

Artículo Original

Estudio de variantes de fuste para torre atirantada

Study of shaft variations for guyed mast

Meilín Ayala Garriga^{1*}, Gerardo Pérez Martínez¹, Roberto de la C. Llerena Tanquero¹

1. Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de Estructuras. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

*Autor para correspondencia: meilinayagar@civil.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#) 

Resumen

Uno de los trabajos que realizan los ingenieros estructurales dedicados al diseño de torres reticuladas atirantadas, consiste en el estudio del arreglo entre los elementos diagonales y horizontales, así como los niveles de cables en la altura de la torre con el objetivo de aumentar la capacidad resistente y reducir la vulnerabilidad estructural ante cargas horizontales como el viento. Este trabajo aborda el estudio de solución para una torre atirantada de telecomunicaciones de 102 metros de altura y seis niveles de cables que será instalada en la región occidental del país. Se realiza a partir de la demanda de la industria para solución de cubrimiento del sistema de comunicaciones de RADIOCUBA. Se estudiaron, empleando el software basado en el método de los elementos finitos SAP2000 v23, dos variantes de arreglo de diagonales manteniendo constante el ancho del fuste y distancia de arriostres horizontales, y dos variantes para la modificación de los cables relacionadas con el número de anclajes y los diámetros de los mismos, a fin de aumentar la capacidad resistente a las cargas de viento según la norma cubana. Finalmente se discuten las soluciones empleadas y se propone estudiar nuevas propuestas de modificaciones a la torre, puesto que ninguna de las variantes analizadas resiste las cargas de viento.

Palabras claves: Diseño estructural, Torre, Viento extremo

Abstract

One of the works carried out by structural engineers in structures dedicated to the design of lattice guyed mast consists of studying the arrangement between the diagonal and horizontal elements, as well as the cable levels at the height of the tower. Its main objective is to reduce structural vulnerability to horizontal loads such as wind. This work addresses the solution study for a 102-meter-high cable-stayed telecommunications tower with six levels of cables that will be installed in the western region of the country. It is carried out based on the demand of the industry for a coverage solution for RADIOCUBA's communications system. Using software based on the finite element method SAP2000 v23, two variants of arrangement of diagonals were studied, keeping constant the width of the shaft and the distance of horizontal braces, and two variants for the modification of the cables related to the number of anchors and their diameters, in order to increase the capacity resistant to wind loads according to the standard Cuban. Finally, the solutions used are discussed and it is proposed to study new proposals for modifications to the tower, since none of the variants analyzed resists wind loads.

Keywords: Structural design, mast, extreme wind

1. Introducción

En la actualidad, las torres metálicas de celosía son ampliamente empleadas en el campo de las telecomunicaciones como soporte de antenas, funcionando como enlace intermedio en un sistema de comunicación [1-4]. Estas estructuras se clasifican atendiendo a la forma de trabajo en autosoportadas o atirantadas.

Las torres atirantadas están compuestas por un fuste, armadura o cercha espacial, que puede encontrar articulado o empotrado en su unión a tierra, y arriostrado en una o diferentes alturas por los tirantes, cables previamente tensados.

Varios autores [5-8] estudiaron y adoptaron diferentes distribuciones espaciales de arreglos de fuste, con el empleo de montantes y tranques para tomar las compresiones y diagonales para tomar las tracciones. Algunas de las variantes de distribuciones de cerchas espaciales en los fustes de torres atirantadas encontramos en la bibliografía se encuentran los arreglos Z en paralelo (Figura 1. a)), arreglos Z en zigzag (Figura 1. b)), arreglos X (Figura 1. c)) arreglos en forma triangular o Δ (delta) (Figura 1. d)), arreglos en forma de diamante (Figura 1.e)), todos conformados por las diagonales y los tranques; así como arreglos en zigzag con las diagonales sin empleo de tranques (Figura 1. f)).

