

INTERACCIÓN DINÁMICA ENTRE CONDUCTORES Y POSTES EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA

Aguirre, Miguel A.^a, Detke, Fernando R.^a, Mercanti, Julio A.^a, Möller, Oscar^b

^a *Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Juan Manuel de Rosas 325, 3360 Oberá, Argentina, Detke@fio.unam.edu.ar*

^b *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina.*

Palabras claves: Sistemas de transmisión, Dinámica estructural, Cables, Interacción.

Resumen. La modelización numérica de estructuras para sistemas de transmisión de energía eléctrica es un tema complejo por las marcadas diferencias de comportamiento de sus elementos componentes: fundación, postes, crucetas y ménsulas, cadenas de aisladores, y cables conductores y de guardia. En la región de Misiones, las acciones más significativas son las tormentas de viento, además de las cargas permanentes, que originan fallas e interrupción de servicio a gran cantidad de personas e instalaciones productivas. La respuesta dinámica de cables y cadenas de aisladores, frente a la presión del viento variable en el tiempo y en el espacio, es también influenciada por la propia respuesta del poste y fundación. En este trabajo se estudia dicha interacción dinámica con el objetivo de cuantificar la influencia y calibrar parámetros que permitan decidir cuándo es necesario analizar el modelo completo y cuando es posible desacoplarlos. El modelo desacoplado consiste en analizar primero el cable y cadena de aisladores con extremos fijos, y luego en una segunda etapa analizar el poste y fundación con la reacción dinámica obtenida en el extremo fijo de la cadena de aisladores. En las aplicaciones numéricas sobre una línea de 132 Kv, vanos de 250m y postes de suspensión de hormigón pretensados, se obtienen interesantes resultados que aportan al conocimiento sobre la modelización de esta tipología estructural.

1 INTRODUCCIÓN

La estabilidad de sistemas estructurales de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, situadas en áreas subtropicales con reducido riesgo sísmico, se ve fuertemente influenciada por la ocurrencia de fenómenos meteorológicos del tipo tormentas de viento, ocasionando, en algunos casos, diversos tipos de daños al sistema.

Con el fin de procurar avances en procesos de optimización del diseño, el modelo estructural estudiado representa numéricamente el comportamiento, bajo la acción aleatoria del viento, de la fracción de un sistema de líneas de transmisión con nivel de tensión nominal de 132 kV, modalidad característica en los proyectos implementados en la Provincia de Misiones, conforme se observa en la [Figura 1](#).



Figura 1: Línea de 132kV. Aristóbulo del Valle, Provincia de Misiones, Argentina.

Estas acciones que resultan de la integración de presiones actuantes sobre las superficies incidentes de los componentes del sistema, presentan un carácter no determinístico, pues derivan de la velocidad del viento, problema que se abordó con adecuada aproximación a través de su consideración como procesos aleatorios o estocásticos ([Mercanti et al., 2011](#)).

El sistema estructural simplificado, en estudio, está constituido por dos vanos consecutivos, delimitados por tres soportes en suspensión simple (postes de hormigón pretensado, con cruceta y ménsulas de hormigón armado), tres conductores de fase con sus correspondientes cadenas de aisladores y un cable de protección contra descargas atmosféricas (cable de guardia), sustentados en fundaciones directas en monobloques de hormigón simple, que transmiten sus esfuerzos al suelo de fundación (suelo colorado).

En una primera etapa de estudio se abordó el análisis estructural a partir de la modelación digital en el software de elementos finitos [SAP 2000 Versión 14.2.2](#), y cuya discretización se ilustra en el “*Modelo I*” de la [Figura 2](#) ([Detke et al., 2010 y 2011](#)).

En dicho modelo los componentes del sistema estructural estudiado se dividen en dos grupos:

a) Elementos simulados en forma de acción externa, compuestos por crucetas y ménsulas de hormigón armado, conductores eléctricos, cadenas de aisladores y cable de guardia.

b) Elementos que constituyen el modelo computacional, formados por poste de hormigón armado y pretensado, base de hormigón simple y suelo de fundación.

Respecto a las acciones gravitatorias de los elementos del grupo a) son modeladas como una masa aplicada y reducida a la cima del poste, reproduciendo las propiedades mecánicas y de comportamiento características de los cables bajo la acción del peso propio, con límites

máximos reglamentarios de flecha en el centro de los vanos, y la fuerza de tiro correspondiente en sus extremos.

El efecto dinámico del viento aplicado sobre el modelo (elementos del grupo b), se reduce a una carga puntual, dependiente del tiempo, ubicada en la cima del poste. Esta carga produce el mismo esfuerzo instantáneo de flexión en el pie del poste que la acción distribuida en todo el modelo.

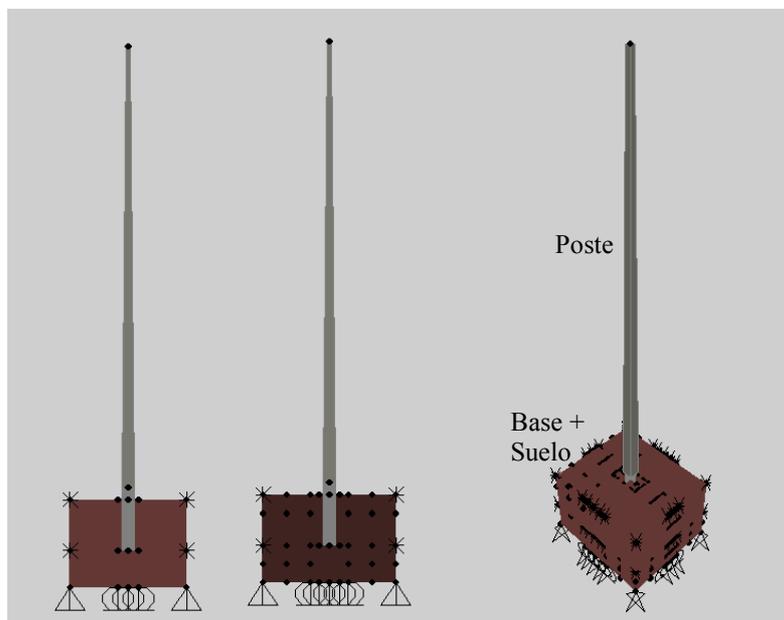


Figura 2: Modelo 1.

Para cuantificar la acción del viento a aplicar se utilizan distintas hipótesis dependiendo del elemento considerado. Así, para el caso del poste, se obtiene una carga que representa al diagrama de presiones exponencial.

En cuanto para los cables (conductores e hilo de guardia), el frente de ráfagas se discretiza en bandas o fajas de 50.00 m de ancho, considerando la correlación espacial y temporal en la dirección transversal y las distintas alturas medias de cada tramo de cable según se muestra en la Figura 3 (Detke et al., 2012).

