

Análisis de la forma del fuste y condiciones de apoyo para una Torre Atirantada.
Analysis of the shape of the shaft and support conditions for a Guyed Tower.



Ing. Alejandro López Llanusa

Ingeniero Civil. Máster en Ciencias. Profesor Asistente
Grupo de Investigación de Aerodinámica de las Construcciones.
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana, Cuba.
Teléfono: 72663814 E-mail: alo@civil.cujae.edu.cu



Ing. Vivian Elena Parnás

Ingeniera Civil. Doctora en Ciencias. Profesora Titular
Grupo de Investigación de Aerodinámica de las Construcciones. Instituto
Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana, Cuba.
Teléfono: 72663814 E-mail: vivian@civil.cujae.edu.cu



Ing. Patricia Martín Rodríguez

Ingeniera Civil. Doctora en Ciencias. Profesora Asistente
Grupo de Investigación de Aerodinámica de las Construcciones. Instituto
Superior Politécnico José Antonio Echeverría de La Habana, Cuba.
Teléfono: 72663814 E-mail: patriciamr@civil.cujae.edu.cu

Recibido: 09-09-15
Aceptado: 29-09-15

Resumen:

Las torres de telecomunicaciones suelen ser estructuras esbeltas y ligeras que se ubican en zonas de alta exposición al viento. La forma de los elementos que las conforman, las dimensiones y distribución espacial de los mismos, son aspectos que influyen en el valor de las cargas de viento. Este trabajo se centra en el estudio de la influencia de la variación de las condiciones de apoyo y del arreglo espacial de los elementos del fuste en el comportamiento estructural de una torre atirantada. Se generaron varios modelos que fueron analizados bajo carga de viento extrema utilizando la modelación por elementos finitos. Se determinaron las fuerzas interiores en los elementos componentes. Se concluye, que el cambio de articulado a empotrado del apoyo de la torre es desfavorable y con relación a la distribución de diagonales en las caras del fuste, el mejor comportamiento se obtiene para la configuración de diagonales dobles.

Palabras clave: Torre atirantada, Comportamiento estructural, Carga de viento, Apoyos, Arreglo espacial

Abstract:

Telecommunications towers are slender and light structures frequently exposed to high wind. The shape of members and the dimension of the section of the mast have a significant influence in the determination of loads due to wind forces which are determinant in the structural design of these structures. Little variations in some geometric parameters may change the structural response under wind load. This paper deals with the study of the influence of changes spatial arrangement of the elements and supporting conditions in structural behavior of a guyed mast. Several models of guyed mast were analyzed under extreme wind load using finite element programs. Internal forces in each of the components were obtained to perform a comparative analysis. Regarding the width of the mast, results show that an increase did not benefit performance while smaller with produced a decrement of the axial forces in some elements. According of obtained results articulated support have a best performance that embedded supports of the tower. Best performance was obtained for the configuration of double diagonal.

Keywords: Guyed tower, Structural behavior, Wind load, Props, Spatial arrangement

Introducción:

Las comunicaciones de radio y televisión, así como la telefonía celular, son posibles en el mundo moderno gracias a estructuras que permiten la transmisión de las señales de un lugar a otro. Las torres de celosía son estructuras con una amplia utilización como soporte de los sistemas de comunicación, debido a su gran resistencia en relación al consumo de material y su permeabilidad, que reduce las fuerzas del viento generadas sobre ellas. Estas estructuras suelen ser elementos esbeltos y ligeros, ubicados en su mayoría en lugares expuestos por lo que las cargas ecológicas prevalecen en el diseño.

El número de fallas en torres es significativamente mayor que en otras estructuras con similar complejidad (Mogens, 2005, Mogens, 2006), lo cual ha motivado numerosas investigaciones en torno a su comportamiento estructural. Varias investigaciones (Bruneau et al., 1989, Parnás, 2008, Mikitarenko and Perelmuter, 1998) indican que las torres de tipo atirantadas resultan, por lo general, con mayor índice de fallo con relación a las autosoportadas, por lo que se hace necesario profundizar en el estudio de estas para comprender mejor su comportamiento frente al viento.