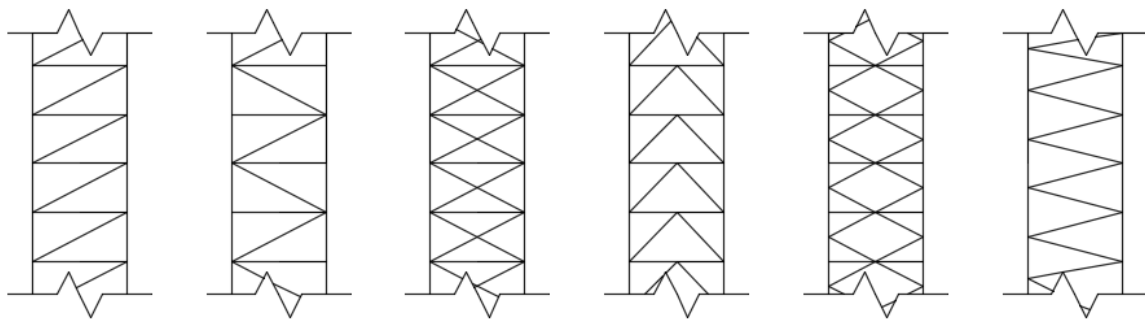


Fig.1 Variantes del fuste a) Arreglo Z en paralelo b) Arreglo Z en zigzag c) Arreglo X d) Arreglo Δ e) Arreglo diamante f) Arreglo en zigzag

En la investigación realizada por Elis [6] se estudiaron 11 configuraciones de distribución espacial, por medio de predicciones teóricas sin verificación experimental, resultando la variante de arreglo en forma de diamante (Figura 1. e)) la que mejor comportamiento presenta tanto frente a cargas horizontales como a cargas verticales.

López [5] combina dos formas adoptadas para el apoyo del fuste: convergiendo a un apoyo articulado o con columnas completamente rectas empotradas por separado en el suelo, con tres formas de arreglo espacial: una sola diagonal por marco paralelas entre sí (Figura 1. a)), una sola diagonal alterna por marco (Figura 1. b)) y dos diagonales por marco (Figura 1. c)). Se generaron cinco modelos de torre para el estudio, más un modelo típico como patrón de referencia (apoyo convergente a un punto con distribución espacial simulando un arreglo X). Los resultados mostraron que el cambio de la condición de apoyo de articulado a empotrado es desfavorable, mientras que los cambios en el arreglo espacial de las diagonales dobles a diagonales simples tampoco mejoran la capacidad de la torre frente a la acción del viento, ya que aumentan significativamente los valores de fuerza axial en las columnas y las diagonales; concluyendo que el arreglo X es la mejor de las opciones analizadas en dicho estudio.

Los cables en las torres atirantadas son elementos primordiales para transmitir los esfuerzos verticales a la cimentación, sin embargo, una de las causas fundamentales del fallo de las torres atirantadas es la rotura de los cables ante la acción del viento extremo [9, 10].

En el estudio realizado por Vivian B. Elena et al. [11] los resultados del estudio numérico demostraron que sí existe influencia de la topología de cables en los valores de fuerza axial y desplazamiento en la torre estudiada. Se demuestra que las variables dependientes que presentan influencia significativa son las fuerzas axiales de tracción en los elementos columnas, diagonales y tranques, así como la fuerza axial en compresión de los tranques y los desplazamientos. La cantidad de cables tiene influencia en todas las variables dependientes y además es la más significativa en los resultados. La disminución del número de anclajes produjo incrementos en las fuerzas axiales de los elementos y la disminución de la cantidad de cables y del diámetro de los cables generará incrementos en los elementos de la torre.

El cálculo de las torres atirantadas constituye uno de los grandes retos de los ingenieros estructurales, debido fundamentalmente a las características de flexibilidad que le confieren los apoyos elásticos y el comportamiento no lineal de los cables. Esto, junto con el gran número de modos de vibración activos que presentan estas estructuras, complejiza el análisis dinámico de las mismas [5, 12-14]. El análisis puede ser abordado mediante métodos estáticos equivalentes o dinámicos en el dominio del tiempo, principalmente por medio de las técnicas de integración directa. Los métodos en el dominio de la frecuencia, empleados recientemente [13-15], han sido cuestionados ya que no pueden analizar los efectos de la carga cuando existe no linealidad.

