

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE POSTES PARA SOPORTE DE LINEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

STRUCTURAL ANALYSIS OF UTILITY POLES FOR ELECTRIC ENERGY TRANSMISSION

**Diego A. García^{a,b}, Fernando R. Detke^a, Maia A. Metrailler^a, Ricardo Miranda^a, Julio
Mercanti^a y Oscar Möller^c**

^a*Departamento de Ingeniería civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Rosas
325, Oberá, Misiones, Argentina, detke@fiobera.unam.edu.ar*

^b*Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina*

^c*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y
Berutti, 2000 Rosario, Argentina, moller@fceia.unr.edu.ar*

Palabras clave: Sistemas de transmisión de energía eléctrica, Madera, Modelo numérico, Acción dinámica del viento.

Resumen. Se presenta en este trabajo un modelo numérico para representar el comportamiento de estructuras soporte de líneas de transmisión de energía eléctrica de media tensión en la Provincia de Misiones. La estructura soporte está formada por el poste y su fundación, mientras que los conductores, cable de guardia, cadenas de aisladores y crucetas metálicas son considerados como cargas. Además de estas últimas, se introduce la carga generada por la acción dinámica del viento sobre la estructura, la cual será considerada como un proceso estocástico. El modelado numérico de la estructura se realiza en un software comercial. El poste considerado está hecho de madera. La respuesta estructural se evalúa en términos de desplazamientos en la cima del poste y tensiones en la línea de tierra o empotramiento. El objetivo del presente trabajo es obtener resultados que permitan, en una etapa posterior, realizar una optimización comparativa con restricciones de confiabilidad.

Keywords: Electric Power Transmission Systems, Timber, Numerical model, Dynamic wind action.

Abstract. A numerical model is presented in this work to represent the behaviour of utility poles for electric energy transmission in the Province of Misiones. The support structure is formed by the post and its foundation, while the conductors, guard wire, insulators chains and metal cross braces are considered as loads. In addition, the load generated by the dynamic action of the wind on the structure is introduced and considered as a stochastic process. The numerical modeling of the structure is carried out in commercial software. The considered pole is made of wood. The structural response is evaluated in terms of displacements at the top of the pole and stresses in the earth line. The objective of this paper is to obtain results that allow, at a later stage, a comparative optimization with reliability restrictions.

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca dentro del proyecto de investigación del Departamento de Ingeniería Civil de la 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 del comportamiento estructural de estructuras soporte de madera. La literatura técnica informa de los estudios que se vienen realizando a nivel internacional, con mayor intensidad desde los años 80’, con aportes al conocimiento del comportamiento estructural de líneas de transmisión sometidas a la acción de cargas aleatorias, de su respuesta ante acciones dinámicas producidas por acción de viento y sismos, y de modernos enfoques de análisis de confiabilidad en presencia de variables de comportamiento no determinístico. En [Natarajan y Santhakumar \(1995\)](#) se realizaron abordajes probabilísticos en el estudio de torres de transmisión con el objeto de obtener conocimiento de la confiabilidad del sistema estructural adoptado. En [Rao \(1995\)](#) se desarrolló una metodología para la optimización de torres de transmisión. [Desai et al. \(1995\)](#) desarrollaron una formulación completa de un elemento finito de cable, en sus estudios de galope de conductores de líneas de transmisión, abordando desde entonces las no linealidades físicas y geométricas, así como el amortiguamiento no lineal. El colapso de torres de transmisión bajo acción del viento, fue analizado en [Rodrigues \(1999\)](#), avanzando hasta la modelación del conjunto torre-cadenas de aisladores-conductores. Más tarde, [Rodrigues \(2004\)](#) 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, en [Oliveira \(2006\)](#) se utilizó 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.

En [Detke et al. \(2011\)](#) y [Mercanti et al. \(2011\)](#) se aborda el estudio del comportamiento de estructuras de soporte de líneas de transmisión eléctrica de 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. Particularmente, en este trabajo se aborda el estudio de la respuesta estructural de postes de madera de *Eucalyptus grandis* modelados numéricamente. Relacionados a este tipo de postes, en [Torrán et al. \(2009\)](#) se presentan resultados de ensayos estáticos realizados en postes para determinar su resistencia a flexión y su módulo de elasticidad. Los resultados de estos ensayos fueron volcados luego en el Reglamento Argentino de Estructuras de Madera [CIRSOC 601 \(2016\)](#). En [González de Paz et al. \(2017\)](#) se presenta un modelo numérico que considera la variabilidad en las propiedades del material y en la carga estocástica del viento.

