

INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LAS TENSIONES DE LOS CABLES DE TORRES ATIRANTADAS EN EL ANÁLISIS DINÁMICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

INFLUENCE OF THE VARIATION IN THE TENSION OF THE GUYS OF GUYED MASTS IN THE DYNAMIC ANALYSIS UNDER WIND LOAD IN THE TIME DOMAIN

Osmany Hernández Cruz¹, Vivian Elena Parnás², Yilián María Vidal Morffi³

¹Universidad de Holguín, Cuba, ohernandezc@uho.edu.cu, ²Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, vivian@civil.cujae.edu.cu, ³Universidad de Ciencias Médicas de Holguín, yili070209@nauta.cu

RESUMEN

En este trabajo se analiza la influencia de la variación en las tensiones iniciales de los cables de 4 torres atirantadas bajo carga de viento extremo en su comportamiento estructural. Se realizó un análisis dinámico y se compararon los valores de las fuerzas axiales de los elementos, así como la deformación del fuste, mediante una modelación tridimensional en el software de análisis estructural SAP2000 v20. El método de análisis utilizado fue el método dinámico completo en el dominio del tiempo mediante integración directa. Se utilizó la velocidad básica del viento determinada por el método de tormentas independientes (MIS) y la intensidad de turbulencia característica de una zona de ciclón. La conclusión principal del trabajo radica en que el comportamiento estructural dinámico más favorable se alcanza con la tensión inicial del 10%, en correspondencia con los criterios internacionales, una menor tensión inicial de los cables produce un aumento de los desplazamientos de las torres y de las fuerzas axiales en varios elementos, mientras que para la mayor tensión disminuyen los desplazamientos y aumentan las fuerzas axiales.

Palabras clave: Torres atirantadas; Ingeniería de viento; Elementos finitos; Modelación tridimensional; Carga de viento

Influence of the variation in the tension of the Guys of Guyed Masts in the dynamic analysis under wind load in the time domain.

This work is about the influence on the structural behavior of the variation in the initial tension of the guys of our guyed masts under extreme wind loads. A dynamic analysis was carried out and the values of the axial forces of the elements, as well as the deformation of the mast, were compared by a three-dimensional modelling in the SAP2000 v20 structural analysis software. The method of analysis used was the complete dynamic method in the time domain "Time History" through direct integration. The basic wind speed was determined by the Independent Storm Method (ISM) and the turbulence intensity characteristic of a cyclones one was used. The main conclusion of this paper is that with the initial tension of 10%, in correspondence with international criteria, a favourable dynamic structural behaviour is reached and a lower initial tension of the guys produces an increase in the displacements of the towers and the axial forces in several elements, while for greater tension, the displacements decrease and increase the axial forces.

Keywords: Dynamic analysis; Guyed Masts; Wind load; Finite Element Method.

1. INTRODUCCIÓN

Las torres de celosía fueron desarrolladas en la segunda década del siglo XX con el avance de las transmisiones de radio y posteriormente en la segunda mitad del mismo siglo con el auge de la televisión. Actualmente se dividen en dos grandes grupos: torres auto soportadas y torres atirantadas.

Las torres atirantadas son aquellas que pueden soportar su propio peso a compresión, pero no así las cargas laterales a las que se ve expuesta, como el viento y el sismo. Por lo cual se hace necesario el uso de tirantes, cables tensados los cuales le confieren la capacidad de soportar dichas fuerzas. Al ser elementos muy esbeltos, su sección, generalmente triangular, es mucho más estrecha que la de las torres auto soportadas. Su costo de construcción y montaje no es alto, pues la cimentación puede o no soportar los efectos de torsión, al ser consideradas empotradas o articuladas. Los cables son dispuestos a varios tramos de altura garantizando que dichos tramos puedan mantener su verticalidad y estabilidad.

Hull (Hull, 1960), realizó un estudio sobre el análisis de la flexión y estabilidad de torres atirantadas, consideró los cables parabólicos con cargas actuantes uniformes solamente verticales y la tensión de los cables constante en toda su longitud. Este análisis fue perfeccionado por Dean (Dean, 1962), el cual presentó una formulación exacta de un cable, válida tanto para análisis estático como dinámico, basó las ecuaciones diferenciales de los cables en un comportamiento flexible perfecto, lo cual permitió determinar el cambio de tensión que experimentan los cables. Diversas investigaciones como la de Odley (Odley, 1966) propusieron métodos de análisis que basaban en la sustitución de los cables por resortes elásticos y estos se analizaban de manera independiente al resto de la estructura. Más tarde se incorporaron modelos de representación por medio de barras rectas, con fuerza inicial de tesado y rigidez reducida calculada a través de un módulo equivalente o módulo de Ernst, el cual tiene en cuenta la variación de rigidez horizontal. Ekhande y Madugula (Madugula, 1988) presentaron una formulación para cables tridimensional con la ayuda de elementos finitos, donde la deformada puede ser modelada por una serie de elementos rectos con capacidad nula a la compresión. El método fue generalizado para modelar cualquier torre atirantada.