En la tesis doctoral de Sparling en 1995 [16] se investiga la respuesta dinámica no lineal de torres atirantadas ante cargas de viento extremo por medio de un análisis en el dominio del tiempo. Para estimar la componente fluctuante de la respuesta estructural, Sparling propone un método estático equivalente que denomina Patch Load (en inglés), el cual considera tanto la componente estática como dinámica de las cargas. El método se basa en una serie de patrones de carga estáticos que son aplicados sobre la torre, utilizando las recomendaciones de la IAAS (siglas en inglés de: International Association for Shell and Spatial Structures) para diseño y análisis de torres atirantadas [17] de 1981, perfeccionadas por investigaciones posteriores [18, 19]. Actualmente, el método estático equivalente Patch Load, está recogido en las normas internacionales y aún se aplica con frecuencia, incluso con buenos resultados en comparación con métodos en el dominio del tiempo [13].

Debido a la complejidad y el alto costo de realizar los análisis de estas estructuras de forma experimental, la modelación numérica y computacional es una importante herramienta para el cálculo de torres atirantadas.

En este trabajo se estudia el comportamiento de una torre atirantada bajo carga de viento extremo por medio del empleo del software estructural basado en el método de los elementos finitos SAP2000 v23 [20-22]. Se analizan dos modelos de torre con diferentes arreglos de diagonales y dos variantes en los cables, determinando las relaciones demanda/capacidad de sus elementos con el objetivo de comparar la capacidad resistente de la misma.

2. Materiales y Métodos

La torre objeto de estudio corresponde a una torre de soporte de antenas de telecomunicaciones atirantada con 102 metros de altura. El cuerpo de la torre presenta sección triangular equilátera de 0,94 metros de ancho. Se encuentra arriostrada por seis niveles de viento en cada vértice de la torre a las alturas indicadas en la Figura 2a). Los cables son de 13 mm de diámetro y una carga de rotura de 25,8 kN, se unen a tierra a través de dos anclajes de tres cables cada uno (ver Fig. 2b)). La Tabla 1 muestra las secciones correspondientes a cada uno de los elementos del fuste.

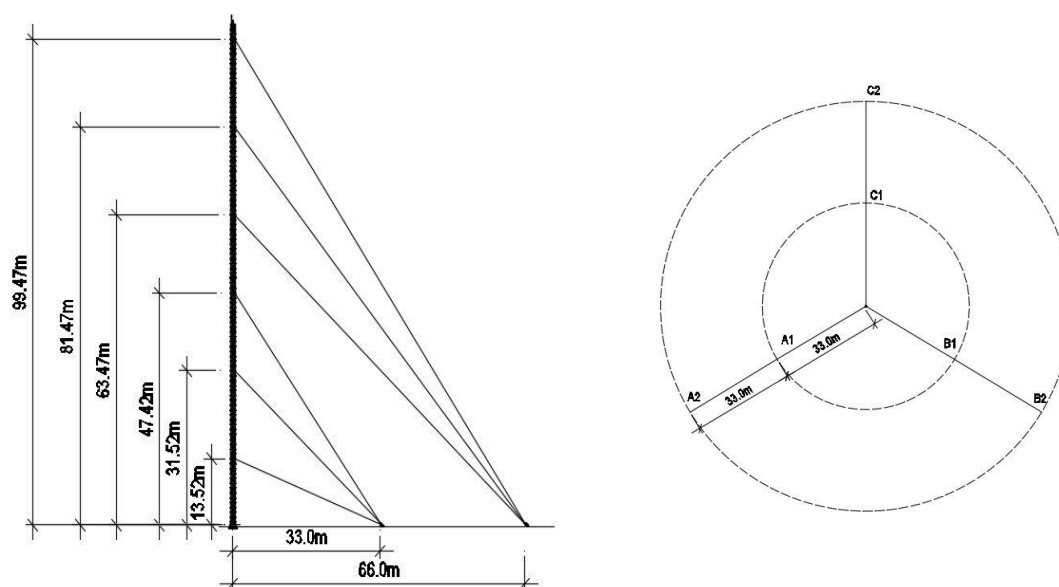


Fig.2 a) Vista en elevación de la torre b) Vista en planta de la torre

Tabla 1. Secciones de los elementos del fuste

ELEMENTOS	SECCIÓN
Columnas	Angular 90x90x9
Diagonales	Angular 50x50x5
Tranques	Angular 40x40x4
Tranques de viento	Doble Angular 50x50x5
Tranques de refuerzo en viento	Angular 40x40x4

Para la modelación y revisión estructural de la torre se utilizó como herramienta el software de análisis estructural basado en el método de los elementos finitos SAP2000 v23 (CSI). La estructura se consideró como una armadura espacial con 6 grados de libertad para el análisis, mientras que los elementos fueron modelados como barras (elementos lineales con nudos en sus extremos). El material se consideró trabajando en su régimen no lineal.

