

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

## **CALIBRACIÓN DE MODELOS PARA LA TRANSMISION DE ENERGIA ELÉCTRICA<sup>1</sup>**

**Mauro Damian Bakaleiko<sup>2</sup>, Detke Fernando Ruben<sup>3</sup>, Miguel Angel Aguirre<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup> Proyecto de Investigación realizado en la Facultad de Ingeniería de Oberá - Misiones- Argentina

<sup>2</sup> Estudiante de Ingeniería

<sup>3</sup> Magister en Ciencias de la Ingeniería

<sup>4</sup> Ingeniero Civil

Los modelos estructurales presentados en este trabajo, que serán utilizados en un proceso de optimización, corresponden a sistemas de transmisión de energía eléctrica usuales en la Provincia de Misiones, Figura 1; cuyos elementos componentes son: fundación, postes, crucetas y ménsulas, cadenas de aisladores, cables conductores y de guardia; sometidos principalmente a la acción dinámica del viento tratado como proceso estocástico, que originan fallas e interrupción del servicio eléctrico a gran cantidad de personas e instalaciones productivas.



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

### **METODOLOGIA:**

El sistema estructural en estudio está constituido por dos vanos consecutivos, delimitados por tres soportes en suspensión simple (cada uno compuesto por: postes de hormigón pretensado, crucetas 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 por 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 de un modelo denominado “Modelo 1” (Detke et al., 2010 y 2011), cuyos componentes del sistema estructural estudiado se dividen en dos grupos: los primeros son los componentes auxiliares del modelo (cables, aisladores, cruceta, etc.) los que son estimados como acciones externas bajo el efecto del peso propio y acción del viento, esta acción es considerada como la integración de las presiones que ejerce sobre las componentes del sistema y reducido a una carga puntual en la cima del poste. El segundo grupo está formado por poste de

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

hormigón armado y pretensado, base de hormigón simple y suelo de fundación que constituyen el modelo computacional.

Con el objetivo de encontrar un modelo que contemple las interacciones dinámicas entre los distintos componentes estructurales del sistema, se presentan a modo comparativo, dos modelos computacionales analizados con el software SAP 2000 a los que se denominan “Modelo desacoplado” (Modelo 2) y “Modelo completo” (Modelo 3), como así también el estudio realizado para adoptar el Modelo de cadenas de aisladores y el mecanismo que represente la continuidad de los vanos.

#### Mecanismo de continuidad estructural

Dado el excesivo tiempo de procesamiento y la complejidad que representaría la simulación de varios vanos, se procedió a implementar resortes (Desai et al., 1995) que representen tanto a los conductores contiguos como a la cadena de aisladores y las variantes pertinentes que simulen la continuidad del sistema (Ribeiro de Oliveira, 2006).

Luego de haber comparado las respuestas de tres modelos posibles se llega a que los modelos con resortes del tipo “Link/Support” se ajustan mejor sin embargo en los extremos se presentan reacciones elevadas. Los modelos con resortes del tipo “Springs” presentan un mayor desvío, pero siguen la forma de las curvas de referencia, además de presentar valores de reacciones muy cercanos a los analíticos en los apoyos extremos.

#### Cables conductores e hilo de guardia

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 e hilo de guardia, pues se determinaron las flechas definitivas, implementados 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). De esta forma, resulta 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 y de segundo orden.

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 2 se observa el modelo compuesto por 10 segmentos por tramo.

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

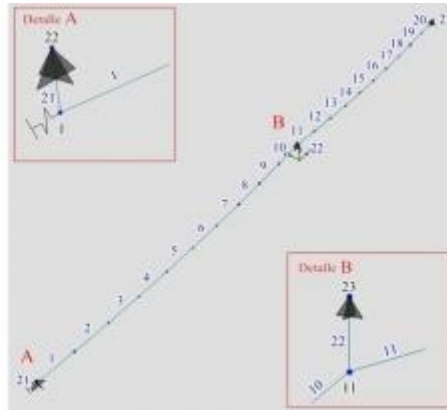


Figura 2: Conductor con 10 segmentos por tramo.

