parámetros momento curvatura donde intervienen la resistencia del hormigón y la fluencia del acero con distribución lognormal. Con una mayor cantidad de subcombinaciones, es decir un tamaño mayor de la muestra, se podría aproximar mejor la función de distribución. De todas maneras, para el análisis de los conductores influye más la velocidad del viento, y entonces la distribución uniforme aparece como la más adecuada.

También se analiza la influencia de las variables aleatorias principales, ver Tabla 1. Para el efecto de arrastre del viento sobre los conductores, se presenta en la Figura 6 los desplazamientos horizontales en el nodo 37, centro de vano, y la tracción en uno de los

conductores, en función de la velocidad básica de viento $X(10)$ de Tabla 1 para las 250 combinaciones de las variables principales

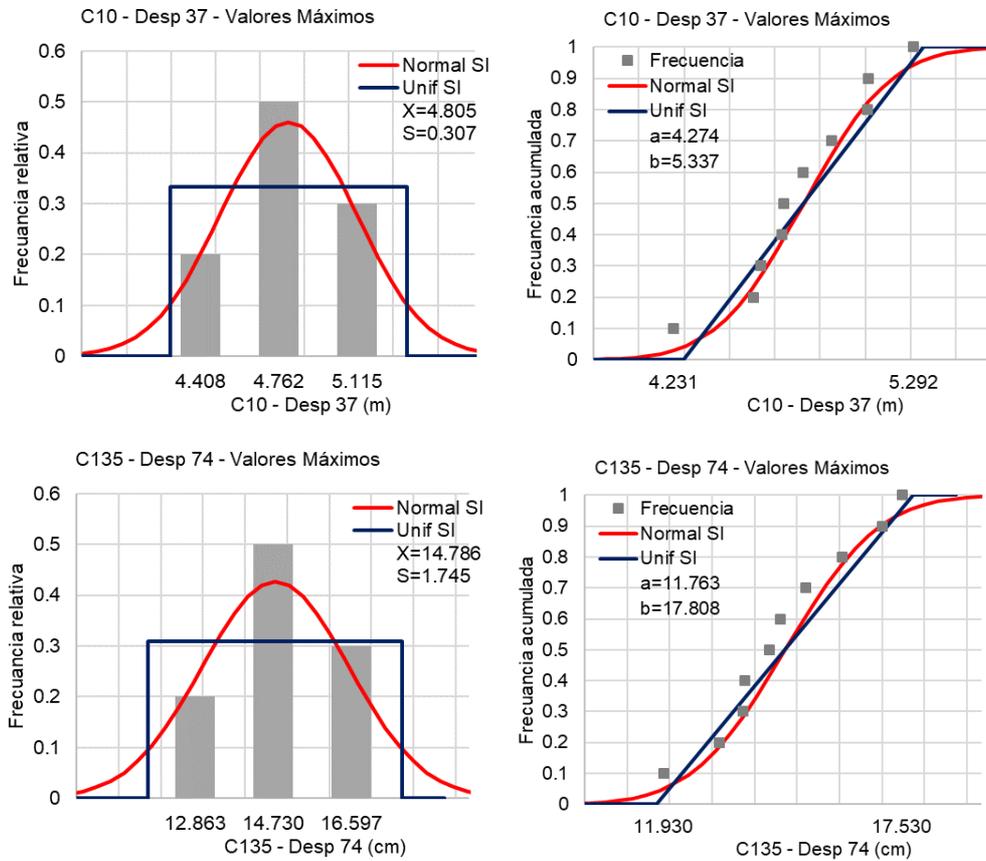


Figura 5: Influencia de las variables aleatorias secundarias en algunas de las respuestas

En cada punto se representan los valores medios de los máximos de las 10 subcombinaciones de variables aleatorias secundarias, y valores medios de la media de desplazamientos y tracción en el conductor, en la zona intensa de la acción del viento. Los resultados muestran la poca o casi nula influencia de las otras variables principales, con excepción de unos pocos casos de combinaciones extremas de características del poste, fundación y suelo.