El fuste de la torre en su totalidad es de acero A36 con límite de fluencia de 250 MPa y de rotura de 400 MPa, mientras que los cables están compuestos por acero de alto límite elástico con límite de fluencia de 1600 MPa y de rotura de 2000 MPa. Para ambos aceros se considera un módulo de elasticidad de 2×10^5 MPa y su peso específico es de 76,97 kN/m³.

Las columnas se modelaron continuas en toda su longitud. Las diagonales y tranques se consideran articulados en sus extremos y entre ellos, ya que las uniones se realizan mediante uno o dos pernos. Los tres puntos de apoyo de la torre se consideraron empotrados.

Las combinaciones de cargas se establecen en la NC 450:2006 [23]. Fueron calculadas las combinaciones $1,2CP + 1,4CV$ y $0,9CP + 1,4CV$. Las cargas consideradas en el estudio de la torre son las cargas permanentes y de viento. Las cargas de uso no se consideraron ya que es poco frecuente en la torre (reparaciones, montaje de elementos) cuando está actuando la carga de viento extrema, mientras que la carga de viento no extremo no genera la peor condición de trabajo de la torre. Como cargas permanentes en la torre se consideraron el peso propio de los elementos estructurales, accesorios y antenas. También se toman en cuenta en el modelo las cargas de tesado de los cables. Estas son las cargas producidas por la tensión inicial de los cables al fijar la torre. Se toma como el 10% del límite de rotura de los cables.

2.1 Estudio de variantes para el fuste

Se presentan dos variantes de estudio. En la primera variante las diagonales en cada cara de la torre son cruzadas o dobles, conformando un arreglo X, en la segunda variante, el fuste solo posee una diagonal en cada cara, conformando ahora un arreglo en Z.

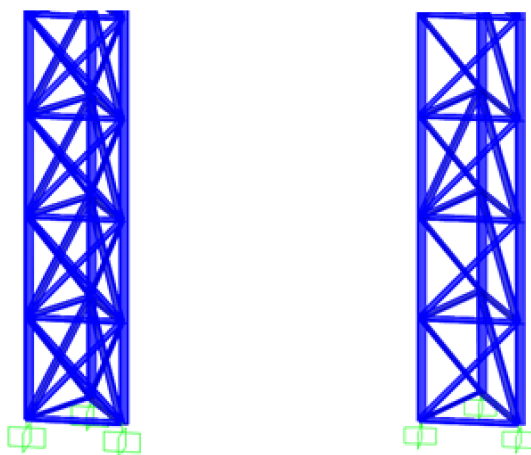


Fig.3 a) Variante 1 con arreglo en X b) Variante 2 con arreglo en Z

2.2 Estudio de variantes para los cables

Se estudiaron dos variantes que consisten en la modificación de la topología de los cables, relacionadas con el número de anclajes y los diámetros de los mismos. En estas variantes solo se realizaron modificaciones a la topología de los cables, el fuste presenta diagonales con arreglo en X. La Tabla 2 muestra las variantes analizadas.

Tabla 2. Variantes de cables analizadas

Torre	Variante Original	Variante 1(cables)	Variante 2(cables)
Cantidad de anclajes	6	9	6
Cantidad de cables	18	18	18
Diámetro de cables	13 mm	13 mm	13 y 16 mm

Variante 1 de los cables

La variante 1 consiste en el aumento del número de anclajes respecto a la torre original (Figura 4). Para este caso se consideran en el análisis tres anclajes a tierra en cada uno de los vértices de las torres manteniendo los cables de diámetro 13 mm. El nuevo anclaje añadido a cada vértice fue ubicado en el centro de los anclajes originales, quedando a 49.5 metros de cada vértice.