Estudios realizados por investigadores de Cuba (Elena Parnás, 2008), revelan que, en el territorio nacional, en el período de 1996-2012, han fallado un total de 59 torres de telecomunicaciones ante la exposición a fuertes vientos huracanados y tormentas severas, siendo la mayoría de ellas torres atirantadas. En este tipo de estructuras la tensión de los cables es un aspecto importante, debido a que esta determina la respuesta ante cargas horizontales como el viento, además de garantizar la estabilidad horizontal al conjunto. En Cuba las investigaciones en esta tipología estructural han estado dirigidas fundamentalmente al estudio de los efectos de la no linealidad geométrica de la estructura (Elena & Fernández, 2011) y de la asimetría de los anclajes (Martín Rodríguez, 2008) en la respuesta estructural bajo carga de viento, a través del método estático equivalente Patch Load, pero no se ha estudiado a fondo la influencia de la tensión en los cables mediante análisis dinámicos completos.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo tiene como objetivo cuantificar las variaciones que se producen en la respuesta estructural (fuerzas interiores y desplazamientos) de cuatro torres atirantadas típicas en Cuba, al variar la tensión inicial en los cables que la soportan, conduciendo un análisis dinámico en el Dominio del Tiempo, a través de funciones sintéticas obtenidas para una localidad de la región occidental de Cuba utilizando datos de campo. Para la modelación de las estructuras y el análisis dinámico se utilizó el software de análisis SAP2000 v20.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los objetos de estudio

El modelo MAR-300 tiene una sección transversal triangular equilátera de ancho 1.02 m, excepto en los primeros tres metros, donde se reduce hasta convertirse en un solo punto de apoyo (articulado). En la Figura 1 a) y b) y la Tabla 1 se muestran las dimensiones de la torre, así como la ubicación de los niveles de cables. Los elementos que componen el fuste son angulares de alas iguales.

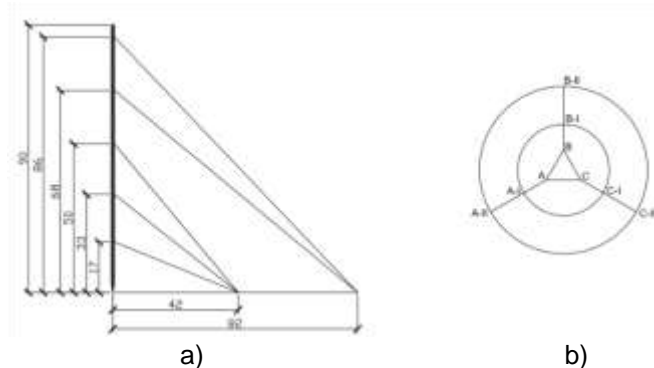


Figura 1 a) Elevación de la torre MAR-300 b) Planta de la estructura del modelo MAR-300

Tabla 1. Tipo y niveles de cables de la torre MAR-300. TS: Tensor simple.

Cables					
Nivel	Tipo	Altura (m)	Radio de anclaje (m)	Diámetro (mm)	Tensión de rotura (kN)
1	TS	17,01	42,00	9	69
2	TS	33,01	42,00	9	69
3	TS	50,00	42,00	9	69
4	TS	68,00	82,00	13	120
5	TS	86,00	82,00	13	120

El modelo MAR-181 posee una sección transversal triangular equilátera, de ancho 1.20 m. En la Figura 2 a) y b) se muestran las dimensiones de la torre, así como la ubicación de los niveles de cables, Tabla 2. Los elementos que componen el fuste, son angulares de alas iguales.