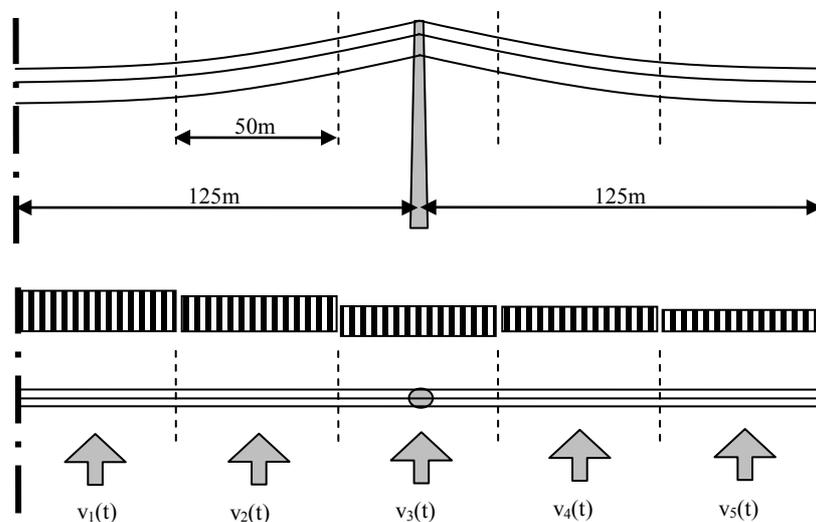


Figura 3: Acción del viento sobre cables.

Con el fin de incluir los elementos de cable (conductores e hilo de guardia) al sistema nombrado anteriormente, en un trabajo anterior (Pizzutti et al., 2013) se analizaron las disponibilidades del software SAP 2000 para simular tales componentes frente a las acciones dinámicas del viento. Para ello se realizaron diversas pruebas y se las verificaron con resultados analíticos. Como resultado de dicho trabajo se desarrolló un modelo de conductor compuesto por 20 segmentos de cable y una barra recta en cada extremo vinculada a apoyos fijos como representativas de las cadenas de aisladores.

Las acciones que se consideraron en la modelación se dividen en estáticas, constituida por el peso propio de los elementos, y dinámicas producidas por la acción del viento, cuya generación supuso un proceso estocástico, la correlación temporal y espacial a lo largo de la línea y solamente la componente del viento horizontal y perpendicular a la misma como significativa.

Además se tomaron en cuenta los efectos de amortiguamiento del sistema a través de la matriz de Rayleigh y la tensión límite de compresión igual a cero para la cadena de aisladores.

Con el objetivo de encontrar el modelo que contemple en forma más eficiente las interacciones dinámicas entre los distintos componentes estructurales del sistema, se presentan en este trabajo, algunas respuestas mostradas en forma comparativa de dos nuevos modelos computacionales analizados con el software SAP 2000, un modelo desacoplado y el otro completo.

Se presenta además el estudio realizado para adoptar el modelo de cadenas de aisladores, como así también el mecanismo que representará la continuidad del sistema más allá de los dos tramos de línea de transmisión de energía estudiados.

2 MODELIZACIÓN

2.1 Mecanismo de continuidad estructural

Con vistas a simular la continuidad de la línea, dada la complejidad que significaría modelar varios tramos y los excesivos tiempos de procesamiento que conllevarían, se procedió a implementar resortes (Desai et al., 1995) que representen tanto a los conductores como a la cadena de aisladores y las variantes pertinentes (Ribeiro de Oliveira, 2006).

Se analizaron los elementos disponibles en el programa SAP 2000 para modelar resortes (Link/Support y Springs) y se materializaron las diversas posibilidades. Como modelo de referencia se adoptó un conductor con sus respectivas cadenas de aisladores y diez vanos de línea. Para contemplar las situaciones extremas se dejaron libres las articulaciones que unen el cable y la cadena de las puntas, en un primer caso, y se colocaron apoyos móviles en dichos puntos, en el segundo. De los resultados se decidió descartar las alternativas que suponían modelar tanto el conductor como la cadena de aisladores con resortes pues sus respuestas diferían significativamente de las de referencia. Luego resultaron tres modelos posibles, los cuales se describen a continuación:

- Modelo compuesto por dos vanos de conductor y tres cadenas de aisladores, con un resorte del tipo “Springs” en los extremos para simular la continuidad del cable, para el cual la rigidez longitudinal resulta de la expresión (1).

$$k_L = \left(\frac{L}{EA} + \frac{p_z^2 L_x^3}{12 H^3} \right)^{-1} \quad (1)$$

donde $L = 250.5219$ m es la longitud total del cable; $A = 0.0002825$ m² el área de la sección transversal del cable; $E = 77000000$ KN/m² el módulo de elasticidad; $p_z = 0.00981$ KN/m el peso específico del cable; $L_x = 250.00$ m la dimensión de la proyección horizontal del cable; y $H = 10.9546$ KN la componente horizontal de la tracción estática.

Al reemplazar estos valores en la ecuación (1) se llega a que el coeficiente de rigidez longitudinal del resorte es 9.3599 KN/m, el cual se utiliza para todos los conductores.

- Modelo compuesto por dos vanos de conductor y tres cadenas de aisladores, con un resorte del tipo “Link/Support” lineal en los extremos para simular la continuidad del cable, al cual también se le asignó la rigidez de la expresión (1).

- Modelo compuesto por dos vanos de conductor y tres cadenas de aisladores, con un apoyo de primera especie que restringe el movimiento en la dirección del cable.

Como variante adicional de cada modelo se probó con asignar la mitad de la sección de los aisladores de los extremos y masas correspondientes a la mitad del arco del cable en los puntos que conecta el resorte o el apoyo móvil, según el caso.

Para que sea fácilmente apreciable la comparación y a la vez más general, la acción dinámica sobre los cables consistió en una rampa a la cual se le superpuso cuatro ciclos de seno aplicados en un vano y cuatro ciclos de coseno en el otro. Esto se condice con las series de viento generadas en forma aleatoria pues también están desfasadas debido a la correlación espacial y temporal.

Luego de obtener las reacciones en cada dirección de los modelos ya nombrados, se procedió a calcular el coeficiente de variación promedio respecto de la media de los modelos de referencia y así determinar el que mejor se ajusta. Con este análisis se llegó a que los modelos con resortes del tipo “Link/Support” se ajustan mejor como se puede observar en la [Figura 4](#), sin embargo en los apoyos extremos se presentaban reacciones verticales con valores elevados (entre 105 KN y 140 KN), según el modelo.

Los modelos con resortes del tipo “Springs” presentan un mayor desvío, pero siguen la forma de las curvas de referencia en la mayor parte del tiempo como se aprecia en la [Figura 4](#), además de presentar valores muy cercanos a los analíticos en los apoyos extremos.

Por último, los modelos con apoyos móviles, en vez de resortes, acompañan bastante bien al modelo de referencia con apoyo móvil, según se aprecia en la [Figura 4](#), pero presentan desvíos superiores a los demás modelos.