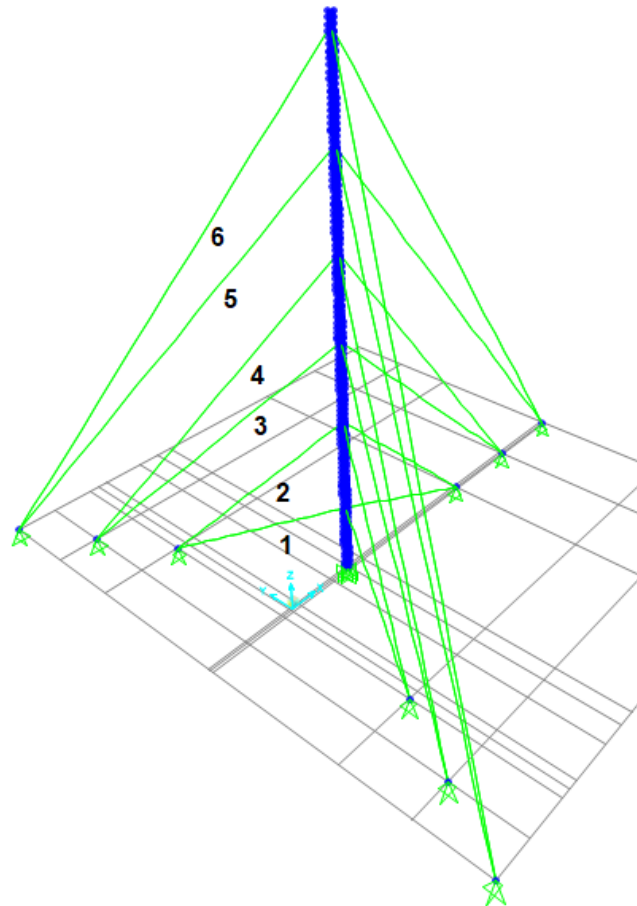


Fig.4 Variante 1

Variante 2 de los cables

La variante 2 mantiene el número de anclajes original, pero modifica los diámetros de los cables. La variante consiste en modificar a 16mm el diámetro de los cables 4,5 y 6 de cada vértice (Figura 5).

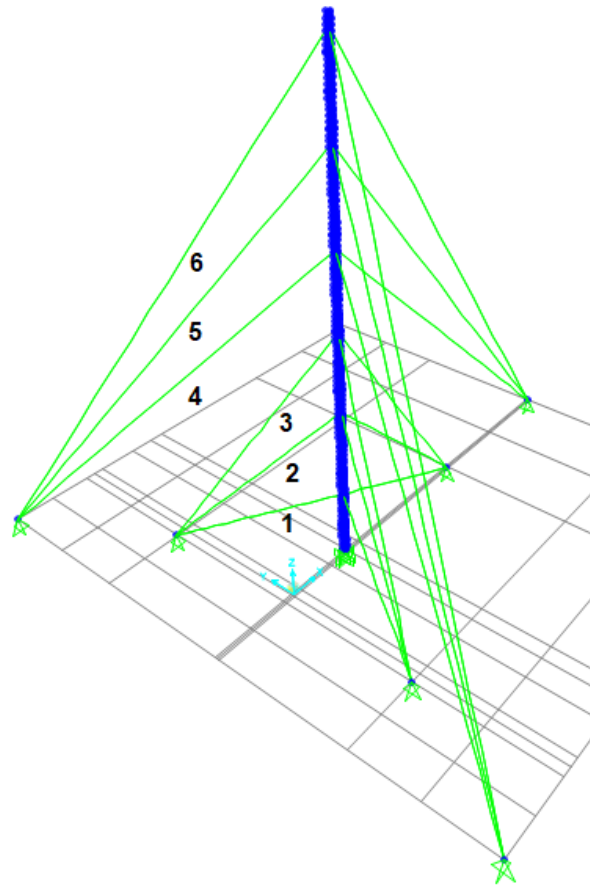


Fig.5 Variante 2

2.3 Cálculo de la carga de viento

Para el análisis de la carga de viento se tomaron tres direcciones de incidencia del viento 0° , 60° , y 90° .