En este trabajo se presenta un estudio numérico realizado en el software comercial ABAQUS acerca del comportamiento estructural de postes de madera para líneas de media tensión. Las propiedades del material se consideraran según su distribución de probabilidad y las cargas actuantes según los lineamientos de la normativa. De esta manera se compararan los resultados de desplazamientos máximos en la cima del poste con los límites establecidos por la Asociación Electrotécnica Argentina ([AEA 95301, 2007](#)) y de tensiones máximas en la línea de empotramiento con resultados experimentales reportados en [Torrán et al. \(2009\)](#). Una vez examinado los resultados con el modelo estático de carga de viento, se procede a modelar la carga de viento mediante un proceso estocástico variable en el tiempo y en el espacio. Como resultado de estudio se obtienen las velocidades para las cuales existe una mayor probabilidad de falla del sistema en términos de desplazamientos máximos y de tensiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sistema estructural a estudiar está formado por el poste de madera de *Eucalyptus grandis* con su vinculación correspondiente y las cargas originadas por el peso de los conductores y la acción del viento considerará en forma estática y dinámica. En las siguientes secciones se presenta cada uno de los componentes del sistema estructural en estudio.

2.1. Descripción del poste de madera y de las cargas transmitidas por los cables conductores

Las dimensiones adoptadas para el análisis son para un poste de madera utilizado en las redes eléctricas de Misiones: diámetro medio adoptado de 0.106 m, 14 m de altura total del poste, 2.4 m del mismo se encuentra bajo tierra y 11.6 m desde la línea de empotramiento hasta su extremo superior. Como así también las cargas son de las líneas eléctricas construidas por EMSA (Electricidad de Misiones Sociedad Anónima). Las cargas consideradas propias del sistema soporte son: peso de cruceta igual a 297.73 N; peso del hilo de guardia igual a 300.19 N; peso del conductor, de los herrajes, aisladores y morquetas igual a 754.88 N y el peso del poste igual a 3482.55 N. Además, en el análisis de cargas se consideró el momento flector generado por la distancia de aplicación de estas cargas puntuales. En la Fig. 1 se presenta un esquema de la vinculación de los conductores eléctricos con la parte superior del poste.

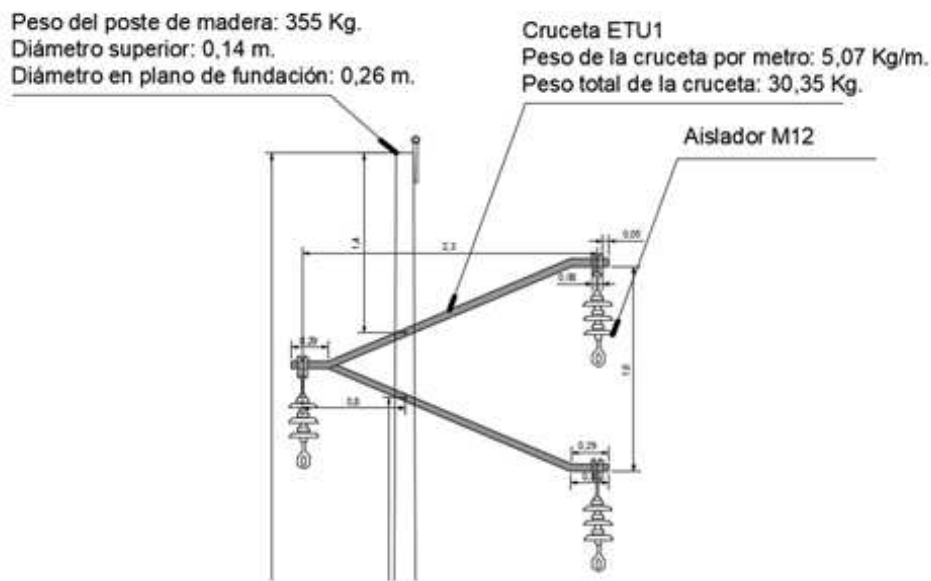


Figura 1: Esquema de vinculación entre líneas de energía eléctrica de media tensión y el poste de madera.