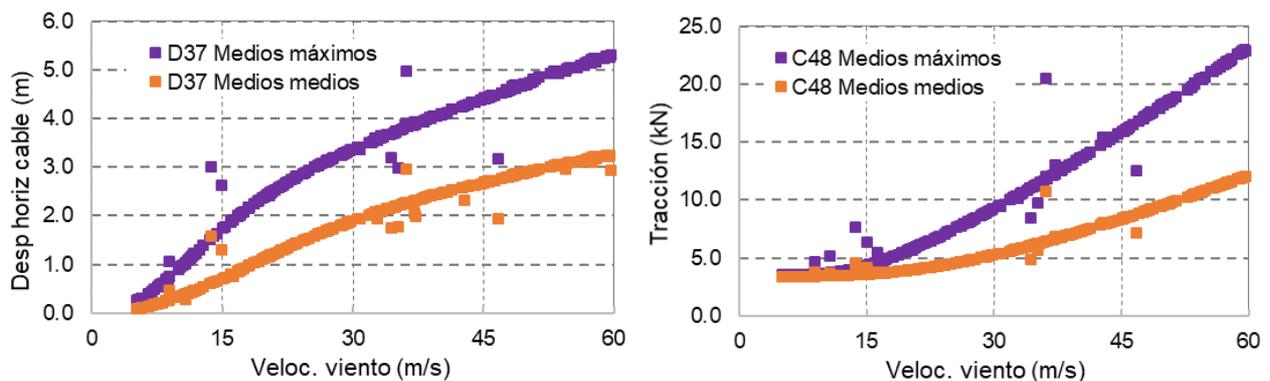


Figura 6: Influencia de la variable aleatoria principal V_0 sobre la respuesta de los conductores

En la Figura 7 se presentan resultados del comportamiento del poste a través de su desplazamiento horizontal en la cima, nodo 74 del modelo. Se observa una significativa dispersión de los resultados cuando se grafican en función de la velocidad básica del viento, que significa una influencia importante de las otras variables principales que se refieren a la rigidez y resistencia del poste y de la fundación. En el gráfico de la derecha de la Figura 7 los resultados del desplazamiento en la cima del poste se representan en función del diámetro del poste, es decir en función de la rigidez. También hay dispersión en los valores, en mayor medida para diámetros menores donde la menor rigidez interactúa más con las fuerzas que le transmiten los conductores a través de su comportamiento dinámico por la acción del viento.

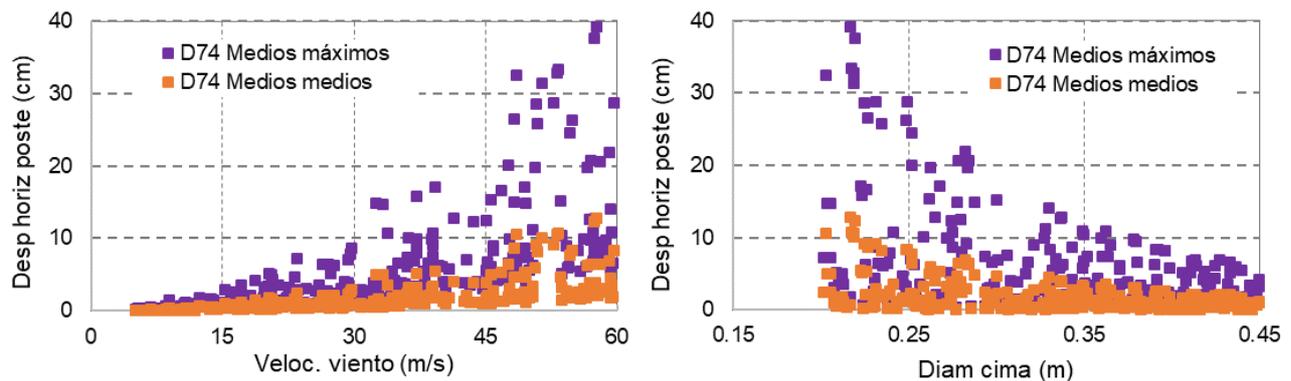


Figura 7: Influencia de las variables aleatorias principales sobre la respuesta del poste

4 CONCLUSIONES

Se analizó la estadística de la respuesta dinámica no lineal de una línea de transmisión eléctrica de media tensión soportada por postes de hormigón pretensado, solicitada por cargas permanentes y la acción del viento. La velocidad del viento se representó como miembros de un proceso estocástico a partir de la representación espectral con una función de densidad espectral de potencia y una función de coherencia para considerar la correlación espacial. El arribo aleatorio de ráfagas se modelizó como un proceso de Poisson. Las variables aleatorias se dividieron en principales y secundarias. Entre todos los parámetros de respuesta del sistema, en este trabajo se estudió la respuesta de los conductores mediante desplazamientos y fuerza de tracción, y del poste a través de su desplazamiento en la cima. Las principales conclusiones observadas para este ejemplo se resumen a continuación:

- Es más realista la generación de velocidades de viento mediante representación espectral, con la velocidad media horaria y arribo de ráfagas de 3 seg como proceso de Poisson.
- La división en variables aleatorias principales y secundarias permite un mejor tratamiento de las incertidumbres, que incluir todas las variables en un solo grupo.
- El análisis estadístico de la influencia de las variables aleatorias secundarias indica, para este caso, que se puede representar con una distribución Normal o distribución Uniforme, debido a que ambas distribuciones superan las pruebas de bondad de ajuste.
- La variable aleatoria principal que predomina en la respuesta de los conductores es la velocidad básica del viento, con poca participación de las otras variables. Por el contrario, en la respuesta del poste todas las variables principales influyen conjuntamente generando una significativa dispersión a considerar en los análisis de confiabilidad.
- A futuro, toda esta información se utilizará en la optimización de la estructura soporte, incluida la comparación con postes de madera.