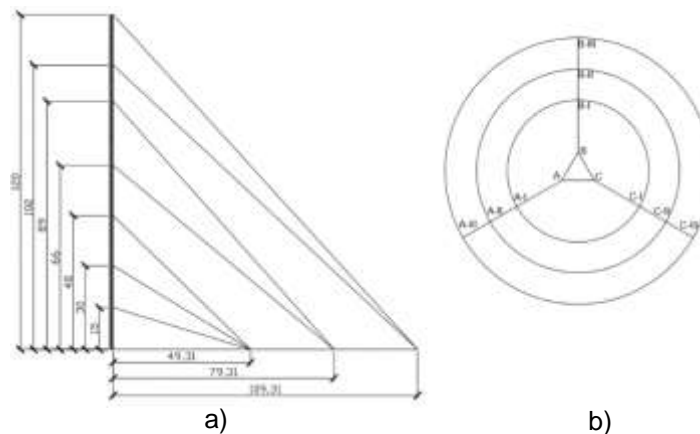


Figura 2. a) Elevación de la torre MAR-181, b) Planta de la estructura del modelo MAR-181

Tabla 2. Tipo y niveles de cables de la torre MAR-181. TS: Tensor simple.

Cables					
Nivel	Tipo	Altura (m)	Radio de anclaje (m)	Diámetro (mm)	Tensión de rotura (kN)
1	TS1	15,00	49,31	16	235
2	TS2	30,00	49,31	16	235
3	TS3	48,00	49,31	16	235
4	TS4	66,00	79,31	19	331
5	TS5	89	79,31	19	331
6	TS6	102	109,31	19	331
7	TS7	120	109,31	19	331

El modelo MAR-2008 tiene una sección transversal triangular equilátera de 0.94 m, excepto en el primer metro donde se reduce hasta convertirse en un solo punto. En la Figura 3 a) y b) se muestran las dimensiones de la torre, así como la ubicación de los niveles de cables, Tabla 3. Los elementos que componen el fuste de la torre son angulares de alas iguales.

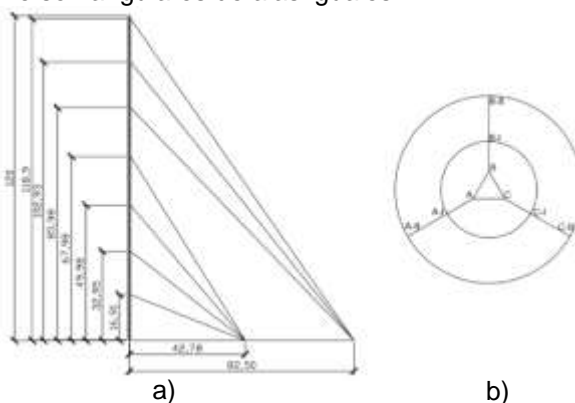


Figura 3. a) Elevación de la torre MAR-2008 b) Planta de la estructura del modelo MAR-2008

Tabla3. Tipo y niveles de cables de la torre MAR-2008. TS: Tensor simple.

Cables					
Nivel	Tipo	Altura (m)	Radio de anclaje (m)	Diámetro (mm)	Tensión de rotura (kN)
1	TS1	16,91	42,31	13	147
2	TS2	32,95	42,31	13	147
3	TS3	49,98	42,31	13	147
4	TS4	67,98	42,31	13	147
5	TS5	85,98	82,5	13	147
6	TS6	102,93	82,5	13	147
7	TS7	118,9	82,5	13	147

El modelo Televilla posee una sección transversal triangular equilátera de 1.50 m, excepto en los primeros cuatro metros, donde se reduce hasta convertirse en un solo punto de apoyo (articulado). En la Figura 4 a) y b) se muestran las dimensiones de la torre, así como la ubicación de los niveles de cables, Tabla 4. Las columnas de la torre son tubulares de diámetros variables según la altura, el resto de los elementos son angulares de alas iguales.

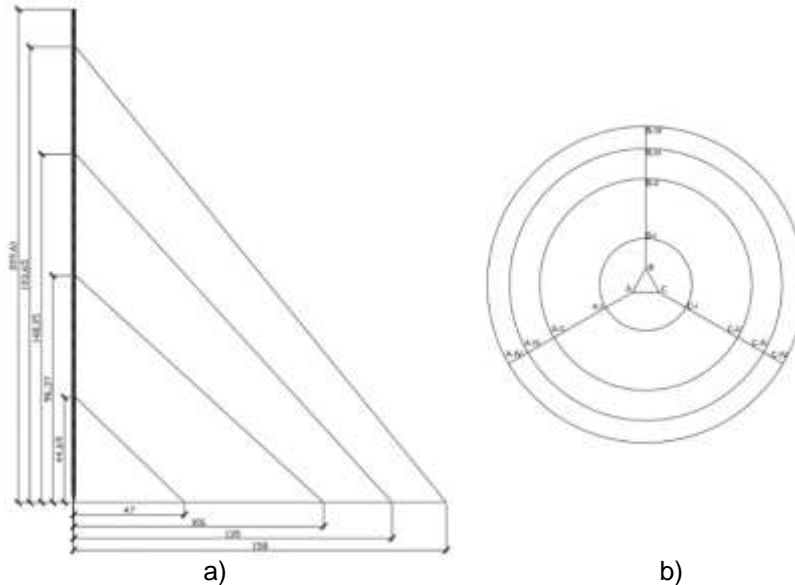


Figura 4. a) Elevación de la torre Televilla b) Planta de la estructura de la torre Televilla.