La forma de los elementos constitutivos de la torre, las dimensiones y distribución espacial de los mismos, son aspectos que influyen notablemente en el valor de las cargas de viento. Esto determina que pequeñas variaciones en algunos de los parámetros geométricos y de forma, pueden modificar las fuerzas internas de la estructura y cambiar su respuesta frente a las cargas de viento. Uno de los coeficientes de mayor influencia en la determinación de la carga de viento sobre la estructura es el coeficiente de forma o aerodinámico. Comúnmente en Cuba son empleados los elementos angulares para la confección de las torres; sin embargo ensayos y estudios realizados (Whitbread, 1980) indican que los perfiles laminados tienen un índice de obstrucción al viento más elevado que las secciones tubulares, lo cual conduce a elevados coeficientes aerodinámicos, y por tanto altas presiones de viento sobre la estructura.

Otros aspectos que pueden modificar el comportamiento de la estructura bajo carga de viento es la variación del ancho de la sección transversal del fuste, y de su arreglo espacial; lo cual influye en la estabilidad de toda la estructura y en el trabajo individual de sus elementos componentes. En el caso particular de las torres de celosía algunos artículos han sido publicados basándose en el estudio de estos aspectos (Kemp and Behncke, 1998) y algunos autores como Ellis, Shyu y Quenneville (Ellis et al., 1998) establecen comparaciones entre el comportamiento estructural de más de 10 configuraciones distintas.

Las fuerzas generadas por las cargas de viento provocan movimientos verticales y horizontales en la estructura, los cuales, aún siendo pequeños, dan como resultado grandes tensiones en los elementos cercanos a la base cuando está unida rígidamente a la cimentación. El movimiento de torsión horizontal

provoca momento en la base; para compensarlo, la resistencia de los componentes bajos de la estructura, debe ser lo suficientemente grande o colocar una articulación en la base de forma que se permita el pivote de la torre bajo la acción de las cargas. Por esta razón, se utilizan comúnmente secciones cónicas que convergen en un punto en la base de la cimentación. Otras soluciones de cimentación se encuentran con el mismo resultado y prescindiendo de la forma cónica.

Esta investigación tiene el objetivo de cuantificar la influencia que estos cambios producen en el comportamiento estructural de una torre atirantada, bajo la carga de viento.

Materiales y métodos:

La torre seleccionada para el estudio está compuesta por un fuste y cinco niveles de cables distribuidos en una altura total de 90 m, Figura 1, y espaciados radialmente a 120° en tres direcciones,

Figura 2. El fuste es de sección triangular equilátera de 1,02 m, excepto en los primeros tres metros donde la sección se reduce hasta convertirse en un solo punto de apoyo y está compuesto por tres elementos principales: tranques, diagonales y columnas,

Figura 3. Los elementos que componen el fuste de la torre son, en todos los casos, angulares de alas iguales.

Los valores de la carga de rotura fueron obtenidos de los datos proporcionados por los fabricantes, para los de 9 mm de diámetro la carga de rotura se tomó igual a 69 kN, mientras que para los de 13 mm de diámetro se tomó una carga de rotura de 120 kN.