2.2. Descripción de la carga de viento

El análisis de las cargas de viento se realizó conforme a lo especificado en el Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones (CIRSOC 102, 2005). Partiendo de la fórmula de presión:

$$q_z = 0,613 \times K_Z \times K_{ZT} \times K_D \times V^2 \times I \quad (1)$$

en donde: q_z es la presión dinámica, 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. Para la selección del factor de exposición K_Z , se consideró el tipo de exposición C el cual corresponde a terrenos abiertos con obstrucciones dispersas, con alturas generalmente menores que 10 m. Esta categoría incluye campo abierto plano y terrenos agrícolas. El factor topográfico K_{ZT} , tiene un valor igual a 1, porque la topografía es llanura por hipótesis. El factor de direccionalidad del viento K_D vale 0,85. La velocidad básica del viento V , se plantea como variable y obteniendo resultados para 4 valores de velocidad diferentes (5, 10, 15 y 20 m/s). El factor de importancia I se consideró igual a 1,15. Además, del mismo reglamento extraemos la fórmula siguiente para el cálculo de la fuerza debido a la acción del viento:

$$F_z = q_z \times G \times C_F \times A_F \quad (2)$$

en donde: G es el factor de efecto de ráfaga considerado igual a 0,85, C_F es el coeficiente de fuerza neta igual a 2 y A_F es el área proyectada normal al viento.

2.3. Descripción de las propiedades materiales consideradas para el poste de madera

La madera utilizada en este tipo de estructuras soporte de líneas de energía eléctrica de media tensión es el *Eucalyptus grandis*, cuyos parámetros materiales se hallan estipulados en el Reglamento CIRSOC 601 (2016). En el estudio se utilizan el valor medio del Módulo de Elasticidad (ME) igual a 9500 N/mm², el percentil 5 % igual a 6400 N/mm² y el percentil 95 % igual a 12600 N/mm². Además, durante la simulación numérica se verifica que la máxima tensión en la sección no sobrepase los valores reportados en Torrán et al. (2009).

2.4. Descripción de las condiciones de vinculación consideradas para el poste

Para contemplar el vínculo que difiere de un empotramiento perfecto en el plano suelo-poste, se recurre a incluir una serie de restricciones al movimiento que impone el suelo a la estructura (Richart et al., 1970). Las expresiones consideran el módulo de Elasticidad del suelo (E_f) adoptado igual a 20000 kPa, el módulo de Poisson del suelo (μ_f) igual a 0,28 y el ancho $2b$ de la fundación que actúa de soporte. En este caso, para la base se adopta un cuadrado de 1m por 1m. Para las restricciones rotacionales, de desplazamiento vertical y de desplazamiento horizontal, se tienen las siguientes expresiones, respectivamente:

$$k_\theta = \frac{2 \times E_f \times b^3}{(1 + \mu_f)(1 - \mu_f)} \quad (3)$$

$$k_V = \frac{4,3 \times E_f \times b}{2 \times (1 + \mu_f)(1 - \mu_f)} \quad (4)$$

$$k_H = 2 \times E_f \times b \quad (5)$$

Se adoptan 4 casos de condición de vínculo: en la primera de ellas se asume un empotramiento perfecto (CASO 1), en el segundo caso establece la posibilidad de giro a través de implementar un resorte rotacional ubicado en la base del poste (CASO 2). El tercer caso asume, además del resorte rotacional, un resorte en la dirección horizontal (CASO 3), mientras que en la última de las posibilidades se contempla además la presencia de un resorte en la dirección vertical (CASO 4).