2.2 Cadena de aisladores

A la cadena de aisladores se las modeló tanto con elemento Cable como con elemento de Barra (Frame) y se comparó con los períodos fundamentales de un péndulo físico y de un péndulo doble. Así, si bien los valores diferían significativamente por las simplificaciones, se pudo constatar que el modelo compuesto por elementos Cable se aproximaba mejor en ambos casos, además de no tomar compresión ni flexión lo cual se condice suficientemente con la realidad.

Como prueba adicional se hicieron comparaciones entre modelos de conductores con sus respectivas cadenas de aisladores, a las cuales se les fue variando el número de segmentos de cable. Para este trabajo se comparan las reacciones en el apoyo central de la línea para los casos con cuatro, dos y un segmento de cable. Cabe hacer notar que el tiempo computacional se incrementa significativamente con el aumento del número de segmentos.

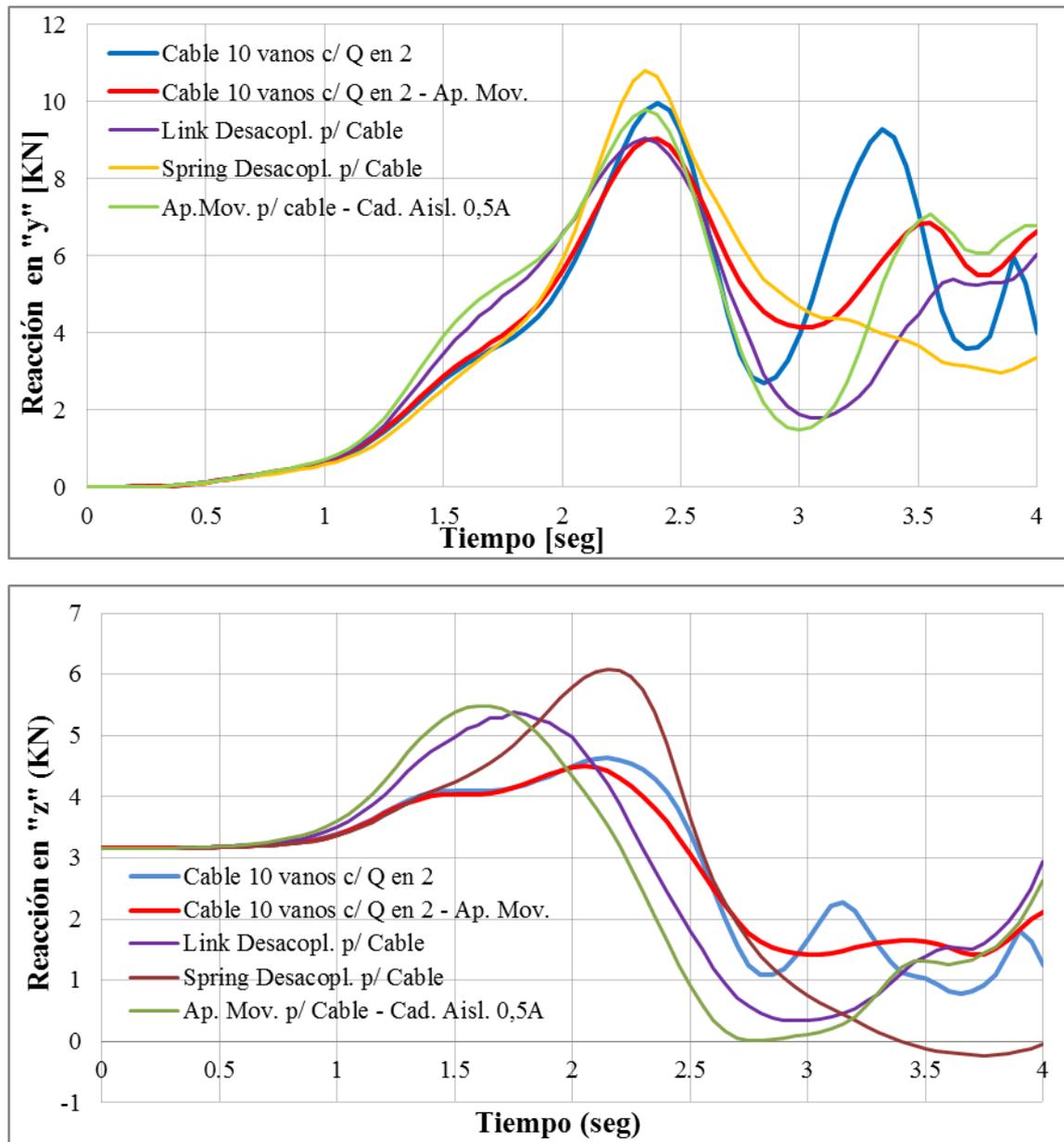


Figura 4: Reacción en el apoyo intermedio en a) dirección "y" y b) dirección "z"

Se observa en la [Figura 5](#) que se presentan menores diferencias entre adoptar dos o cuatro segmentos que si se adoptara uno. Ello se debe a que al generar un punto o más en el centro de la cadena, la masa de la mitad de los segmentos adyacentes se descarga en dicho/s punto/s, mientras que con un solo elemento la masa se concentra en los puntos extremos. En cuanto a la relación entre los tiempos computacionales del modelo cuya cadena de aisladores tiene dos segmentos y la correspondiente a cuatro es de aproximadamente 0.6 para una acción dinámica formada por una rampa a la que se le superpuso cuatro ciclos de seno para un vano y cuatro ciclos de coseno para el otro.

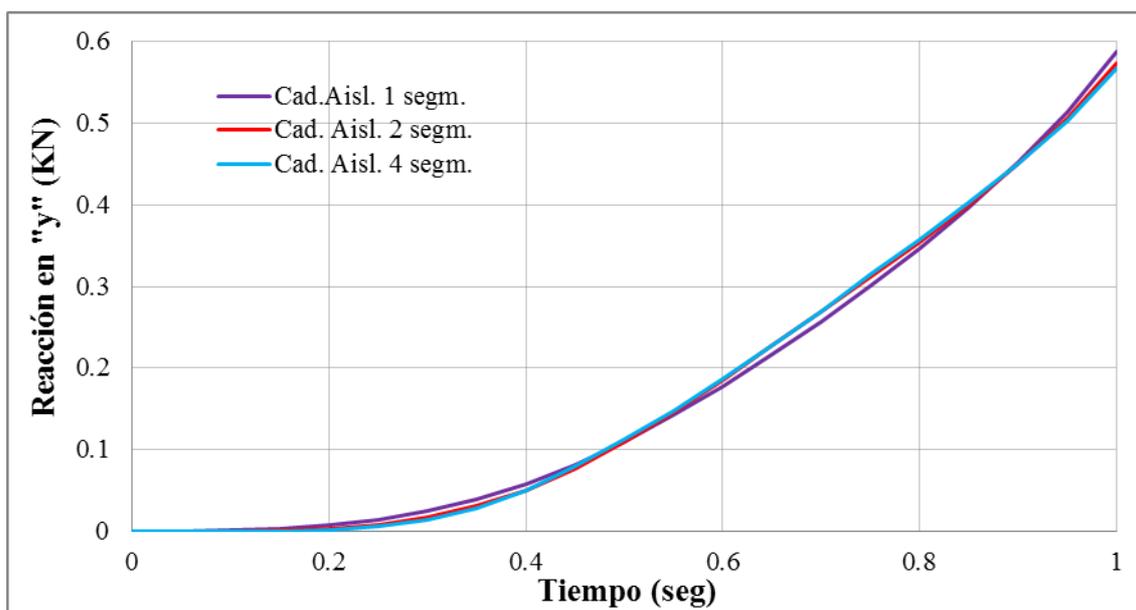


Figura 5: Reacción en el apoyo intermedio en la dirección “y”

2.3 Cables conductores e hilo de guardia

Como se mencionó en el punto 1, el comportamiento dinámico de cables se analizó detalladamente por [Pizzutti et al. \(2013\)](#), sin embargo posteriormente se realizaron ajustes en algunos parámetros intervinientes con el fin de aproximarse más a la realidad y reducir el tiempo de procesamiento.