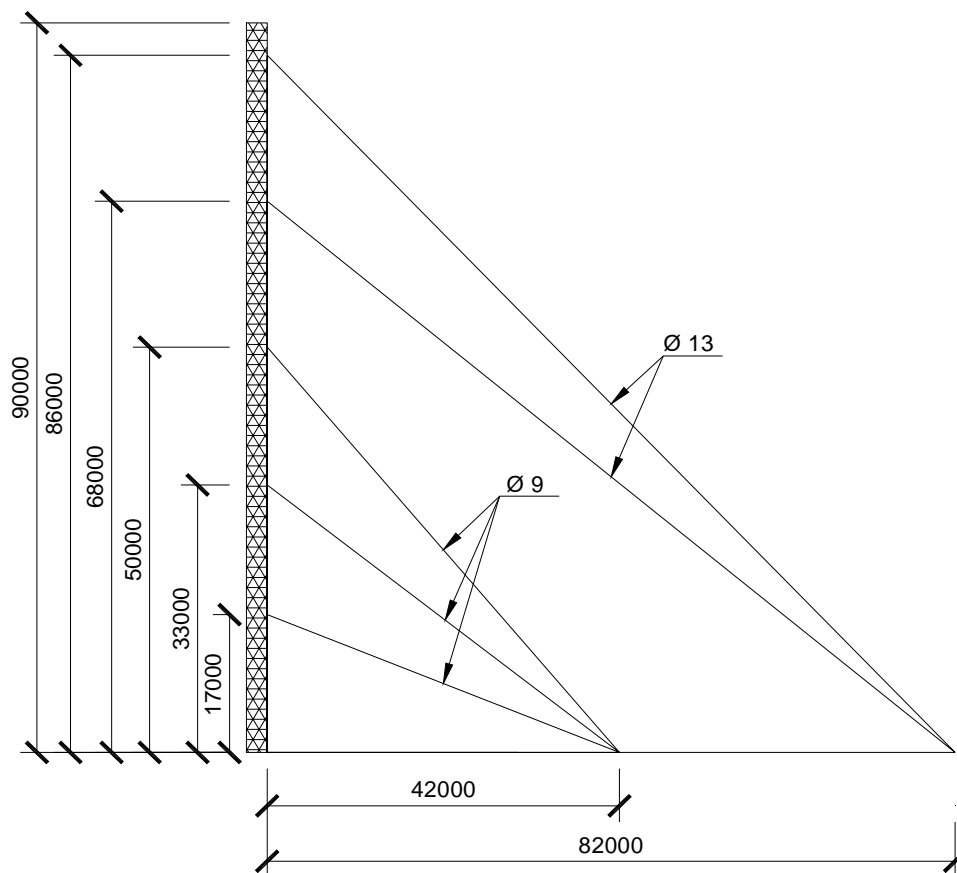


Figura 1 Elevación de la torre

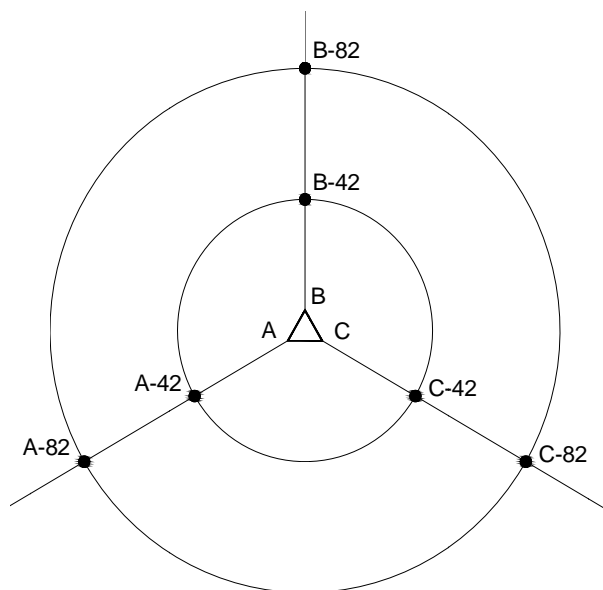


Figura 2 Vista en planta y distribución espacial de los cables

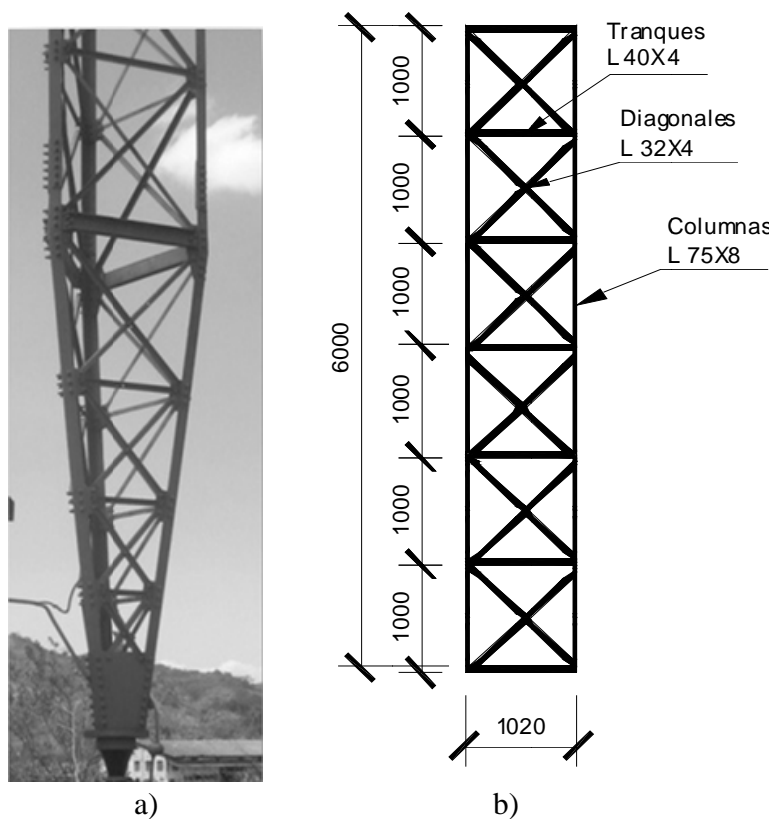


Figura 3 Fuste de la torre a) tramo inicial, b) tramo típico

Modelación de la torre

El fuste se modeló como una armadura espacial, conformando la estructura tridimensional de sección triangular equilátera. Las uniones entre tramos verticales se realizan por seis pernos en las columnas, garantizando de esta forma el empotramiento. Las diagonales y tranques se unen a las columnas por un solo perno, así como el punto de cruzamiento entre diagonales, por lo cual sus uniones se consideran articuladas.

Los cables fueron modelados utilizando una formulación elástica catenaria que representa su comportamiento bajo las cargas de peso propio y fuerzas impuestas de pretensado. El peso de los cables y su flecha correspondiente son calculados por el programa de cálculo SAP 2000, versión 12 automáticamente. Para obtener la deformada inicial de los cables se aplicó una fuerza en el