2.5. Modelo estocástico de carga de viento

Para reproducir la carga dinámica estocástica producida por la acción del viento, es necesario reproducir un registro temporal de velocidades. Este registro está compuesto de dos contribuciones: la primera es una variable aleatoria fluctuante con la posición y el tiempo; la segunda contribución es un valor medio determinístico que varía únicamente según la posición en la altura del poste. La componente fluctuante de la velocidad del viento se obtiene a través del Método de Representación Espectral (MRE) propuesto por [Shinozuka y Deodatis \(1991\)](#). El método requiere como elementos de partida el espectro de frecuencias y la función de coherencia. Luego, se crean las señales aleatorias como una superposición de funciones armónicas con ángulos de fase aleatorios, ponderados por coeficientes que representan la importancia de la frecuencia de la función dentro del espectro y considera la correlación espacial. Siguiendo la metodología, consideramos un conjunto de m procesos aleatorios gaussianos estacionarios $f_j^0(t)$, con media cero $E[f_j^0(t)] = 0$ y con una matriz de densidad espectral cruzada $S^0(w)$ la cual es una matriz Hermitiana y definida positiva. Si la matriz triangular inferior $H(w)$ es definida como una matriz cuya transformada de Fourier existe y satisface la relación:

$$S^0(w) = H(w)\bar{H}^T(w) \quad (6)$$

en donde la barra superior indica complejo conjugado y el superíndice T indica transpuesto, el proceso puede ser simulado por la siguiente serie:

$$f_j(t) = \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^N |H_{jk}(w_n)| \sqrt{2\Delta w} \cos[\hat{w}_n t + \theta_{jk}(w_n) + \Phi_{kn}] \quad (7)$$

donde Δw es el intervalo de frecuencia con el que se discretiza el espectro de frecuencia, $w_n = \Delta w(n-1)$, $\hat{w}_n = w_n + \psi_{kn}\Delta w$, ψ_{kn} es un valor aleatorio con distribución uniforme entre 0 y 1, N es la cantidad de intervalos en que fue discretizado el espectro de frecuencia y Φ_{kn} son ángulos de fase aleatorios e independientes uniformemente distribuidos entre 0 y 2π . La aplicación del MRE requiere la adopción de una función de densidad espectral y de una función de coherencia. Para la primera de ellas se adopta la sugerida por Davenport ([Dyrbye y Hansen, 1997](#)):

$$R_N(z, w) = \frac{2}{3} \frac{f_L^2}{(1 + f_L^2)^{4/3}} \quad (8)$$

en donde f_L es la frecuencia adimensional

$$f_L = w \frac{L_u}{U(z)} \quad (9)$$

siendo L_u la longitud de escala de turbulencia (1200 m) y $U(z)$ es la velocidad media del viento que depende de la altura ([CIRSOC 102, 2005](#)). La función de coherencia adoptada es la siguiente:

$$Coh(z_i, z_j, w) = \exp \left\{ -2w \frac{C_z |z_i - z_j|}{U(z_i) + U(z_j)} \right\} \quad (10)$$

en donde z_i y z_j son las alturas de dos puntos dados en el poste. Luego, cada elemento S_{ij} de la matriz $S(w)$ para un determinado valor de frecuencia puede ser calculado como:

$$S_{ij}(z_i, z_j, w) = \sqrt{S(z_i, w)S(z_j, w)} Coh(z_i, z_j, w) \quad (11)$$

Una vez que las matrices $H(w)$ son halladas, es posible construir las series temporales de la componente fluctuante de la velocidad del viento $u(z_j, t)$ para cada altura z_j :

$$u(z_j, t) = \sum_{k=1}^m \sum_{n=1}^N |H_{jk}(w_n)| \sqrt{2\Delta w} \cos[\hat{w}_n t + \theta_{jk}(w_n) + \Phi_{kn}] \quad (12)$$

3. RESULTADOS NUMÉRICOS

Luego de realizado un estudio de convergencia, el poste de madera fue discretizado utilizando 20 elementos viga bajo la formulación de Euler-Bernoulli con 2 nodos y 2 grados de libertad por nodo. Las cargas concentradas debido al efecto de los cables fueron aplicadas en correspondencia con la Fig. 1 y las cargas debidas a la acción del viento en los nodos de los elementos viga.