Uno de ellos corresponde a la flecha de los conductores y del hilo de guardia, pues anteriormente se la había fijado en 15.00 m con la intención de hacerlo notable en los esquemas. Luego se determinaron las flechas definitivas para su implementación en los Modelos 2 y 3 respetando las distancias de seguridad establecidas por el Reglamento para la Ejecución de Líneas Aéreas Exteriores de Media y Alta Tensión de la [Asociación Electrotécnica Argentina \(2003\)](#). Resultó determinante para los conductores menos elevados el punto 7.4 del Reglamento referido a las “Distancias verticales a tierra, a objetos bajo la línea y aplicables en cruces entre líneas” para el estado con temperatura igual a 50 °C y velocidad del viento nula, dado que las demás distancias están determinadas por la tipología de poste adoptado. A su vez, para el hilo de guardia se utilizó el criterio práctico de asignarle una flecha igual al 90% de la correspondiente al conductor, como medida suficiente de protección de este último y se verificaron las demás distancias reglamentarias. De esta forma, resultó una flecha de 7.00 m para todos los conductores y de 6.10 m para el hilo de guardia en el estado básico (temperatura igual a 20 °C y velocidad del viento igual a cero).

Otro parámetro ajustado fue el amortiguamiento, el cual se consideró a través de la matriz de Rayleigh utilizando los dos primeros períodos que desplazan un mayor porcentaje de masa modal participante en la dirección “y” (paralela a la componente longitudinal del viento) y la relación de amortiguamiento igual a 5‰ dado que estas líneas eléctricas no cuentan con amortiguadores de vibraciones ([Gattulli et al., 2006](#) y [Vassilopoulou, 2011](#)).

Por otro lado, cabe mencionar que todos los casos de carga (Peso Propio y Cargas Dinámicas del Viento) se ejecutaron con un análisis del tipo no lineal. Sin embargo, para el Peso Propio la no linealidad geométrica se consideró a través del parámetro P-Delta mientras que para las Cargas Dinámicas de Viento se consideró P-Delta más Grandes Desplazamientos

por corresponderse mejor con los valores teóricos, según se pudo constatar en estudios anteriores (Pizzutti et al., 2013).

A partir de estas consideraciones se realizaron 3 modelos de cables con distinta cantidad de segmentos (10, 15 y 20), a los cuales se aplicaron cargas distribuidas y puntuales convenientemente con el objetivo de analizar el comportamiento y los tiempos computacionales de ejecución. En la Figura 6 se observa el modelo compuesto por 10 segmentos por tramo.

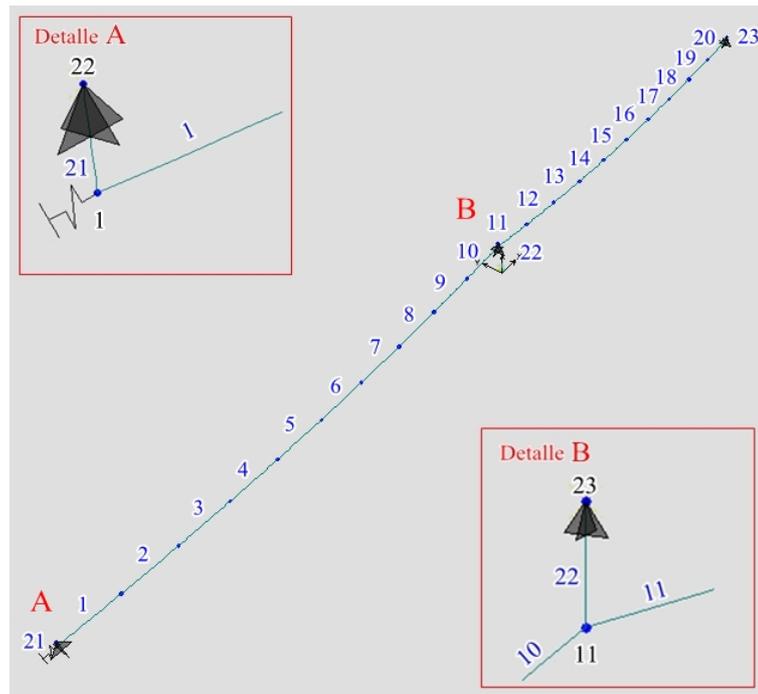


Figura 6: Conductor con 10 segmentos por tramo.

En la Tabla 1 se exponen las frecuencias angulares de vibración para el hilo de guardia con 10 y 20 segmentos junto a las obtenidas analíticamente (Thomé de Oliveira, 2002).

| Modo N° | Formas Modales | Analítico [rad/seg] | Cable c/ 10 segm. [rad/seg] | Cable c/ 20 segm. [rad/seg] |
|---------|----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | Horiz. Sim. | 1.4086 | 1.4026 | 1.4070 |
| 2 | Vert. Asim. | 2.8171 | 2.7635 | 2.7976 |
| 3 | Horiz. Asim. | 2.8171 | 2.7698 | 2.8043 |
| 4 | Vert. Sim. | 3.3715 | 3.2913 | 3.3485 |
| 5 | Horiz. Sim. | 4.2257 | 4.0689 | 4.1845 |
| 6 | Vert. Sim. | 4.5682 | 4.3665 | 4.5108 |
| 7 | Vert. Asim. | 5.6342 | 5.2654 | 5.5358 |
| 8 | Horiz. Asim. | 5.6342 | 5.2680 | 5.5390 |
| 9 | Horiz. Sim. | 7.0428 | 6.3373 | 6.8594 |
| 10 | Vert. Sim. | 7.0867 | 6.3659 | 6.8975 |

Tabla 1: Frecuencias angulares de los 10 primeros modos.

Como se puede apreciar, a medida que se aumenta la cantidad de segmentos en el cable más se aproxima la frecuencia angular al valor analítico.

Entre las varias respuestas que se podrían extraer de los modelos, se representa en la [Figura 7](#) la componente en “y” (dirección del viento) de la reacción del conductor de la cruceta a sotavento en el apoyo intermedio.