extremo unido a tierra, igual a la fuerza de pretensión inicial (10 % de la carga de rotura). A partir de esta fuerza impuesta y considerando el peso propio de los elementos, se genera la geometría inicial de la estructura, obteniendo la matriz rigidez del conjunto a partir de la cual se desarrolla el análisis.

La carga sobre los cables se considera actuando distribuida uniformemente sobre ellos en la dirección del viento analizada. Ver Figura 4.

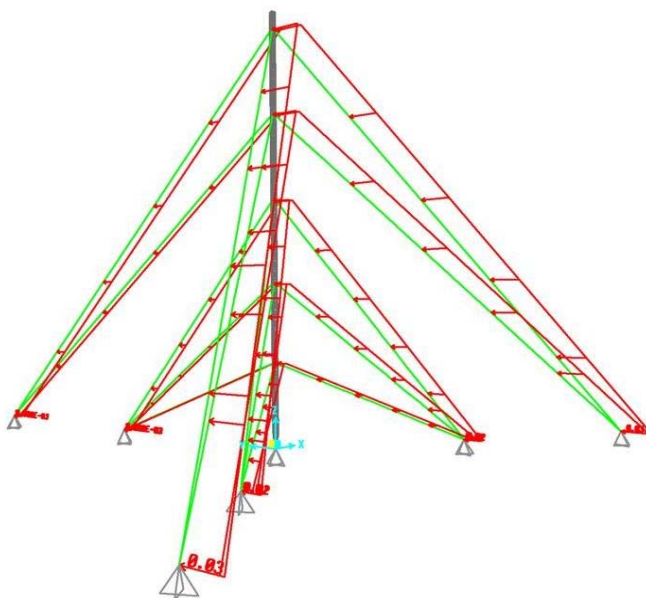


Figura 4 Esquema de las cargas de viento en los cables, Dirección 0.

El material se consideró trabajando en régimen lineal, elástico y con propiedades constantes en el tiempo. El material utilizado para los elementos del fuste fue acero de tensión de fluencia igual a 250 MPa, mientras que para los cables se utilizó acero de 1600 MPa de fluencia.

Para el análisis de la estructura se tuvieron en cuenta la carga permanente y la carga de viento extrema. Las direcciones del viento estudiadas fueron 0°, 60° y 90° grados según se recomienda en (Smith, 2007, CIRSOC-306, 1992, TIA-EIA/222-F, 1996), Figura 5.