La AEA 95301 (2007) dispone de límites o desplazamientos horizontales máximos admisibles. Para estructuras de retención el límite es 3.5% de la altura poste, mientras que para estructuras de suspensión la limitación aumenta al 6% de la altura del poste. Con estos valores se comparan los desplazamientos que sufre la estructura ante las cargas actuantes. En el caso del poste en estudio los límites para los desplazamientos horizontales son iguales a 0.406 m y 0.696 m para estructuras de retención y suspensión, respectivamente. En la Fig. 2 se muestran los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 5 m/s. Se puede observar que los resultados considerando los distintos valores del ME (E0.05, Em y E0.95) se encuentran por debajo de los límites establecidos por la AEA para postes de retención y de suspensión. Indicando esto una muy baja probabilidad (casi nula) de superar dichos límites. También se observa que los desplazamientos aumentan ligeramente en los casos de vinculación 2, 3 y 4; pero la diferencia entre ellos es despreciable al igual que la diferencia entre los resultados para estas restricciones y las obtenidas considerando empotramiento perfecto (Caso 1).

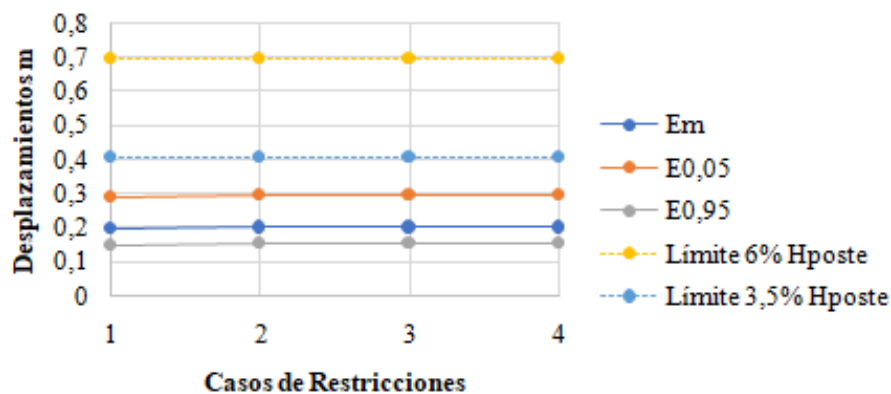


Figura 2: Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 5 m/s con los límite establecidos por la AEA considerando distintos valores del ME y casos de restricciones.

En la Fig. 3 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 10 m/s, se puede observar que hay una baja probabilidad ligeramente inferior al 5 % de superar los desplazamientos máximos en el caso de estructuras de retención. En la Fig. 4 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad del viento de 15 m/s, en este caso se observa una probabilidad superior al 5 % de superar los desplazamientos máximos en el caso de estructuras de retención. En la Fig. 5 se presentan los resultados obtenidos para una velocidad del viento de

20 m/s, se puede observar que una probabilidad superior al 50 % de superar los desplazamientos máximos en el caso de estructuras de retención, lo cual ya implica un alto riesgo para asegurar la efectividad del servicio de transmisión de energía eléctrica. Cabe mencionar que en ningún caso se superó el límite establecido para estructuras de suspensión, aunque se obtuvieron grandes desplazamientos para las velocidades del viento mayores consideradas. Según la escala Fujita de clasificación de tornados, la velocidad del viento para un tornado que produce daños leves (EF0) se encuentra en el rango entre 29 m/s y 38 m/s. Lo cual indica que el límite superior de velocidad adoptado representa un evento menor pero de magnitud considerable. El límite inferior de velocidad del viento considerado (5 m/s) es cercano a la velocidad de viento media anual reportada en el Aeropuerto de Posadas (Aires et al., 2012).