Tabla 4. Tipo y niveles de cables de la torre Televilla. TS: Tensor simple.

Cables					
Nivel	Tipo	Altura (m)	Radio de anclaje (m)	Diámetro (mm)	Tensión de rotura (kN)
1	TS1	44,69	47,00	38	1406
2	TS2	96,37	106,00	38	1406
3	TS3	148,05	135,00	46	2046
4	TS4	193,65	158,00	41	1655

Modelación de la estructura

La estructura analizada fue modelada utilizando el software de modelación computacional SAP2000 v20.2. El fuste fue modelado como una armadura espacial tridimensional, teniendo en cuenta cada uno de sus elementos: columnas, diagonales, tranques exteriores y tranques interiores.

Las columnas en el modelo se modelaron continuas desde la base hasta el tope, el resto de los vínculos se consideraron articulados.

Las condiciones de apoyo de la estructura están dadas por la unión del fuste al suelo y la unión de los cables al suelo mediante anclajes. Ambos tipos de uniones fueron considerados como articulaciones espaciales. En el caso de la unión del fuste al suelo esto se debe al empleo de una unión tipo "punta de diamante" la cual permite la rotación de la estructura, en el caso del modelo MAR-181 la unión al suelo de cada columna se consideró articulada, pero las tres funcionan como un empotramiento virtual, mientras que el anclaje de los cables al suelo fue considerado como una articulación debido a la incapacidad de los cables de asumir los momentos flectores.

En el caso de los cables, los mismos fueron modelados siguiendo la formulación elástica catenaria que representa el cable bajo las cargas de peso propio y fuerzas impuestas de pretensado. Para ello se impuso la fuerza de pretensado la cual se consideró aplicada en el extremo del cable unido al anclaje, de igual valor a la fuerza de tesado inicial. En este estudio se tomaron cuatro tensiones iniciales para los

cables teniendo el rango de variación sobre el valor de tensión recomendado (CSA, 2001) para estas estructuras. Se modelaron así cuatro tensiones iniciales de cables: 5%, 10%, 15% y 20% de la carga de rotura.

Modelación de la carga de viento y aplicación al modelo

El método de análisis dinámico “Dominio del tiempo” se basa en la aplicación sobre la estructura de funciones de carga variables en el tiempo en un rango de tiempo dado, con un paso de tiempo definido previamente. Dichas funciones de carga se obtienen a partir de la generación de manera computacional y el procesamiento de funciones de velocidad sintéticas, las cuales son determinadas a partir de las velocidades media y turbulenta del viento en la región geográfica analizada. La velocidad básica de viento V_{10} se determinó a partir de los resultados obtenidos en estudios previos (García, 2017), utilizando el Método de Tormentas Independientes (MIS). El valor obtenido para un intervalo de tiempo de 10 minutos y un período de retorno de 50 años fue de 28,80 m/s, el cual se tomó para generar las funciones sintéticas de velocidad en el análisis dinámico.

Las funciones fueron generadas bajo la combinación de carga 1,2 G + 1,4 W + 1Te y aplicadas en varios niveles sobre la estructura, estos niveles fueron determinados siguiendo recomendaciones internacionales que sugieren no espaciar los puntos de aplicación de las cargas más de 7 m entre sí. Estas series de funciones fueron generadas para la dirección de viento de 0°.

La fuerza total aplicada sobre los elementos de la estructura se puede calcular como la adición de la fuerza media y la fuerza fluctuante actuando en un punto. De acuerdo al método “Dominio del Tiempo”, la fuerza media de viento (\bar{F}) y la fuerza fluctuante ($F_u(z, t)$) se obtienen de aplicar las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, descritas por Simiu, E (Simiu & Scanlan, 1996).

$$\bar{F}(z) = 1/2 \rho_a C_a A_{ref} \bar{U}(z)^2 \quad (1)$$

$$F_u(z, t) = \rho_a C_a A_{ref} \bar{U}(z) u(z, t) \quad (2)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire de valor 1.205 kg/m^3 ; C_a es el coeficiente de forma; A_{ref} es el área proyectada de los elementos que conforman la cercha metálica en el plano perpendicular a la dirección del viento; $\bar{U}(z)$ es la velocidad media para las distintas alturas definidas en la torre y $u(z, t)$ es la velocidad turbulenta para las distintas alturas definidas en la torre.