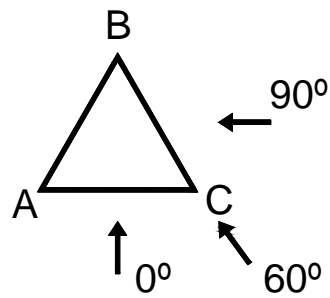


Figura 5. Direcciones de viento principales consideradas en el análisis

El método utilizado para la obtención de la respuesta dinámica de la torre bajo carga de viento extrema fue el Patch Load de acuerdo a lo establecido en la Norma Británica (BS8100-4, 1995). El análisis de la estructura se realizó contemplando la no linealidad geométrica de la estructura.

Cambios realizados al modelo original

Para el estudio de la influencia de las variaciones en la geometría y condiciones de apoyo en la capacidad resistente de la torre, se combinaron dos formas adoptadas para el apoyo del fuste y tres formas de arreglo espacial. Las formas de arreglo espacial fueron: con dos diagonales por marco, (Modelo 1 y típico), con una sola diagonal alterna por marco, (Modelo 2 y 2a) y con una sola diagonal por marco paralelas entre sí, (Modelo 3 y 3a), ver

Figura 6. Se generaron cinco modelos de torre para el estudio más el modelo típico tomado como patrón de referencia.

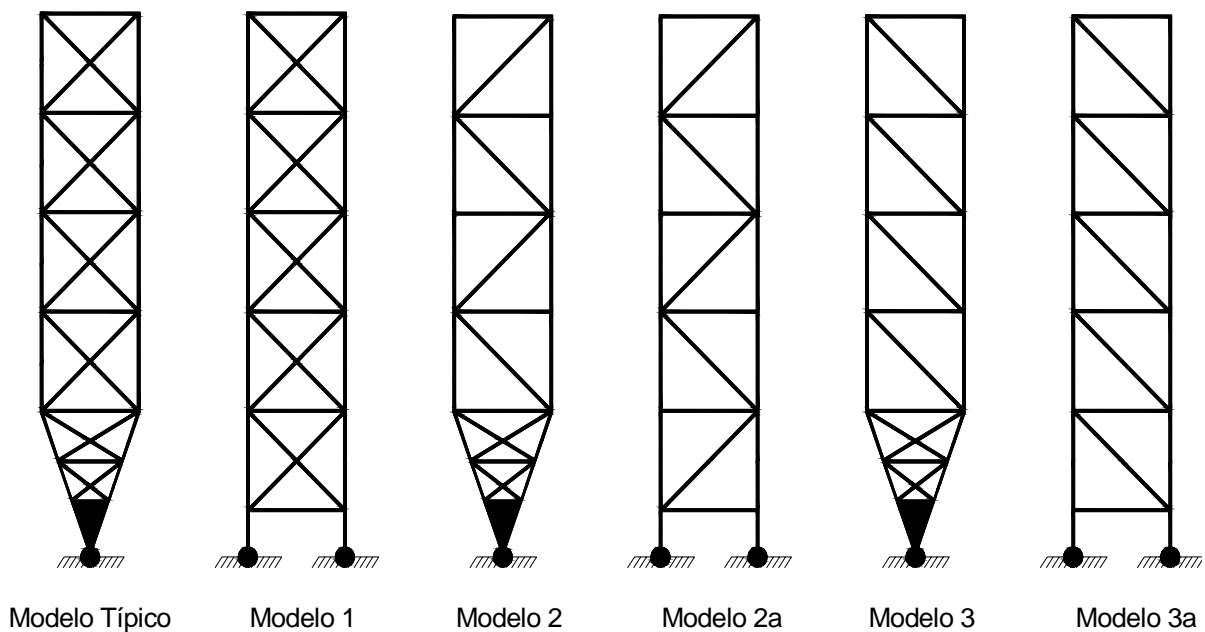


Figura 6. Esquema de los modelos de estudios

Resultados y discusiones:

El análisis de los resultados del estudio de las distribuciones espaciales de la torre, está basado en la comparación del MTípico, M2, M3, y la comparación del M1, M2a, M3a, ver Figura, para el estado de carga final en las direcciones de viento 0° y 90° , que son las más desfavorables.