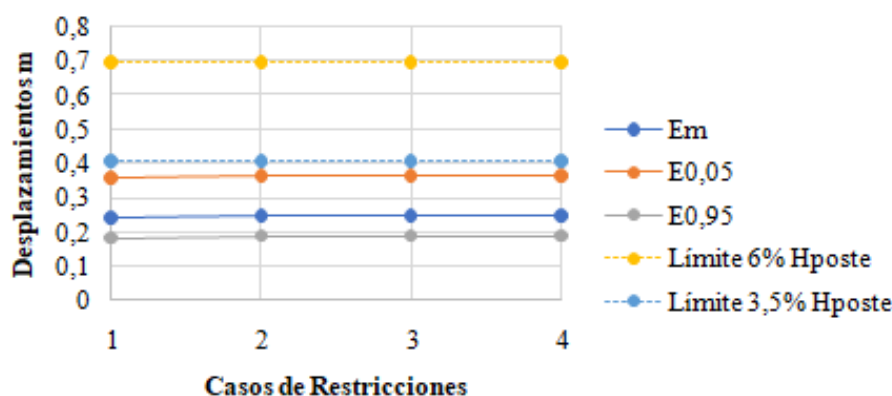


Figura 3: Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 10 m/s con los límites establecidos por la AEA considerando distintos valores del ME y casos de restricciones.

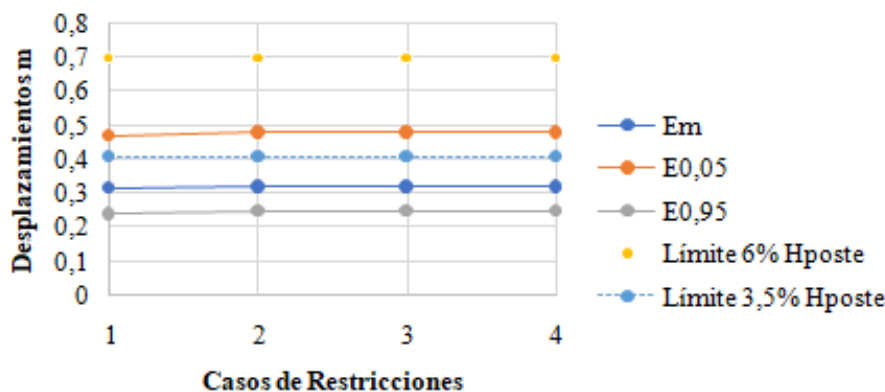


Figura 4: Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 15 m/s con los límites establecidos por la AEA considerando distintos valores del ME y casos de restricciones.

En la Fig. 6 se muestran las tensiones máximas obtenidas en la línea de empotramiento del poste con el suelo para las distintas velocidades consideradas. En comparación con los resultados de ensayos experimentales en postes de *Eucalyptus grandis* reportados en Torrán et al. (2009) para dos muestras de postes con valores característicos de resistencia a flexión (percentil 5 %) en el momento de la rotura del poste que varían entre 43.9 y 49.9 N/mm², valores medios que varían entre 56.3 y 62.9 N/mm² y valores máximos que varían entre 70.2 y 77.7 N/mm²; se observa que las tensiones obtenidas se encuentran lejanas a las reportadas. Sin

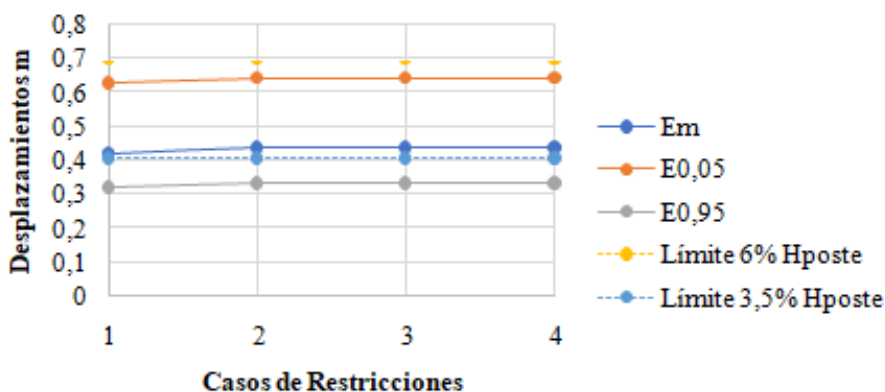


Figura 5: Comparación de los desplazamientos obtenidos en la cima del poste para una velocidad del viento de 20 m/s con los límites establecidos por la AEA considerando distintos valores del ME y casos de restricciones.

embargo, se encuentran cercanas al límite de 8.8 N/mm² definida en el CIRSOC 601 (2016) como valor de diseño para postes de madera.