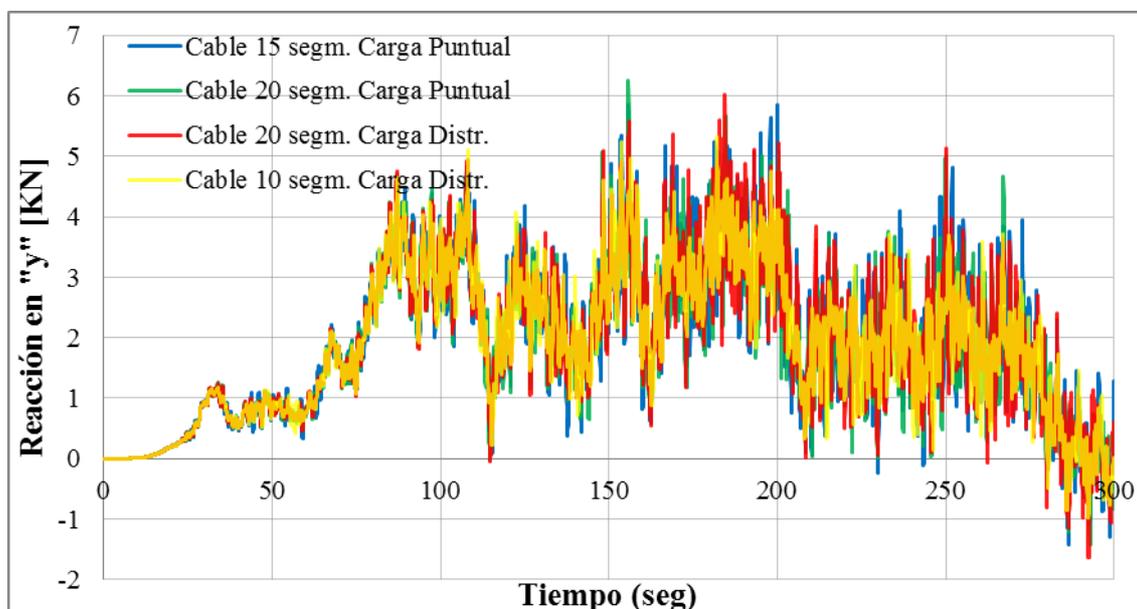


Figura 7: Reacciones en la dirección “y” para los modelos del conductor de cruceta a sotavento.

Para una mejor comparación de los distintos modelos se expone en la [Tabla 2](#) los valores promedios, máximos y mínimos de las reacciones anteriores.

| | Cable 20 segm. Carga Distr. | Cable 10 segm. Carga Distr. | Cable 15 segm. Carga Ptual. | Cable 20 segm. Carga Ptual. |
|---------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Promedio [KN] | 1.8696 | 1.8706 | 1.8748 | 1.8726 |
| Máximo [KN] | 6.0280 | 5.3263 | 5.8589 | 6.2532 |
| Mínimo [KN] | -1.6418 | -0.9811 | -1.4252 | -1.4305 |

Tabla 2: Reacción en “y” promedio, máxima y mínima para los modelos.

En la [Figura 7](#) se puede percibir la buena superposición que existe en las respuestas, pero además que en ciertos momentos los picos sobresalen de otros. Mientras que en la [Tabla 2](#) podemos notar que el promedio de las respuestas de los modelos con igual configuración de carga es similar, en tanto que los modelos con mayor número de segmentos presentan picos máximos y mínimos sobresalientes respecto de los homólogos para menor número de segmentos.

Resulta de importancia mencionar que el software SAP 2000 al momento de realizar la división directa del cable limita a 16 segmentos como mínimo, por ello se prefirió dividir a los cables en 20 segmentos iguales según su proyección horizontal y así contar con un punto en el límite de las franjas de correlación de la velocidad del viento. Mientras que para los modelos con menor número de segmentos se tuvo que modelar los cables usando objetos de barra recta, dividir en el número de segmentos deseado y luego transformar a cada uno en

cables nuevamente. En la [Tabla 3](#) se presenta el comportamiento del hilo de guardia para 10 y 20 segmentos bajo la acción de su peso propio.

| | Analítico | Cable c/ 10 segm. | Cable c/ 20 segm. |
|-------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| Tiro inicial [KN] | 5.0714 | 5.1780 | 5.0578 |
| Flecha [m] | 6.1000 | 6.0739 | 6.1000 |

Tabla 3: Tiro inicial y flecha para el hilo de guardia con 10 y 20 segmentos.

Como se puede observar, al ejecutar el modelo de 10 segmentos con su peso propio, se presenta una pequeña deformación relativa hacia arriba del punto ubicado en el centro del vano, lo cual es despreciable para el caso con 20 segmentos. Esto puede deberse al proceso utilizado para la división, que genera un tiro inicial que supera en más del 2% al tiro calculado en forma analítica ([Pallares Muñoz et al., 2008](#)).

2.4 Modelo desacoplado

Una vez verificada la consistencia de los distintos componentes del sistema estructural se procedió a evaluar las respuestas con SAP 2000, en forma separada, por un lado los cables con sus cadenas de aisladores e hilo de guardia, y por otro el poste con sus accesorios (ménsulas y crucetas), base aislada de hormigón simple y terreno de fundación, tal como se muestra en el “*Modelo 2*” de la [Figura 8](#).

Los conductores e hilo de guardia fueron modelados con elementos de cable divididos en veinte segmentos en cada tramo de la línea, con acciones de viento aplicadas en forma distribuidas, tal como se describe en el punto 2.3, al igual que los dispositivos de continuidad de línea y las cadenas de aisladores.