Las columnas trabajan fundamentalmente a compresión, se obtiene que para los modelos de una sola diagonal en cualquiera de sus conformaciones (M2 y M3) los valores de fuerzas son mayores y no hay mejoras con respecto al modelo Típico. Igualmente para los M1, M2a y M3a se puede constatar que las columnas del modelo de dos diagonales (M1) son las menos esforzadas y que al cambiar para una sola diagonal los esfuerzos aumentan. El comportamiento de las columnas es similar para los modelos (M2 y M3) y para los (M2a y M3a). Ver Figura 7 y Figura 8.

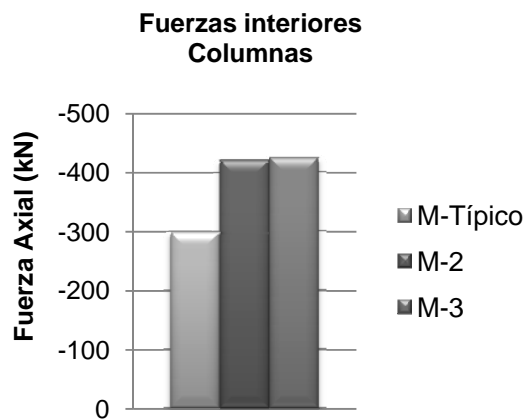


Figura 7 Mayores valores de fuerza modelos articulados

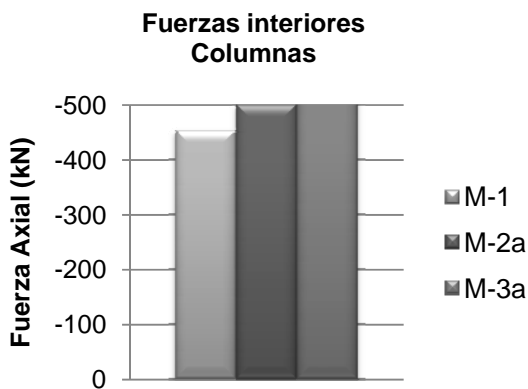
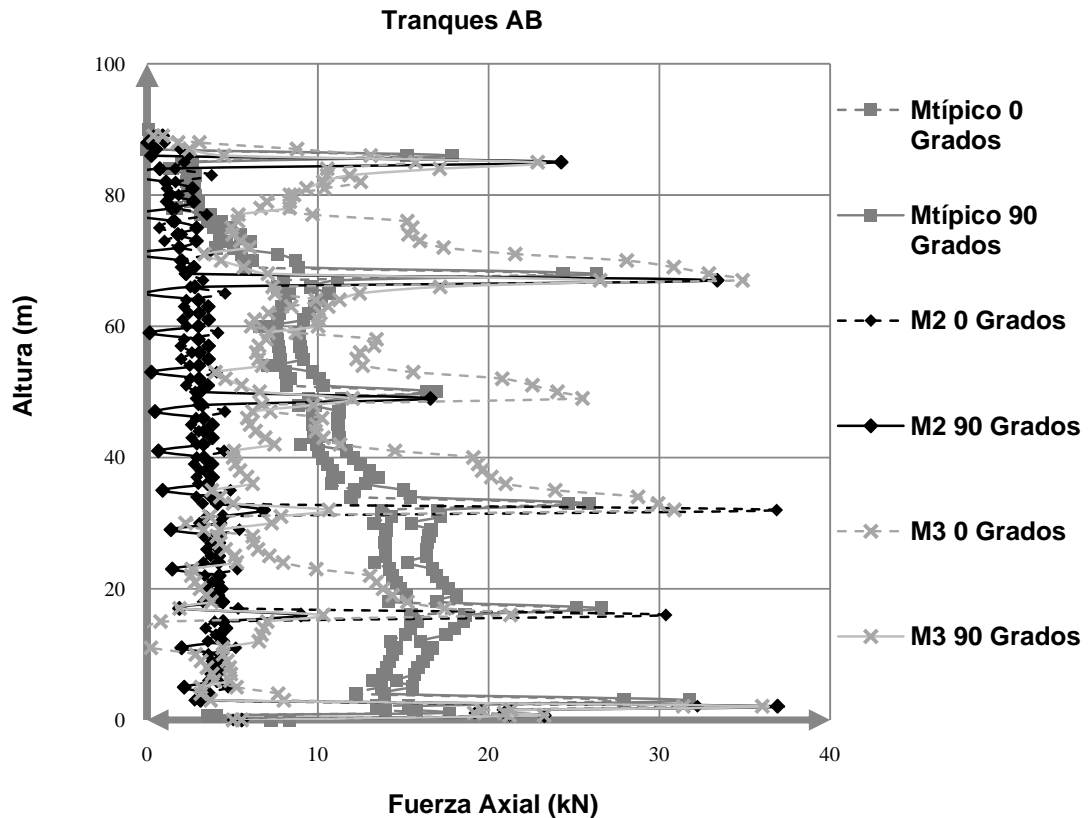