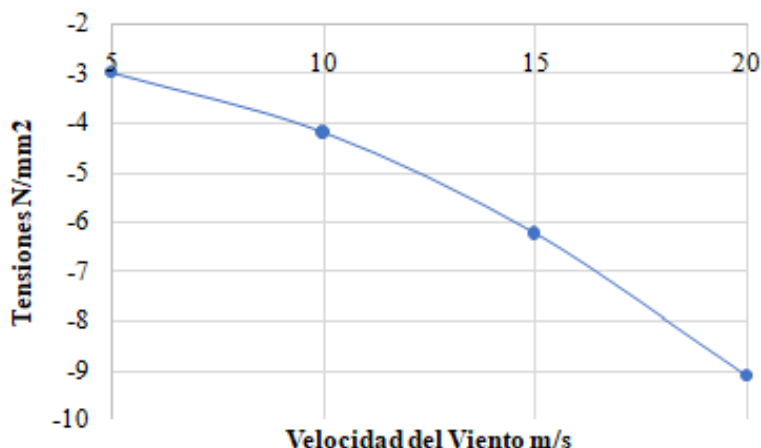


Figura 6: Comparación de las máximas tensiones obtenidas en la línea de empotramiento del poste para los distintos valores de velocidad del viento considerados.

En la Fig. 7, se muestran 10 registros de desplazamientos obtenidos simulando la carga del viento como un proceso estocástico para una velocidad media del viento de 10 m/s. Se consideró para este análisis un tiempo total de 300 s. En la misma se compara con el valor de desplazamiento obtenido utilizando el método de carga estática equivalente. El análisis dinámico se realizó considerando un amortiguamiento de 1 % proporcional a la rigidez y a la masa. Como propiedad material se utilizó el valor medio del ME. A través del modelo con carga dinámica se obtuvieron valores máximos de desplazamiento que varían entre 0.341 m y 0.377 m que siguen siendo inferiores al límite de 0.4 m establecido por la AEA. En relación a las tensiones se obtuvieron valores máximos de tensiones en la línea de empotramiento que varían entre 7.44 N/mm² y 8.1 N/mm² los cuales están lejos a los valores de Torrán et al. (2009) pero muy cercanos al límite de 8.8 N/mm² definido en el CIRSOC 601 (2016) como valor de diseño. Es de esperarse que al utilizar valores menores del ME o valores mayores de velocidad del viento se supere el límite de desplazamientos y la tensión establecida en el reglamento.

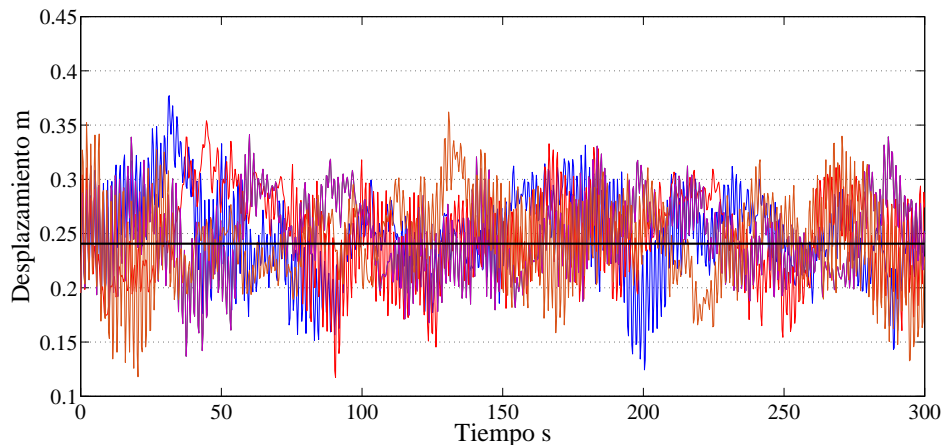


Figura 7: Desplazamientos obtenidos utilizando el modelo de carga estocástica dinámica del viento.