El cálculo de la velocidad media del viento $\bar{U}(z)$ se realizó de acuerdo a la ley logarítmica recomendada por Simiu y Scanlan (Simiu & Scanlan, 1996).

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (3)$$

La componente turbulenta en la dirección longitudinal del viento da por la expresión:

$$U(z, t) = \bar{U}(z) + u(z, t) \quad (4)$$

La turbulencia $u(z, t)$ fue obtenida mediante un proceso de simulación sintética considerando solamente su componente longitudinal. Fueron establecidas para ello las características energéticas del campo de viento con el empleo del espectro de vonKármán, en correspondencia con mediciones a escala real durante el paso de huracanes (Fu, Wu, Xu, Li, & Xiao, 2012; Li, Zhi, & Hu; Tamura, Cao, & Giang, 2012) confirman que es la mejor representación. En el caso de los cables, solo se asignaron las cargas medias obtenidas como cargas uniformemente distribuidas en la longitud total del cable.

Debido a la no linealidad geométrica de las torres atirantadas se empleó la integración directa por el método de Newmark- β con los parámetros gamma y beta fueron tomados de valor igual a $\gamma=0.5$ y $\beta=0.25$. El valor tomado del intervalo de tiempo fue de 0.05 segundos con el fin de que coincidiera con el tamaño de intervalo que se empleó en la generación de las funciones de velocidad de viento. El número de pasos de tiempo analizado también se hizo coincidir con el tiempo total para el cual se generó la función de velocidad del viento el cual fue 819.2 s; aunque para el cálculo en el software estos se filtraron y el tiempo total que se consideró fueron los últimos 600 segundos de los inicialmente fijados, obteniéndose 12000 pasos de tiempo.

La razón de amortiguamiento crítico se fijó en 0.02 de acuerdo a referencias internacionales (Grey, 2006; Kaul, 1999; Sparling, 1995) y los coeficientes a_c y b_c fueron calculados a partir de los períodos obtenidos para los dos primeros modos de oscilación fundamentales de la estructura.

Resultados

Para el análisis de los elementos de la torre se obtuvieron los valores de fuerzas axiales y los desplazamientos máximos. Los vértices de la sección transversal se denominaron A, B y C, Figura 5. Las columnas y los cables se identificaron según el vértice donde están localizados, los tranques y las diagonales se denominaron según la cara a la que pertenecen AB, BC, y CA.

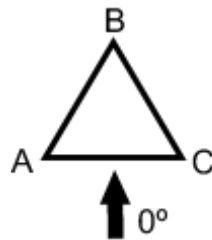


Figura 5. Denominación de los vértices y dirección del viento analizada.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de fuerza axial y desplazamiento, Figuras 6-9.

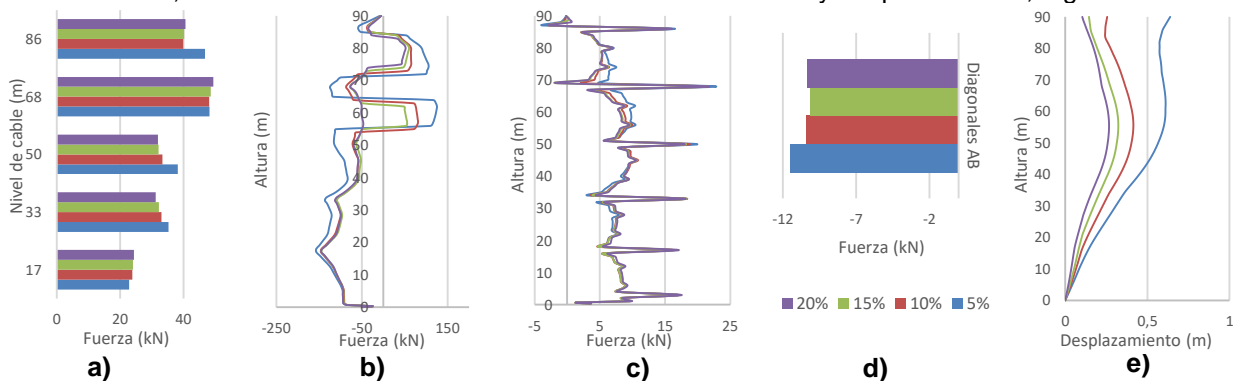


Figura 6. Fuerzas axiales y desplazamientos obtenidos para la torre MAR-300.