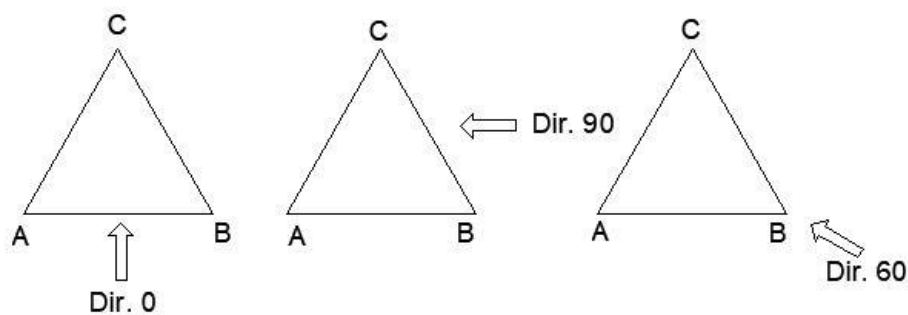


Fig.6 Direcciones de viento analizadas

Cálculo de la carga de viento para el fuste

La carga de viento actuante sobre la estructura es la suma de las componentes estática y dinámica. La componente estática de la carga de viento fue calculada según lo establecido en la NC 285:2003 [24], la presión de viento actuante fue obtenida mediante la ecuación 1. En el modelo la carga estática calculada fue aplicada como cargas puntuales sobre los nudos de los tres vértices al final de cada tramo de carga definido, el estado de carga fue definido como no lineal y tomando como rigidez inicial la generada

por la tensión de pretensado de los cables. La Figura 7 a) b) y c) muestran la carga de viento estática calculada para las dos variantes de fuste respectivamente en las tres direcciones.

$$q_e = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{fe} \quad (1)$$

Donde q_{10} es la presión característica básica del viento, la cual depende de la región donde se encuentre emplazada la estructura tomando un valor de $1,3 \text{ kN/m}^2$ para la región occidental, C_t es el coeficiente de recurrencia, C_s es el coeficiente de sitio y C_r el coeficiente de ráfaga. Para la obra objeto de estudio C_t toman un valor de 1, la obra se encuentra ubicada en un sitio expuesto por lo que $C_s = 1,1$ y el coeficiente de ráfaga toma un valor de 1,05. C_{ra} el coeficiente de reducción de área, se obtiene de la figura 4 de la NC 285:2003 y toma un valor de 1 para el caso objeto de estudio. C_{fe} es el coeficiente de forma, este depende de la geometría de la edificación. Para estructuras de celosías espaciales se obtiene mediante la expresión 2, donde C_f es un coeficiente de forma para elementos infinitamente largos en función del tipo de perfil usado en la estructura y N es un coeficiente de reducción, obtenido de la tabla de la página 43 de la norma cubana. Si la torre tiene sección triangular la expresión 2 se multiplica por el coeficiente 0,9.

$$C_{fe} = C_f(1 + N) \cdot 0,9 \quad (2)$$

C_h es el coeficiente de altura, según las características de su emplazamiento la estructura objeto de estudio se encuentra en un terreno clasificado como tipo A, por lo que el coeficiente de altura se calcula mediante la ecuación 3.

