

ANALISIS DE ESTRUCTURAS CROSS ROPE MEDIANTE EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Echarri, Tomás¹, Lopardo, Edgardo², De La Croix, Brian³, Saralegui, Gustavo⁴

UNLP, Facultad de Ingeniería UID-DISIM
Departamento de Mecánica-Calle 48 y 116 La Plata (1900)

¹tomas.echarri@ing.unlp.edu.ar

²edgardo.loparado@ing.unlp.edu.ar

³briandelacroix@hotmail.com

⁴gsarale@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN.

Las torres de suspensión tipo *Cross Rope* (CR) son utilizadas en las líneas de alta (LAT 220kV) y extra alta tensión (LEAT 500kV) del Sistema Interconectado Nacional (SIN). La torre CR es una estructura formada por dos mástiles reticulados cada uno vinculado al suelo por dos riendas. El equilibrio en operación se establece por medio del cable *Cross Rope* Principal (CRP) que vincula el extremo de ambos mástiles, sobre el cual se suspenden las tres cadenas de aisladores y los conductores respectivos. El equilibrio en la erección de los mástiles se establece por medio del cable *Cross Rope* Auxiliar (CRA), de menor longitud y sección que el cable CRP, que vincula el extremo superior de los mástiles y que además es utilizado en tareas de mantenimiento de la línea.

En el presente trabajo se simula el comportamiento estructural de la torre CR utilizada en la LAT 220kV de la interconexión Pico truncado-Esperanza-Rio Turbio-Rio Gallegos del SIN. Para tal fin se realiza un análisis estático geoméricamente no lineal, mediante un modelo de elementos finitos espacialmente tridimensional que consta de elementos tipo viga cuadráticos y elementos tipo barra lineales solo tracción, utilizados para modelar el comportamiento de perfiles y cables respectivamente. Los resultados del análisis son utilizados para la verificación de la estructura según las recomendaciones en la literatura específica.

Palabras Claves: Cross rope, guyed structures, estructuras arriostradas.

1. INTRODUCCIÓN

La configuración de una estructura de transmisión eléctrica es función del voltaje de la línea, los requerimientos de distancias eléctricas, de distancia a tierra, límites en los campos electromagnéticos, requerimientos de aislación, número y configuración de circuitos eléctricos, disposición de los conductores en las fases y requerimientos de emplazamiento e impacto ambiental [1].

Las estructuras de transmisión pueden ser de suspensión, de retención o terminales. En las estructuras de suspensión los conductores están suspendidos por los aisladores, no existiendo carga longitudinal (dirección de la línea) como consecuencia del desequilibrio en la tracción de los conductores mientras no se produzca la falla estructural en estos, la caída de una estructura adyacente o se establezca una carga de hielo desbalanceada. Las estructuras de transmisión arriostradas poseen menor masa relativa que las auto soportadas, erección simple, la posibilidad de pre ensamblado y el diseño de las fundaciones se ve simplificado [1].

La torre de suspensión *Cross Rope* es una estructura formada por dos mástiles reticulados cada uno vinculado al terreno por dos riendas. El equilibrio en operación se establece por medio de cables que vinculan el extremo de ambos mástiles, sobre el cual se suspenden tres cadenas de aisladores y los conductores respectivos (Figura 1). El equilibrio durante la erección de los mástiles se establece por medio de un cable adicional, que vincula el extremo superior de los mástiles y que además es utilizado en tareas de mantenimiento de la línea.

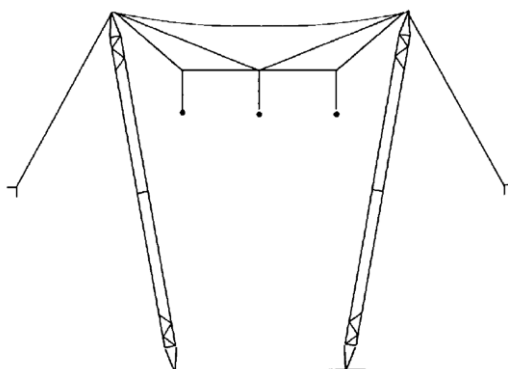


Figura 1 *Cross Rope* [1].

1.1. Torre CR2.

Las torres de suspensión tipo *Cross Rope* (CR) son utilizadas en las líneas de alta (LAT 220kV) y extra alta tensión (LEAT 500kV) del Sistema Interconectado Nacional (SIN). La torre CR2 es una estructura formada por dos mástiles reticulados cada uno vinculado al suelo por dos riendas (R). El equilibrio en operación se establece por medio del cable *Cross Rope Principal* (CRP) que vincula el extremo de ambos mástiles, sobre el cual se suspenden tres cadenas de aisladores y los conductores respectivos. El equilibrio durante la erección de los mástiles se establece por medio del cable *Cross Rope Auxiliar* (CRA), de menor longitud y sección que el cable CRP, que vincula el extremo superior de los mástiles y que además es utilizado en tareas de mantenimiento de la línea. Adicionalmente en los extremos de los mástiles se soportan los cables de guardia/OPGW (optical ground wire) cuya finalidad es la protección eléctrica de los conductores y transmitir información operativa de la red eléctrica.