REFERENCIAS

- Aguirre, M.A., Detke, F.R., Mercanti, J.A., Möller, O. “Interacción dinámica entre conductores y postes en líneas de transmisión eléctrica”. *Mecánica Computacional* Vol. XXXIII, pág. 3543-3557, AMCA, 2014.
- Ballaben J., Guzman M., Rosales M. (2011) “Parametric studies of guyed towers under wind and seismic loads”. *Mecánica Computacional*, Vol.XXX, pp-1019-1032, AMCA, 2011.
- Ballaben, J., Rosales, M.B. “Spectral representation method and its application to wind loads on a guyed tower” *MACI 4*, pp.465-468, 2013.
- Castro, H.G., De Bortoli, M.E., Paz, R.R., Marighetti, J.O. “Una metodología de cálculo para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción del viento” *Rev. Int. de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol.31, N° 4, pp.235–245, 2015.
- CIRSOC 102: Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones. INTI-CIRSOC, 2005
- Davenport A. G. “The application of statistical concepts to the wind loading of structures”, *Proc. Institution of Civil Engineers* Vol.23, pp.389–408, 1962.
- Davenport A.G. “Gust loading factors”, *J. Struct. Div. ASCE*, Vol.93(3), pp.11-34, 1967.
- Davenport A.G. “The dependence of wind load upon meteorological parameters”, *Int. Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, University of Toronto Press, Toronto*, pp. 19–82, 1968.
- Davenport A.G. “The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds”, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.87, pp.194–211, 1961.
- Detke, F.R., Duarte, J., Mercanti, J.A., Aguirre, M.A., Möller, O., “Influencia del costo por daños en optimización de estructuras para líneas de transmisión aérea”, *Memorias XXXVI Jor.Sud.Ing.Estruct.*, ID 046, Montevideo, Uruguay, 2014.
- Detke, F.R., Duarte, J., Pizzutti, H.D., Gruber, A.S., Morales, V.R., Vivanco, C.B., Golemba, J.L., Möller, O. “Optimización de postes de hormigón pretensado para líneas de transmisión eléctrica”. *Mecánica Computacional* Vol. XXXII, pág. 2097-2114, AMCA, 2013.
- Detke,F.R., Duarte,J.A., Möller,O. “Respuesta estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica en la provincia de Misiones, Argentina”. *Memorias XXII J.A.IE*, 029, 2012.
- Detke,F.R., Reinert,H.O., Duarte,J.A., Pizzutti,H.D., Fank,P.Y., Golemba,J.L., Möller,O. “Análisis estructural por elementos finitos aplicados a sistemas de transmisión eléctrica en la provincia de Misiones, Argentina”. *Mecánica Computacional* Vol. XXX, pág. 2651-2667, AMCA, 2011.
- Duarte, J., Mercanti, J., Golemba, J.L., Möller, O. “Modelo simplificado para líneas de transmisión eléctrica solicitadas por viento aleatorio”. *Memorias XXVII J.A.IE*, 072, 2022.
- García, D.A., Detke, F.R., Metrailler, M.A., Miranda, R., Mercanti, J.A., Möller, O. “Análisis estructural de postes para soporte de líneas de transmisión de energía eléctrica”. *Mecánica Computacional* Vol. XXXVI, pág. 901-910, AMCA, 2018.
- Mercanti, J.A., Duarte, J.A., Möller, O., Laria, D. “Rotación de bases prismáticas de hormigón para soportes de líneas de transmisión de energía eléctrica de media tensión”. *Memorias XXVIII J.A.IE*, ID 083, 2024.
- Mercanti,J.A., Pizzutti,H.D., Aguirre,M.A., Fank,P.Y., Möller,O. “Acción del viento como proceso estocástico aplicado a líneas de transmisión eléctrica”. *Mecánica Computacional* Vol. XXX, pág. 2719-2733, AMCA, 2011.
- Payán Serrano, O.J., Bojórquez Mora, E., Reyes Salazar, A. “Simulación de la componente longitudinal del viento por representación espectral y el análisis dinámico en edificios de cortante” *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, pp.1-18, 2014.
- Pizzutti, H.D., Aguirre, M.A., Mercanti, J.A., Möller, O. “Modelización del comportamiento estático y dinámico de cables conductores en líneas eléctricas”. *Mecánica Computacional* Vol. XXXII, pág. 2215-2235, AMCA, 2013.
- Shinozuka, M., Deodatis, G. “Simulation of stochastic processes by spectral representation” *Applied Mechanics Rev*, Vol.44, N° 4, pp.191-204, 1991.
- Shinozuka, M., Jan, C.M. “Digital simulation of random processes and its applications” *Journal of Sound and Vibration*, Vol.25 N° 1, pp.111-128, 1972.
- Zhang,J. Performance-based seismic design using designed experiments and neural networks, PhD. Thesis, *Department of Civil Engineering, University of British Columbia*, 2003.