a) Cables b) Columnas c) Tranques d) Diagonales e) Desplazamientos

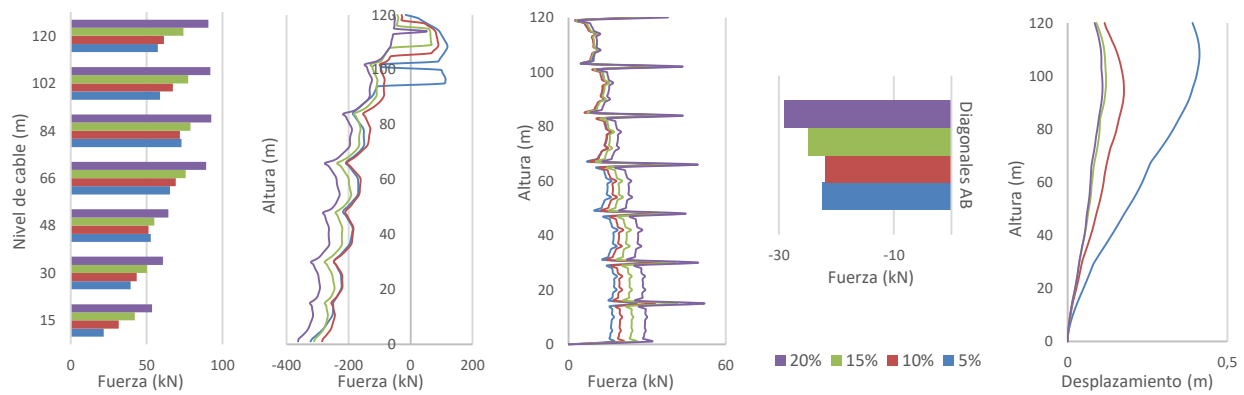


Figura 7. Fuerzas axiales y desplazamientos obtenidos para la torre MAR-181.
 a) Cables b) Columnas c) Tranques d) Diagonales e) Desplazamientos

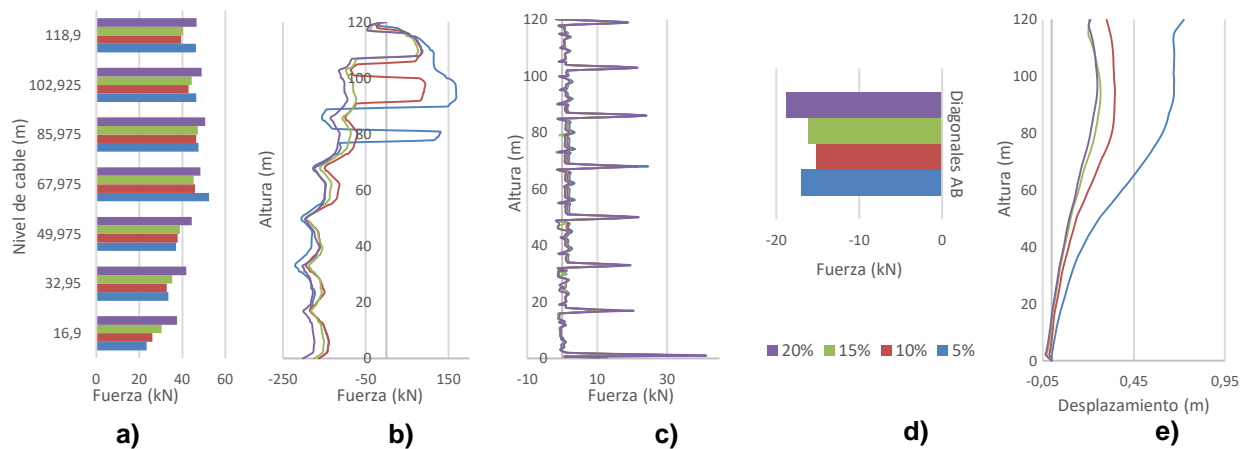


Figura 8. Fuerzas axiales y desplazamientos obtenidos para la torre MAR-2008.
 a) Cables b) Columnas c) Tranques d) Diagonales e) Desplazamientos