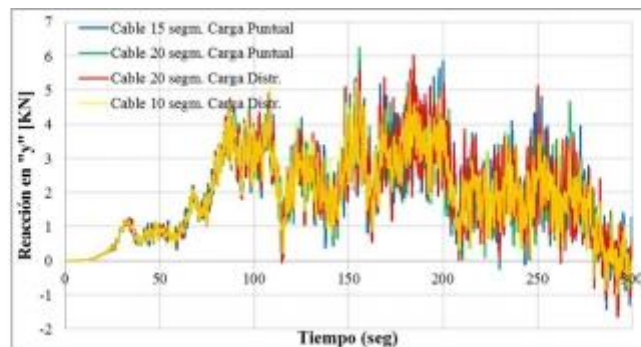


Figura 3: Reacciones en la dirección “y” para los modelos del conductor de cruceta a sotavento.

#### 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 4.

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 precedentemente, al igual que los dispositivos de continuidad de línea y las cadenas de aisladores.

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

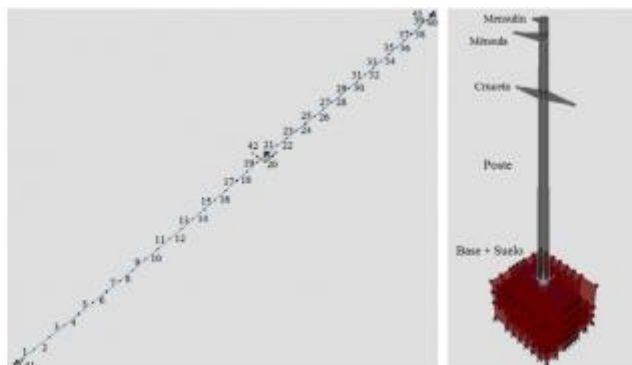


Figura 4: Modelo 2.

### 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 5. 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).

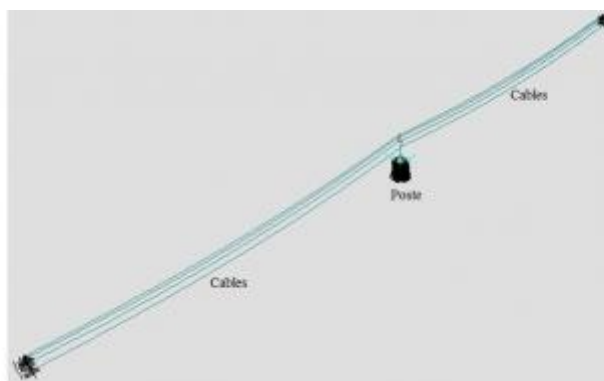


Figura 5: Modelo 3.

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

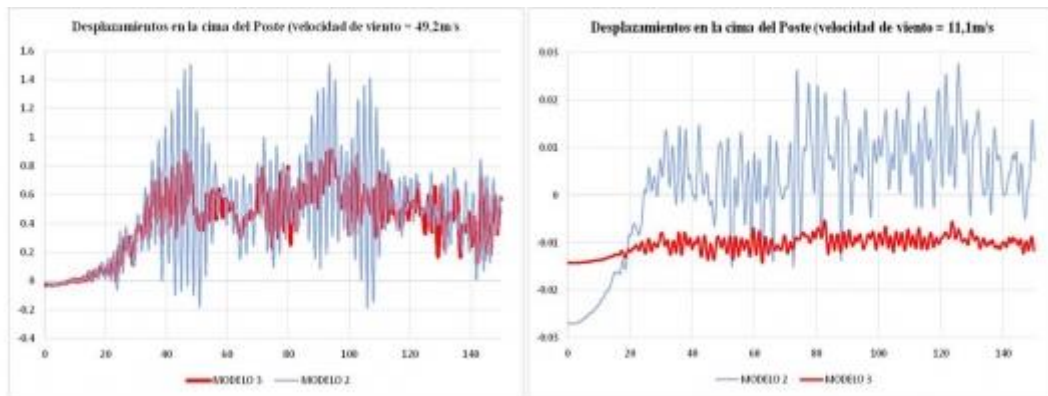


Figura 6: Desplazamientos de la cima del poste en la dirección del viento, para distintas velocidades de diseño.

Las diferencias entre los resultados del Modelo 2 y del Modelo 3 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 cinco veces mayores que la suma de los tiempos demandados por cada uno de los elementos estructurales del Modelo 2.

#### CONCLUSIONES

- 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.
- 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.
- 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 el Modelo 2 ofrece un mejor balance entre precisión y simplicidad.

#### REFERENCIAS

- Asociación Electrotécnica Argentina (AEA): Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media tensión y alta tensión. AEA 95301. Buenos Aires, 2003.
- 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.

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XX Jornada de Pesquisa

-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.

-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.

-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.