$$C_{h(z)} = \left(\frac{z}{10}\right)^{0.32} \quad \text{Ec. 3}$$

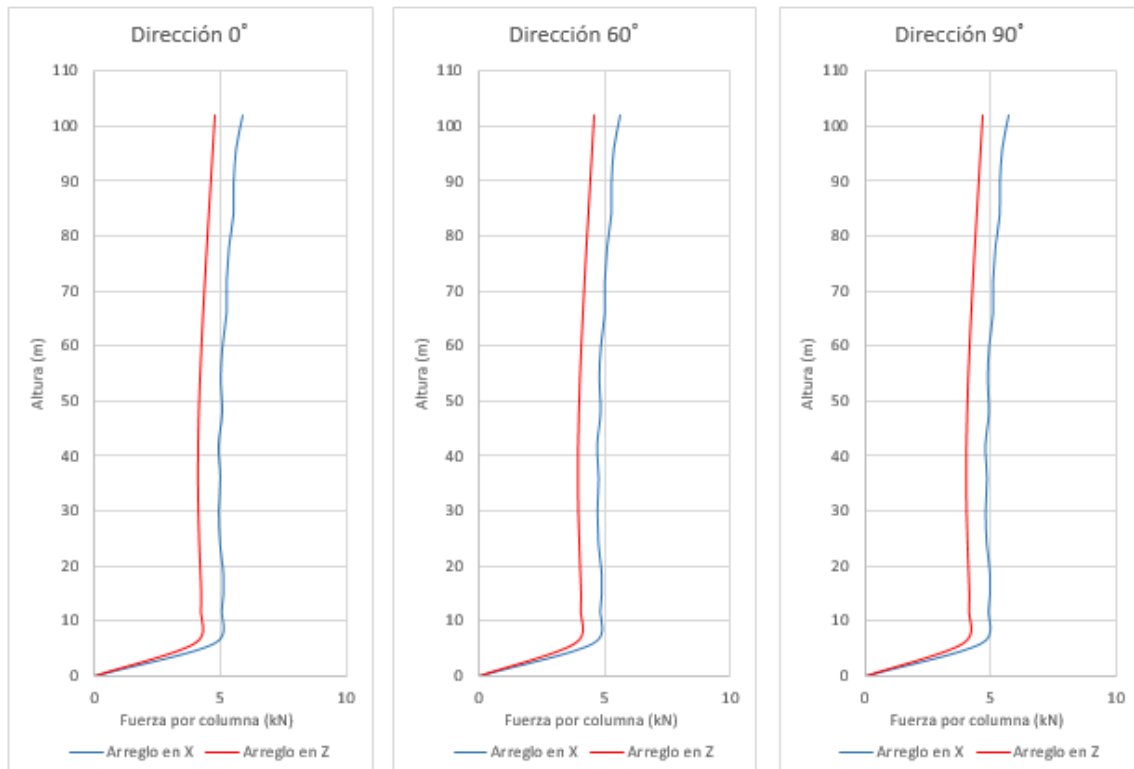


Fig.7 Carga de viento estática por columna para a) Dirección 0° b) Dirección 60° c) Dirección 90°

La componente dinámica de la carga de viento fue calculada mediante el método estático equivalente Patrones de Carga. La aplicación del método tramos de carga divide el análisis en una carga media a aplicar sobre el mástil de la torre y sus cables, y una serie de patrones de carga a ser colocados igualmente en estos elementos de la estructura. El método fue aplicado según lo establecido en la Norma Británica [25]. Los patrones fueron modelados como un estado de carga lineal tomando como rigidez inicial la generada después de aplicada la carga media de viento sobre la torre y los cables.

Cálculo de la carga de viento para los cables

La carga media en los cables se calcula según la Ecuación 4 que pertenece a la nueva propuesta de norma cubana de viento siendo consecuente con los valores de los coeficientes dependientes y de la presión básica del viento empleados en los cálculos del fuste.

$$F_{pg} = q_p * d * C_G * \sin^3 \psi \quad (4)$$

Donde F_{pg} es la carga media del viento sobre los cables (kN/m), q_p es la presión pico del viento para los cables, en el caso del coeficiente de altura se toma como altura de referencia 2/3 de la altura del cable, d es el diámetro de los cables, C_G es el coeficiente de fuerza en la dirección normal (Tabla 5.2 de la nueva propuesta de norma cubana de viento), y ψ es el ángulo oblicuángulo en cada vértice en cada dirección del viento.

3. Resultados y Discusión

Las fuerzas de viento fueron calculadas para toda la altura de la estructura. Para determinar la respuesta de cada elemento ante las cargas actuantes el análisis fue realizado mediante el procedimiento de la norma AISC-16. La Figura 8 muestra el número de elementos en fallo de la estructura para cada combinación de carga y dirección de viento analizada. Se considera un elemento en fallo cuando su relación demanda-capacidad es superior a uno. En el modelo las columnas se encuentran divididas cada un metro, considerándose cada una de estas divisiones elementos, además de las diagonales y tranques.