2. MODELADO

Para simular el comportamiento de la estructura CR-27.5 se utilizó un modelo tridimensional de elementos finitos basado en elementos estructurales unidimensionales. Las fuerzas colineales con el eje geométrico de los elementos obtenidas de dicho análisis, son utilizadas para la verificación de la estructura según las recomendaciones en las referencias [1] y [2]. El modelo físico-matemático utilizado consta de elementos tipo viga cuadráticos basados en la formulación de *Timoshenko* (BEAM189) y elementos tipo barra lineales solo tracción (LINK10) (ver [3]), utilizados para aproximar el comportamiento de perfiles y cables respectivamente.

2.1. Análisis estático.

Se realizó el análisis estructural estático geoméricamente no lineal utilizando el modelo de elementos finitos descrito bajo los casos de carga siguientes:

Caso 1. Viento máximo transversal.

Carga vertical debido al peso de conductores en ambos semivanos, cadenas de aisladores y cables guardia. Peso propio de la estructura. Viento máximo transversal de 180 km/h sobre los conductores y cables de guardia y de 200 km/h sobre la estructura, grapería y aisladores. Se verificará la estructura tomando la carga vertical reducida al 75%.

Caso 2. Viento máximo angular.

Carga vertical debido al peso de conductores en ambos semivanos, cadenas de aisladores y cables guardia. Peso propio de la estructura. Viento máximo angular de 180 km/h sobre los conductores y cables de guardia y de 200 km/h sobre la estructura, grapería y aisladores, con ángulos de incidencia de 60° y 45° respecto del eje de la línea. Se verificará la estructura tomando la carga vertical reducida al 75%.

Caso 3. Hielo extremo.

Carga vertical debido al peso de conductores en ambos semivanos, cadenas de aisladores y cables guardia. Peso propio de la estructura. Considerando 25mm de hielo (densidad 900 kg/m³) sobre conductores, cadenas de aisladores y cables guardia.

2.1.1. Cargas.

Las cargas gravitatorias y eólicas transferidas a la estructura por los conductores/accesorios y cables de guardia/OPGW se consideraron como fuerzas aplicadas en los nodos del modelo de elementos finitos representativos de los anclajes respectivos.

Las cargas eólicas sobre la estructura del mástil como consecuencia del arrastre aerodinámico se consideraron como fuerzas aplicadas en la totalidad de los nodos del modelo según la ley:

$$f_e = k \left(\frac{y}{10} \right)^{\frac{2}{7}} [\text{daNm}^{-1}] \quad (1)$$

Donde el coeficiente k se calcula según lo estipulado por la referencia [4], representa la fuerza por unidad de longitud a 10m de altura y es función tanto de la velocidad del viento como de las características geométricas del mástil.

2.1.2. Pretensión.

En determinadas condiciones de carga la estructura CR puede estar en equilibrio, al menos, con una rienda prácticamente sin tracción. La pretensión efectuada sobre la estructura tiene la finalidad de eliminar la inelasticidad en la respuesta de esta a las condiciones de carga.

En el análisis, la determinación de la pretensión en una estructura arriostrada con comportamiento no lineal como la CR se realiza en forma iterativa, identificando el estado de carga que produce la pérdida de tracción sobre las riendas y modificando (disminuyendo) la longitud inicial de los cables (R y CRA) hasta que se recupere el estado de tracción mientras se verifica la distancia entre mástiles requerida.

4. CONCLUSIONES

Utilizando la metodología mencionada se realizó el análisis estático de la estructura CR2. A partir de los resultados del cálculo se verificó la estructura tomando en cuenta las recomendaciones de la norma ASCE 10-97.

Se concluye que la estructura CR-27.5 verifica los requerimientos de estabilidad y/o resistencia con los coeficientes de seguridad (M) exigidos respecto a los límites de daño o falla, según corresponda. En particular:

El mástil M-27.5 como continuo unidimensional verifica los requerimientos de estabilidad elástica e inelástica bajo las hipótesis de carga consideradas, ergo verifican los mástiles M-26/M-24.5.

Todos los elementos estructurales comprimidos verifican los requerimientos de resistencia y/o estabilidad bajo las hipótesis carga consideradas.