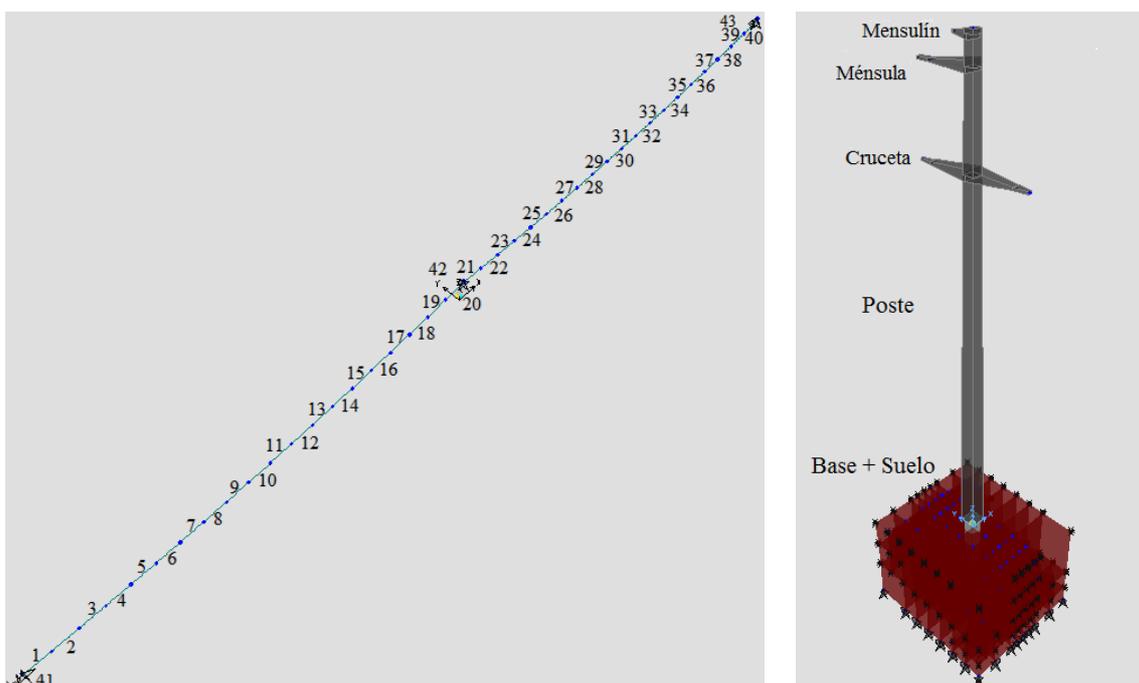


Figura 8: Modelo 2.

Luego de realizar el análisis estructural, en forma separada, de los tres conductores e hilo de guardia con el software SAP 2000, se extraen las funciones temporales de las componentes en las tres direcciones de los ejes globales de las reacciones en el vínculo central. Estas componentes son aplicadas posteriormente como acciones en las secciones extremas de ménsulas y crucetas del conjunto poste-base-suelo mostrado en la [Figura 8](#).

2.5 Modelo completo

Con el fin de evaluar la precisión de los resultados y los tiempos computacionales, se ensamblan los cables con sus cadenas de aisladores e hilo de guardia a los extremos de crucetas y ménsulas del conjunto poste-base-suelo, quedando constituido el “**Modelo 3**” mostrado en la [Figura 9](#). Con este modelo completo se realiza el análisis estructural utilizando el programa SAP 2000.

El amortiguamiento del sistema completo se consideró a través de la matriz de Rayleigh, de la misma forma que para los cables, pero con una relación de 4% ([Adams et al., 1999](#)).

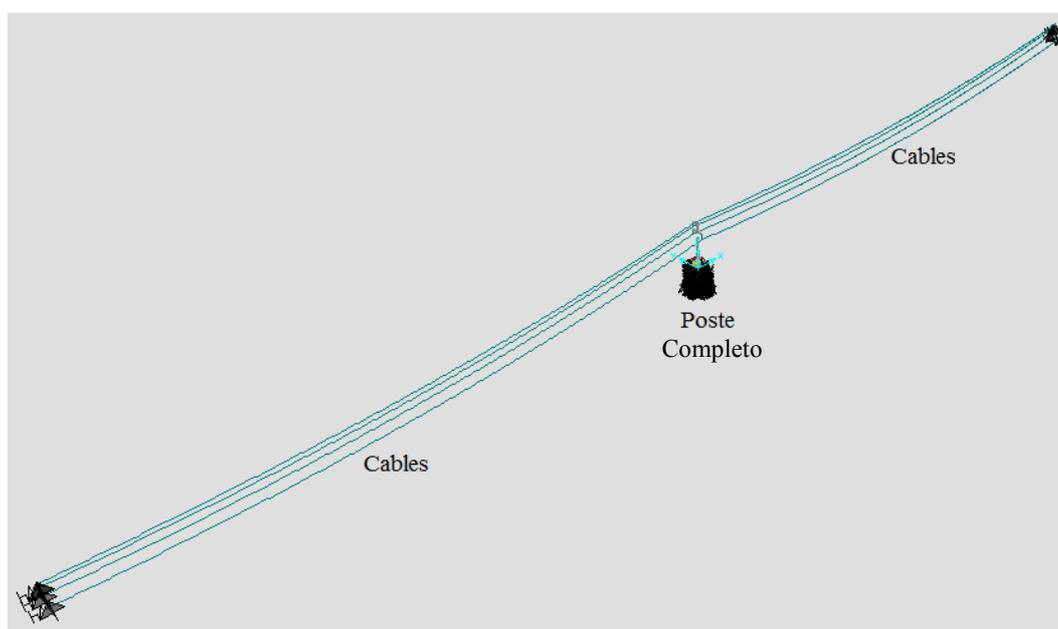


Figura 9: Modelo 3.

3 RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN

Atendiendo a que las respuestas del sistema estructural estudiado serán utilizadas en un posterior proceso de optimización con restricciones de confiabilidad (proceso ya realizado para el Modelo 1), y que para lograr ese objetivo, se deben efectuar aproximadamente 2500 análisis estructurales para distintos conjuntos de variables aleatorias del sistema; es importante crear un modelo estructural que presente una adecuada respuesta, pero con razonables tiempos de procesamientos computacionales.

Por otra parte es interés de este grupo de trabajo que el modelo elegido contemple las interacciones dinámicas, originadas por el viento, entre los distintos elementos estructurales y principalmente las transmitidas por los cables y cadenas de aisladores a la estructura de sustentación.

En la [Figura 10](#) se muestran los valores del momento flector en la sección inferior del poste en función del tiempo de duración de la acción dinámica del viento, para los tres modelos estudiados. De la misma manera la [Figura 11](#) muestra los desplazamientos de la cima del poste en la dirección del viento, y como es de esperar las formas generales de los gráficos son similares a las de los momentos.

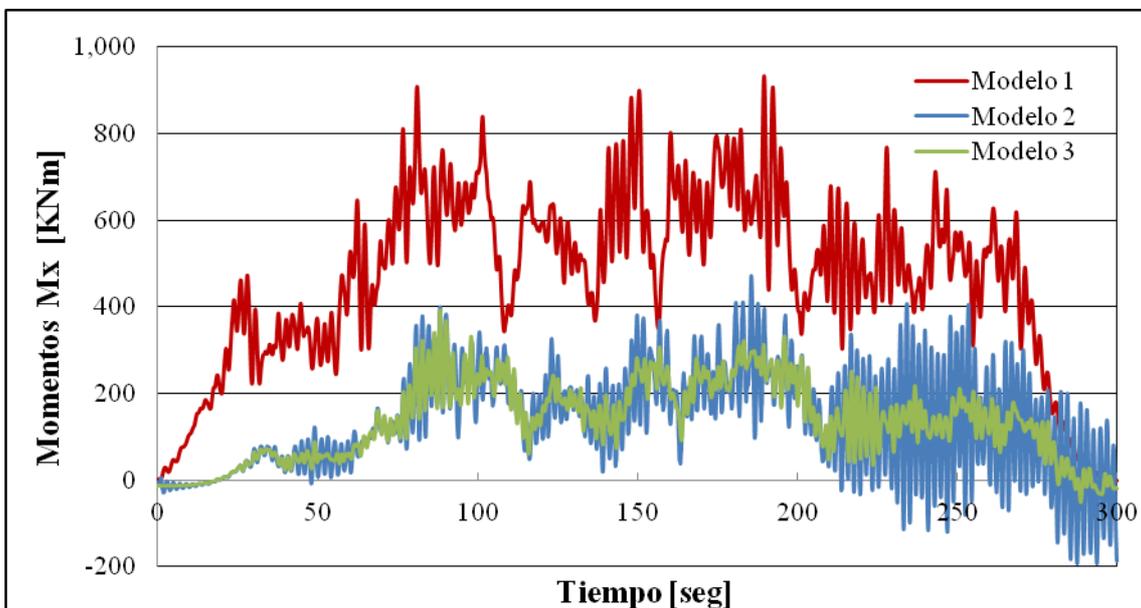


Figura 10: Momentos en la sección inferior del poste.