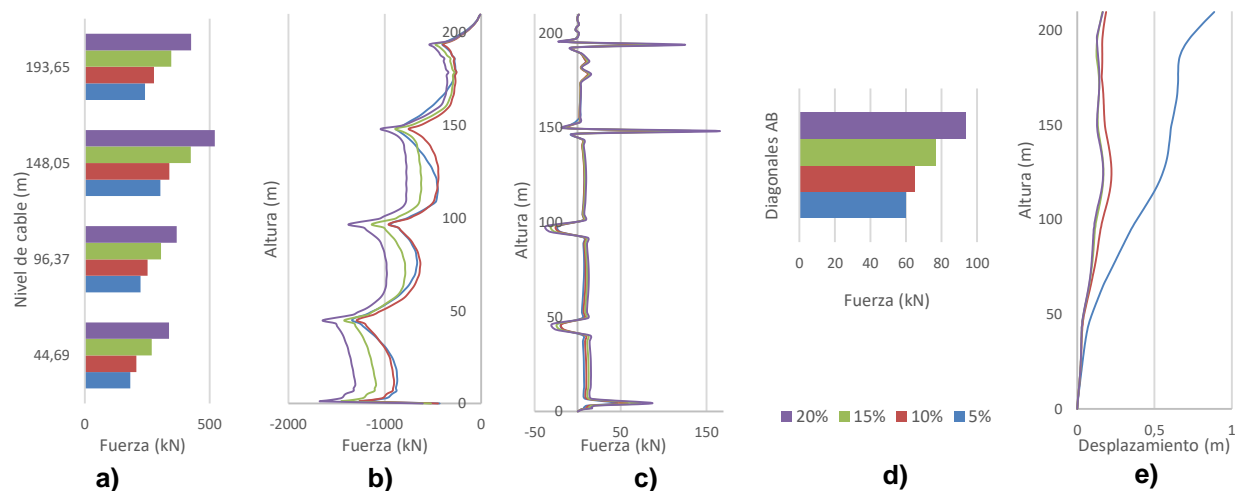


Figura 9. Fuerzas axiales y desplazamientos obtenidos para la torre Televilla.

a) Cables b) Columnas c) Tranques d) Diagonales e) Desplazamientos

Cables

En el caso de las torres MAR 300 y MAR 2008 la tensión del 5% de la carga de rotura del cable, alcanza, en casi todos los niveles de cables los valores más altos. Sin embargo, en las torres MAR 181 y Televillano ocurre así, sino que, los valores más bajos corresponden al 5% de tensión inicial. Los valores de carga para el 10 y el 15%, se mantienen similares en la MAR 300 y la MAR 2008, alcanzando diferencias significativas en los dos restantes. Pero es la tensión inicial del 20%, la que alcanza, en casi todos los casos las mayores cargas axiales.

Columnas

Los valores máximos de compresión en las torres MAR 181 y TELEVILLA se alcanzan con el 20% de tensión inicial. En las torres MAR 2008 y MAR 300, estos valores máximos se alcanzan con el 5% de tensión inicial. Se observa también que la tensión inicial que genera menos carga axial en todos los casos es la del 10%. Además, a medida que aumenta la tensión en los cables, exceptuando la del 10%, la carga axial tiende a subir, principalmente en la parte baja del fuste de la torre.

Tranques

Se observa que las mayores cargas de tracción ocurren en el lugar de los anclajes de los cables al fuste. Estas cargas coinciden con el nivel de cable que más se carga, en la mitad superior de las torres. Se aprecia además que la tensión inicial de 5% es la que genera menos cargas en los tranques, excepto en la MAR 300 que es la tensión inicial de 10%. Las mayores cargas se alcanzan con el 20% de tensión inicial de los cables. De manera general se observa que el aumento de la tensión en los cables aumenta la carga en los tranques, especialmente cuando varía del 15% al 20% de tensión inicial.

Diagonales

Para las diagonales se escogió el valor máximo de compresión y tracción de cada cara de la torre. Los mayores valores se observaron en la cara AB. La tendencia es a comprimirse en mayor medida, excepto en TELEVILLA, donde ocurre lo contrario. Se observó que una disminución en la tensión de los cables produce un aumento en la fuerza axial de las diagonales en las torres MAR 300 y MAR 2008, mientras que en las torres MAR 181 y TELEVILLA la disminución de la tensión produce una leve disminución (menor de 5 kN) en la fuerza axial.