4. CONCLUSIONES

Considerando las limitaciones establecidas por los entes reguladores de este tipo de elementos, se debe prestar atención al aumento de importante magnitud de los desplazamientos a medida que la velocidad del viento aumenta desde valores que pueden observarse comúnmente hasta aquellos que suelen presentarse con menor frecuencia, el límite correspondiente a estructuras de retención puede verse superado por velocidades del orden de 15 m/s y superiores, mientras que las limitaciones para estructuras de suspensión no se ven sobrepasadas para el rango de intensidades elegido. Se puede observar que, para los distintos Módulos de Elasticidad de la madera contemplados y establecidos por el reglamento CIRSOC 601, las curvas de desplazamientos ante la variación de las rigideces de la base, presentan similitudes de forma, pero son mayores cuando el módulo se reduce. Los desplazamientos dados para una determinada velocidad del viento son similares para las diferentes condiciones de rigidez de la base del poste que se han planteado como hipótesis, y van en aumento al incrementarse la magnitud de la velocidad del viento. A partir de una velocidad del viento de 10 m/s empiezan a crecer las probabilidades de superar los límites de desplazamiento. En cuanto a las tensiones en la sección de contacto con el suelo, aumentan conjuntamente la velocidad y comparando con los resultados publicados por otros autores y a la vista de los resultados numéricos presentados en el presente trabajo se observa que para una velocidad del viento comprendida entre 10 y 15 m/s hay una alta probabilidad de alcanzar los valores de diseño establecidos en la reglamentación Argentina.

Trabajos futuros deben incluir la variabilidad espacial de la representación estocástica de la fuerza del viento, la inclusión en el modelo de los cables conductores, la realización de un estudio estocástico y además la consideración de modelos materiales mas complejos. Igualmente, los resultados presentados en este trabajo constituyen un punto de partida para el estudio del comportamiento estructural de postes de madera de *Eucalyptus grandis* los cuales son muy utilizados en la provincia de Misiones.

REFERENCIAS

- AEA 95301. *Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media tensión y alta tensión*. Asociación Electrotécnica Argentina, 2007.
- Aires M., De Bortoli M., Frigerio E., y Roko S. Estimación de potencial eólico de la provincia de misiones. 2012.

- CIRSOC 102. *Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires, 2005.
- CIRSOC 601. *Reglamento Argentino de Estructuras de Madera*. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)- Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC), Buenos Aires, 2016.
- Desai Y., Yu P., Popplewell N., y Shah A. Finite element modelling of transmission line galloping. *Computers and structures*, 57(3):407–420, 1995.
- Detke F., Reinert H., Duarte J., Pizzutti H., Fank P., Golemba J., y Möller O. Análisis estructural por elementos finitos aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica en la provincia de misiones, argentina. *Mecánica Computacional*, 30:2651–2667, 2011.
- Dyrbye C. y Hansen S.O. *Wind loads on structures*. 1997.
- González de Paz L.V., García D.A., y Rosales M.B. Reliability of wood utility poles under stochastic wind load and material considering knots. *Mecánica Computacional, Volume XXXV. Number 21. Uncertainty Quantification and Stochastic Modeling (A)*, 2017.
- Mercanti J., Pizzutti H., Aguirre M., Fank P., y Möller O. Acción del viento como proceso estocástico aplicado a líneas de transmisión de energía eléctrica. *Mecánica Computacional*, 30:35, 2011.
- Natarajan K. y Santhakumar A. Reliability-based optimization of transmission line towers. *Computers & structures*, 55(3):387–403, 1995.
- Oliveira M. Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento. 2006.
- Rao G.V. Optimum designs for transmission line towers. *computers and Structures*, 57(1):81–92, 1995.
- Richart F.E., Hall J.R., y Woods R.D. *Vibrations of soils and foundations*. 1970.
- Rodrigues R. Colapso de torres tee sob ação do vento. 1999.
- Rodrigues R. *Mecânica do colapso aeroelástico de torres TEE*. Tesis de Doctorado, 2004.
- Shinozuka M. y Deodatis G. Simulation of stochastic processes by spectral representation. *Applied Mechanics Reviews*, 44(4):191–204, 1991.
- Torrán E., Zitto S., Cotrina A., y Piter J.C. Bending strength and stiffness of poles of argentinean eucalyptus grandis. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 11(1):71–84, 2009.