Todos los elementos estructurales traccionados verifican los requerimientos de resistencia bajo las hipótesis de carga consideradas.

Todos los elementos estructurales componentes de las uniones verifican los requerimientos de resistencia por aplastamiento bajo las hipótesis carga consideradas.

Todos los bulones componentes de las uniones verifican los requerimientos de resistencia por corte bajo las hipótesis carga consideradas.

4.1. Respecto al diseño.

Respecto al requerimiento de distancia mínima entre el conductor y la estructura, el caso de carga crítico asociado es viento máximo transversal con cargas verticales reducidas (Caso 1) para un vano gravante de 480m. La disminución de la longitud del cable CR incrementa las distancias eléctricas con el consecuente incremento de la tracción.

Respecto al requerimiento de distancia mínima entre el conductor y el terreno, el caso de carga crítico asociado es hielo extremo (Caso 3) con vano gravante de 600m, bajo el supuesto que la línea de transmisión se encuentra en operación bajo esta condición. En el presente trabajo la restricción dada por la distancia eléctrica entre conductores y estructura prevalece en la determinación de la longitud del cable CRP.

En el cable cross rope principal (CRP) el caso de carga crítica en términos de falla estructural es bajo la condición de hielo extremo (Caso 3) con vano gravante de 600m. La relación entre la fuerza actual y la de rotura del cable es $f/fr=0.64$, siendo 0.65 recomendado en referencia [1] para garantizar que los alambres constituyentes del cable permanecen en el rango elástico. En estas situaciones es recomendable, a fin de prevenir el comportamiento inelástico no contemplado, solicitar pruebas específicas al conjunto cable-accesorios de fijación. Alternativamente para reducir la tracción sobre el cable puede utilizarse la configuración constructiva mostrada en la Figura 1.

En las riendas (R) el caso de carga crítica en términos de falla estructural es bajo la condición de hielo extremo con vano gravante de 600m. En esta situación la relación entre la fuerza actual y la de rotura del cable es $f/fr=0.55$.

Respecto al cable cross rope auxiliar (CRA) intuitivamente podría sugerirse que el caso de carga de crítico en términos de falla estructural es sin fases suspendidas. En esta condición la fuerza sobre el elemento depende de la pretensión asignada a la estructura. En los casos analizados $f/fr<0.5$.

La pretensión de la estructura está determinada por la condición viento oblicuo (Caso 2), en esta condición la tracción en la rienda asociada R1 alcanza valores próximos a cero.

4.2. Respecto al modelado.

Ante la utilización de elementos barra (solo tracción) en lugar de elementos cable (ver, por ejemplo, [5]), en general es recomendable un análisis de convergencia de la solución para determinar el número mínimo de elementos que debe utilizarse para modelar cables en forma aceptable.

Adicionalmente se recomienda investigar el comportamiento dinámico de estructuras de transmisión arriostradas [6] con la finalidad de evaluar la respuesta de la estructura a un estado de cargas variables en el tiempo (cargas eólicas transitorias). Si bien este tipo de análisis que no es recomendado por la literatura específica (ver referencias [1] y [4]), es de interés analizar situaciones que pueden ser ocasionadas por las condiciones climáticas particulares de las zonas de emplazamiento y diferentes a las presentes en las regiones de las cuales son originarias las recomendaciones.

5. REFERENCIAS.

- [1] ASCE, "Manuals and Reports on Engineering Practice no. 91: Design of Guyed Electrical Transmission Structures," American Society of Civil Engineers; Committee on Electrical Transmission Structures; Subcommittee on Guyed Transmission Structures, 1997.
- [2] ASCE, "ASCE 10-97: Design of Latticed Steel Transmission Structures," American Society of Civil Engineers; Committee on Electrical Transmission Structures, 1997.
- [3] ANSYS, «Release 10.0 Documentation for ANSYS,» SAS IP, Inc, 2005.
- [4] ASCE, "Manuals and Reports on Engineering Practice no. 74: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading," American Society of Civil Engineers; Committee on Electrical Transmission Structures; Task Committee on Structural Loadings, 1991.
- [5] S. Timoshenko, Resistencia de Materiales: Tomo II, Espasa-Calpe, 1957.
- [6] K. Bathe, Finite Element Procedures, Pentice Hall, 1996.
- [7] S. Ozono, J. Maeda and M. Makino, "Characteristics of in-plane free vibration of transmission line systems," *Engineering Structures*, vol. 10, no. 4, p. 272–280, 1988.
- [8] M. I. R. de Oliveira, "Structural Analysis of Guyed Steel Telecommunication Towers for Radio Antennas," *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, vol. XXIX, no. 2, pp. 185-195, 2007.