Figura 8 Mayores valores de fuerza modelos empotrados

Los tranques del fuste trabajan a tracción. Los valores de la fuerza axial en los niveles de unión de los cables con el fuste aumentan en todos los modelos con relación al modelo típico, siendo más desfavorable en los modelos 2 y 3 correspondientes a apoyo articulado y diagonales simples, ver Figura 9.

Las diagonales, por su parte, están sometidas fundamentalmente a esfuerzos de compresión. Los mayores esfuerzos se concentran en la base de la torre y en los niveles donde están los cables y respecto a los esfuerzos de tracción se producen incrementos con respecto al M típico. Las fuerzas interiores máximas están en las diagonales CA para los M2, M2a, M3 y M3a y las diagonales BC para



Mtípico y M1.

Figura 9 Mayores valores de fuerza modelos empotrados

Los cables más esforzados son los de la dirección del vértice C para los 6 modelos (Típico, 1, 2, 2a, 3 y 3a). El cable más esforzado es para todos los modelos el del nivel 4 a 68 metros de altura del vértice C y para la dirección de viento 90 grados.

Para la base del fuste empotrado se tomaron las reacciones verticales de la columna más cargada correspondiente al vértice A mientras que en el caso de los modelos articulados se tomó la reacción única en el apoyo. Tanto para los modelos articulados como para los empotrados el más desfavorable resultó ser el que corresponde con la doble diagonal, o sea los de mayor peso propio de la estructura. Los valores de las reacciones en los anclajes se dividen en tres componentes $F(x)$, $F(y)$ y $F(z)$. Los mayores valores corresponden a la componente z para todos los casos.

El análisis de los resultados del estudio de las condiciones de apoyo del fuste, se basó en la comparación de los modelos Mtípico con M1 y M2 con M2a.

Las columnas trabajan fundamentalmente a compresión. A partir de la comparación realizada entre el Mtípico y el M1 se obtuvo mayores valores de fuerzas en las columnas del M1. En la comparación del M2 y el M2a, sucede similar porque se obtienen mayores valores de fuerzas interiores del M2a con respecto

al M2. Se pudo constatar entonces que los modelos de base articulada producen menores esfuerzos en estos elementos ver Figura 10.