Desplazamiento

Los desplazamientos representados son los correspondientes a la columna A, pues los de las demás columnas son muy similares, con diferencias despreciables. Los desplazamientos debido a la carga de viento extrema en las columnas de las torres analizadas tienen un comportamiento similar, aumentando desde la base al tope. Los mayores desplazamientos se observaron para la menor tensión inicial (5%) en todas las torres y estos disminuyen al aumentar la tensión inicial. Se aprecia una marcada diferencia entre los desplazamientos correspondientes al 5% de tensión inicial y los restantes. Los valores de desplazamiento varían entre los 0.2 y 0.6m.

4. CONCLUSIONES

1. La variación de la tensión inicial en los cables modifica significativamente la respuesta estructural de las torres estudiadas.
2. Las mayores fuerzas axiales se alcanzan con las tensiones más altas (15 y 20% de la carga de rotura), sin embargo, una distensión en los cables por debajo del nivel recomendado (10%), tiende a aumentar la fuerza axial en varios elementos del fuste.
3. Los desplazamientos más grandes se alcanzan con la mínima tensión inicial en los cables (5%), al aumentar esta, disminuyen.

4. La mejor relación entre fuerza axial y desplazamiento se obtiene para el 10% de la tensión inicial de los cables.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CSA. (2001). Antennas, towers, and antenna supporting structures. Standard CAN/CSA -S37-01. In. Canadian Standards Association, Rexdale, Canada.
- Dean, D. L. (1962). Static and Dynamic Analysis of Guy Cables. *Transactions, ASCE, Part 2 of Vol. 127*, p.382-419.
- Elena Parnás, V. (2008). *Influencia de la asimetría de anclajes y la no linealidad de los cables en la vulnerabilidad estructural de torres atirantadas*. (Doctorado), ISPAJE, La Habana, Cuba.
- Elena, V. B., & Fernández, I. (2011). No linealidad geométrica en torres atirantadas. *Revista Cubana de Ingeniería, II(3)*, 37-48.
- Fu, J. Y., Wu, J. R., Xu, A., Li, Q. S., & Xiao, Y. Q. (2012). Full-scale measurements of wind effects on Guangzhou West Tower. *Engineering Structures*, 35, 120-139.
- García, K. L. (2017). *Análisis estadístico de velocidades de viento para el cálculo de estructuras*. (Master Maestría), UTH Jose A. Echeverría, La Habana.
- Grey, M. (2006). *Finite Element Seismic Analysis of Guyed Masts*. (Master of Science), University of Oxford, UK, Oxford,.
- Hull, F. H. (1960). *Some problems in the analysis of tall multi-level guyed towers*. (Ph D), Princeton University,
- Kaul, R. (1999). *Dynamic analysis of guyed towers subjected to wind loads incorporating nonlinearity of the guys*. (Master of Science), Texas Tech University, Texas.
- Li, Q. S., Zhi, L., & Hu, F. Boundary layer wind structure from observations on a 325 m tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98(12), 818-832.
- Madugula, S. G. E. M. K. S. (1988). Geometric Non-linear Analysis of Three Dimensional Guyed Towers. *Computers & Structures*, 29(No. 5), 801-806.
- Martín Rodríguez, P. (2008). *Influencia de la Asimetría de los Anclajes en el Análisis Estructural de una torre atirantada*. CUJAE, La Habana.
- Odley, E. G. (1966). Analysis of high guyed towers. In *J. Struct. Div ASCE ST1*.
- Simiu, E., & Scanlan, R. H. (1996). *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design. Third Edition*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Sparling, B. F. (1995). *The dynamic behaviour of guys and guyed masts in turbulent winds*. PhD Thesis. University of Western Ontario, London, Canada,
- Tamura, Y., Cao, S., & Giang, L. T. (2012). *Wind characteristics of strong tropical cyclones*. Paper presented at the VI National Conference on Wind Engineering, Roorkee at New Delhi, India.

SOBRE LOS AUTORES

Ing. Osmany Hernández Cruz, Universidad de Holguín, Profesor Auxiliar. Cursó los estudios de maestría en la Universidad Tecnológica de la Habana. Actualmente se encuentra en una beca de investigación doctoral en Western University, Canadá.

Dra. C. Vivian Elena Parnás, Universidad Tecnológica de la Habana, Profesor Titular. Directora del Centro de Estudios de Arquitectura Tropical (CECAT), directora de los programas de maestría y doctorado de la CUAJE y directora del Centro de Estudios de Aerodinámica y Torres de Comunicación.

Lic. Yilián Vidal Morffi, Universidad de Ciencias Médicas de Holguín, Profesor Auxiliar.