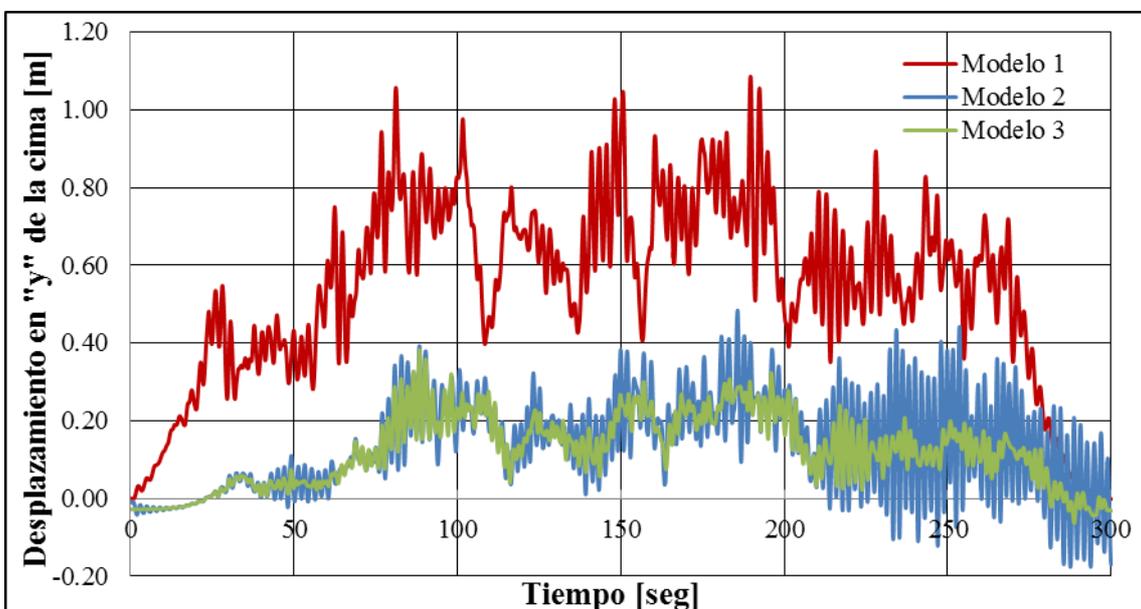


Figura 11: Desplazamientos de la cima del poste en la dirección del viento

La importante reducción en los valores de las respuestas de los Modelos 2 y 3 con respecto al Modelo 1 se aprecia en la [Figura 12](#), donde se grafica la carga función del tiempo reducida a la cima del poste para los Modelos 1 y 2 respectivamente.

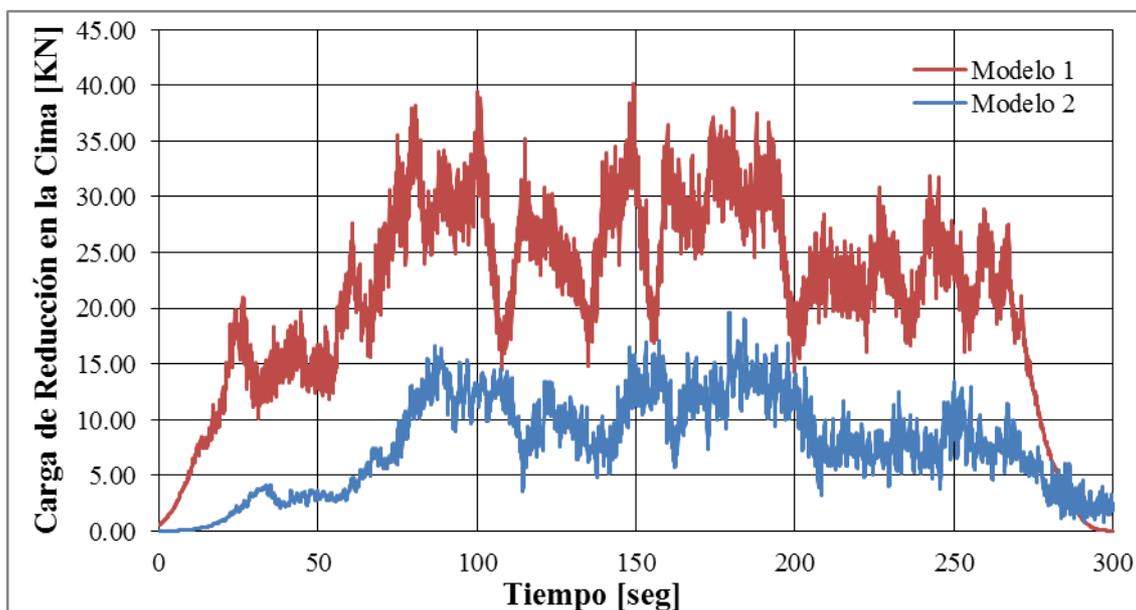


Figura 12: Cargas reducidas a la cima del poste.

El elemento de interacción dinámica directa entre los cables y la estructura de sustentación es la cadena de aisladores y por ello, en la [Figura 13](#) se muestra en forma comparativa los esfuerzos normales, en dicho elemento, para los Modelos 2 y 3.