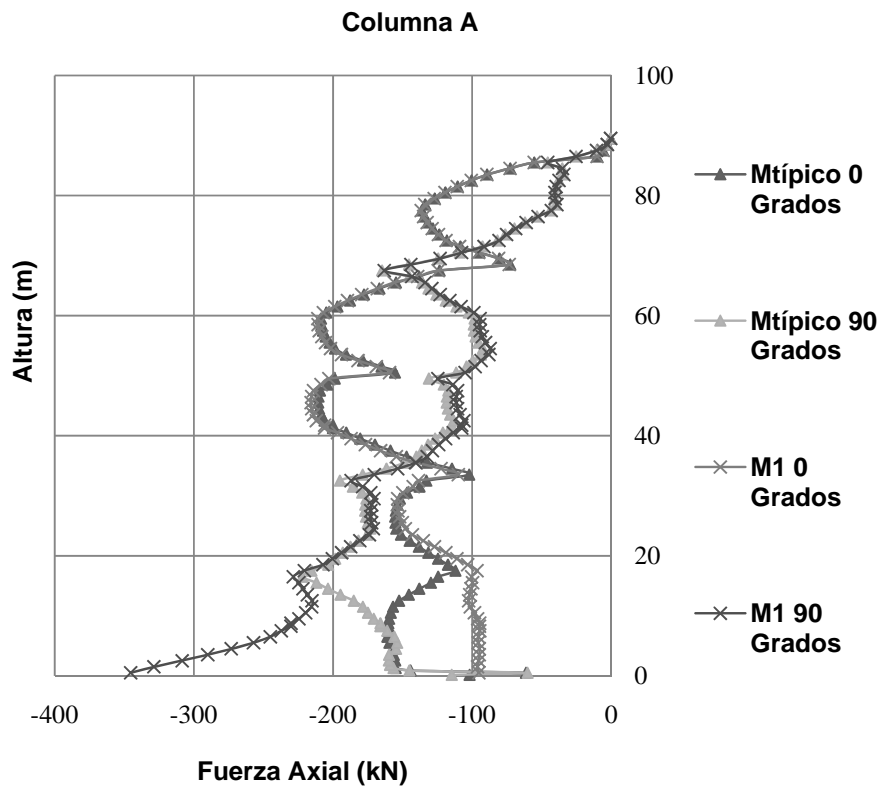


Figura 10 Comportamiento de la columna A para el caso de la base empotrada y articulada.

Para los tranques se observa también que en los modelos de base articulada se producen menores esfuerzos axiales.

Respecto a las diagonales se observa que las variaciones de las condiciones de apoyo no producen efectos significativos en los valores de fuerzas axiales a los que están sometidos.

Respecto a los cables, las fuerzas interiores mayores se encuentran en la dirección radial del vértice C para los 4 modelos (Típico, 1, 2 y 2a). Respecto a los anclajes los mayores valores corresponden a la componente z para todos los casos. Para estos dos elementos se pudo determinar que los cambios en las condiciones de apoyo del fuste no ejercen una influencia considerable sobre sus valores de fuerza axial.

Conclusiones:

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio el cambio de la condición de apoyo de articulado a empotrado es desfavorable para la torre ya que aumenta el valor de la fuerza axial en las columnas del tramo inferior de la misma.

Ing. Alejandro López Llanusa, Ing. Vivian Elena Parnás, Ing. Patricia Martín Rodríguez. Análisis de la forma del fuste y condiciones de apoyo para una Torre Atirantada.

Los cambios en el arreglo espacial de las diagonales dobles a diagonales simples de la torre no mejoran la capacidad de la misma frente a la acción del viento ya que aumentan significativamente los valores de fuerza axial en las columnas y las diagonales.

Para la torre en estudio los dos casos analizados de arreglos espaciales son iguales en el comportamiento y no introducen mejoras al modelo Típico.

Bibliografía:

- BRUNEAU, M., MAGUED, M. & DRYBURGH, R. (1989) Evolution of design standards and recorded failures of guyed towers in Canada. *Canada Journal Civil Engineering*, Vol 16, pp 725-732.
- BS8100-4 (1995) Lattice towers and masts Part 4: Code of practice for loading of guyed mast. *British Standards Institution, London, UK*.
- CIRSOC-306 (1992) *Estructuras de acero para Antenas* INTI-CIRSOC, Argentina.
- ELLIS, B. J. S., SHYU, C. T. & QUENNEVILLE, J. H. P. (1998) Latticed Mast Structures. *Structural Engineering*.
- KEMP, A. R. & BEHNCKE, R. H. (1998) Behavior of Cross-Bracing in Latticed Towers *Structural Engineering*
- MIKITARENKO, M. A. & PERELMUTER, A. V. (1998) Safe fatigue life of steel towers under the action of wind vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76, 1091-1100.
- MOGENS, G. N. Y. U. S.-A. (2005) Design of guyed mast.
- MOGENS, N. (2006) Guyed Masts Exposed to Guy Failure. *Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety*. Caracas, Venezuela, CD ROM, ISBN: 0-7844-0791-6.
- PARNÁS, V. E. (2008) Influencia de la asimetría y la no linealidad de los cables en la vulnerabilidad estructural de torres atirantadas. *Departamento de Ingeniería Civil*. La Habana, Cuba, Cujae.
- SMITH, B. W. (2007) *Communication structures*, London, Great Britain.
- TIA-EIA/222-F (1996) Normas estructurales para torres y estructuras de acero para antenas. Telecommunications Industry Association, USA.
- WHITBREAD, R. E. (1980) The influence of shielding on the wind forces experienced by arrays of latticed frames. IN PRESS, P. (Ed. *Proceedings of the Fifth International Conference on Wind Engineering*. Fort Collins, USA.