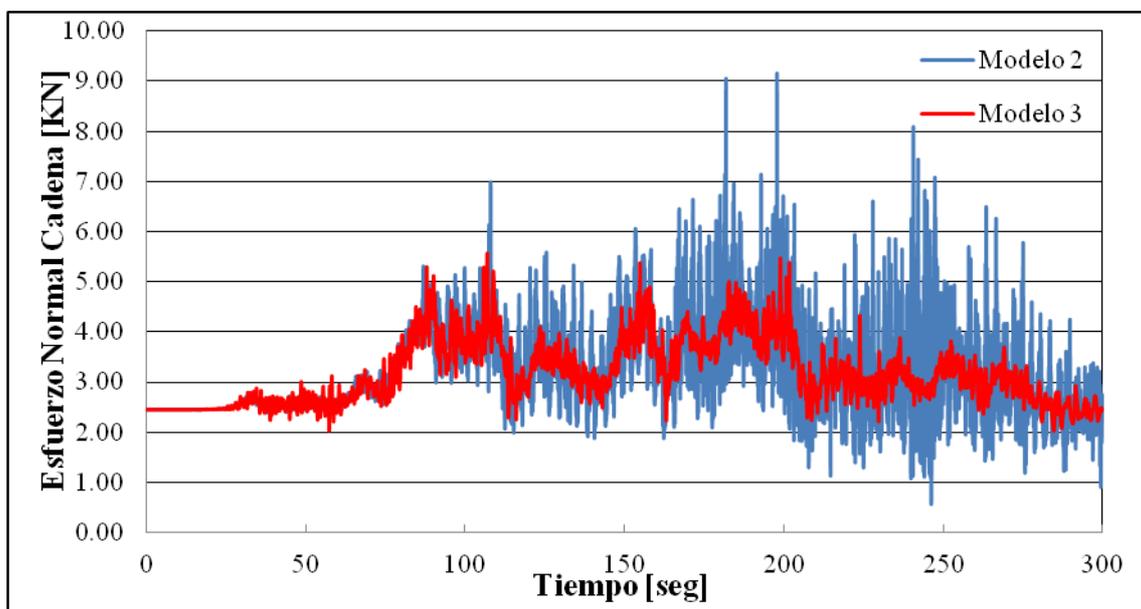


Figura 13: Esfuerzo normal en cadena de aisladores.

Los resultados presentados en los gráficos anteriores muestran que cuando se considera el poste aislado con una carga total calculada por área de influencia en cada instante de tiempo (Modelo 1), se obtienen resultados de desplazamientos y esfuerzos internos entre dos y tres veces más grandes que cuando se considera interacción con los conductores y cadena de

aisladores (Modelos 2 y 3). Significa que parte de la energía introducida por la acción del viento se consume en la deformación y movimiento de los cables y cadena de aisladores.

Las diferencias entre los resultados del Modelo 2 (poste independiente solicitado por la reacción dinámica de la cadena de aisladores) y del Modelo 3 (todo acoplado) están indicando que el acoplamiento de la cadena de aisladores con el poste flexible reduce los picos de fuerzas dinámicas que se transmiten al poste y fundación, aunque la tendencia general es similar debido a que sí está considerada la propia dinámica de los cables y cadena de aisladores.

Cabe aclarar que los tiempos de procesamientos computacionales para el Modelo 3 resultan tres veces mayores que la suma de los tiempos demandados por cada uno de los elementos estructurales del Modelo 2.

4 CONCLUSIONES

Se presenta la respuesta dinámica de un sistema poste, cadena de aisladores y conductores, representativos de una línea de transmisión eléctrica de 132 kV típica de la provincia de Misiones.

Se estudió el comportamiento de tres modelos diferentes (i) Modelo 1: poste aislado con una carga total calculada por área de influencia en cada instante de tiempo, es decir sin considerar la dinámica de los conductores y cadena de aisladores; (ii) Modelo 2: poste desacoplado solicitado por la reacción dinámica de la cadena de aisladores y cables, analizados en etapa previa; (iii) Modelo 3: modelo acoplado totalmente.

Las principales conclusiones de los resultados obtenidos con SAP 2000 para el ejemplo analizado son las siguientes:

- Para simular la continuidad con tramos de línea adyacente a los vamos analizados, la modelización con elementos tipo resorte (Spring) ofrece el mejor comportamiento con sección total de cadena de aisladores y sin masa.

- La modelización de la cadena de aisladores con elementos tipo cable y dos segmentos, responde adecuadamente en menor tiempo computacional.

- Para el cable (conductores), el modelo constituido por 20 segmentos y carga dinámica del viento distribuida presenta el mejor comportamiento general, con tiempos de procesamiento apenas superiores a los demás modelos.

- El Modelo 1 presenta respuestas de magnitudes bastante superiores a la de los Modelos 2 y 3, debido a que recibe toda la carga dinámica en forma directa por área de influencia.

- Considerando al Modelo 3 como el más aproximado a la realidad, los resultados del Modelo 2 muestran una tendencia general y magnitudes medias muy similares, con mayores valores picos debido al vínculo fijo en el extremo de las cadenas de aisladores, frente al vínculo flexible del poste en el Modelo 3.

- Como los tiempos de procesamiento computacional son bastante mayores para el Modelo 3 totalmente acoplado, se estima que un mejor balance entre precisión y simplicidad lo ofrece el Modelo 2.

REFERENCIAS

Adams, V., Askenazi, A.: *Building better products with finite element analysis*. OnWord Press, Santa Fe, N.M., 1999.

- Asociación Electrotécnica Argentina (AEA): *Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media tensión y alta tensión. AEA 95301*. Buenos Aires, 2003.
- CSI – Computers & Structures Inc.: *Computer program SAP 2000*. Version 14.2.2. Berkeley, California, 2010.
- CSI – Computers & Structures Inc.: *Analysis Reference Manual*. Rev. 3. Berkeley, California, 2010.
- Desai, Y. M., Yu, P., Popplewell, N., Shah, A. H.: *Finite element modelling of transmission line galloping*. Computers & Structures Vol. 57, No. 3, págs. 407-420. Great Britain, 1995.
- Detke F. R., Reinert H. O., Duarte J. A., Klimczuk C. M., Fank P. Y., Möller O.: *Modelo estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina*. I Jornadas Regionales de Investigación en Ingeniería - UTN FRRe. Resistencia, 2010.
- 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 aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol. XXX, págs. 2651-2667. Rosario, 2011.
- Detke F. R., Duarte J. A., Möller O.: *Respuesta estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina*. 22 Jornadas de Ingeniería Estructural, Asociación de Ingenieros Estructurales. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 2012.
- Gattulli, V., Martinelli, L., Perotti, F., Vestroni, F.: *Dynamics of suspended cables under turbulence loading: Reduced models of wind field and mechanical system*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95 (2007), págs. 183–207. Italy, 2006.
- 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 de energía eléctrica*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol. XXX, págs. 2719-2733. Rosario, 2011
- Pallares Muñoz, M.R., Rodríguez Calderón, W.: *Validación de la formulación numérica de la catenaria elástica con ANSYS*. Matemáticas: Enseñanza Universitaria, Vol. XVI, N° 1, págs. 63-85. Universidad del Valle. Cali, 2008.
- Pizzutti, H. D., Aguirre, M. A., Mercanti, J. A., Reinert, H. O., Möller, O.: *Modelización del comportamiento estático y dinámico de cables conductores en líneas eléctricas*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol. XXXII, págs. 2215-2235. Mendoza, 2013.
- Ribeiro de Oliveira, M. I. : *Análise estrutural de torres de transmissão de energia submetidas aos efeitos dinâmicos induzidos pelo vento*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.
- Thomé de Oliveira, T.: *Estudo da instabilidade de feixes de condutores em linhas aéreas de transmissão*. Tese de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.
- Vassilopoulou, I.: *Nonlinear dynamic response and design of cable nets*. National Technical University of Athens, School of Civil Engineering. Athens, 2011.