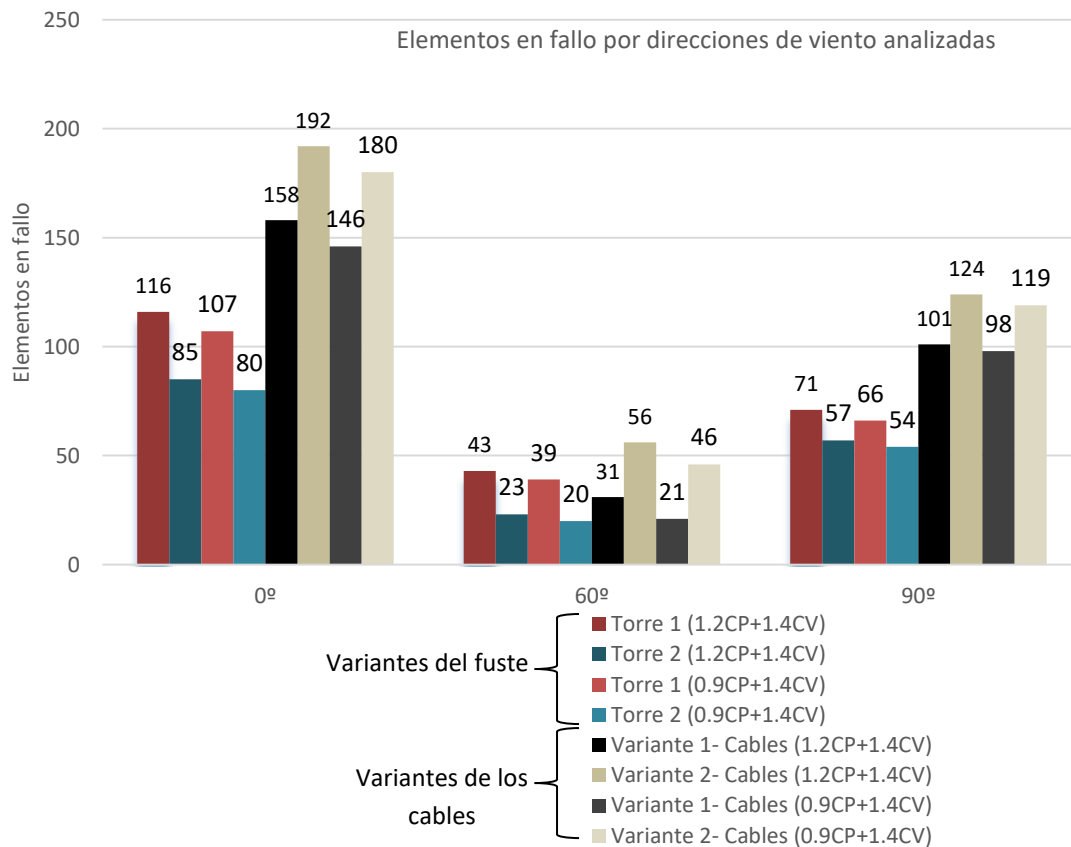


Fig.8 Elementos en fallo por dirección de viento

La dirección de viento más desfavorable es la dirección cero grados, presentando la mayor cantidad de elementos en fallo para cada combinación de carga en las cuatro variantes de estructura analizadas. Para todas las combinaciones de carga y direcciones de viento analizadas la segunda variante de topología de cables presenta los resultados más desfavorables (mayor número de elementos en fallo).

Se realizó un análisis de la máxima velocidad de viento que soporta cada variante antes de su colapso. Puesto que los elementos más esforzados son las columnas de la base de la torre se utilizó como criterio de aceptación una relación demanda-capacidad máxima de 1,05 para cada uno de estos elementos estructurales. Teniendo en cuenta este criterio y realizando un proceso de ingeniería inversa se determinó que la velocidad máxima que resisten todas las variantes. Todos los resultados se muestran en la tabla 3 y se encuentran en una escala de promediación de 10 min.

Tabla 3. Variantes de cables analizadas

Variante	Velocidad básica de viento (m/s)	Velocidad básica de viento (km/h)
Variante 1 del fuste	29,00	104
Variante 2 del fuste	29,00	104
Variante 1 de cables	28,84	103,84
Variante 2 de cables	28,48	102,53

Los primeros elementos en fallo para todas las variantes analizadas son los tramos iniciales de las columnas de la base. Teniendo en cuenta esto se decidió realizar un refuerzo al primer tramo de columnas de la torre para la variante 2 (debido a que esta es la variante más económica), aumentando la sección de estas. Este tramo comprende los 6 primeros metros de la torre. Las columnas de este tramo fueron reemplazadas por angulares de sección L 90x10mm. Con el refuerzo a las columnas la variante 2 de arreglo del fuste resiste una velocidad máxima de 33 m/s o 118 km/h en una escala de promediación de 10 min, un 12% más que la variante original.

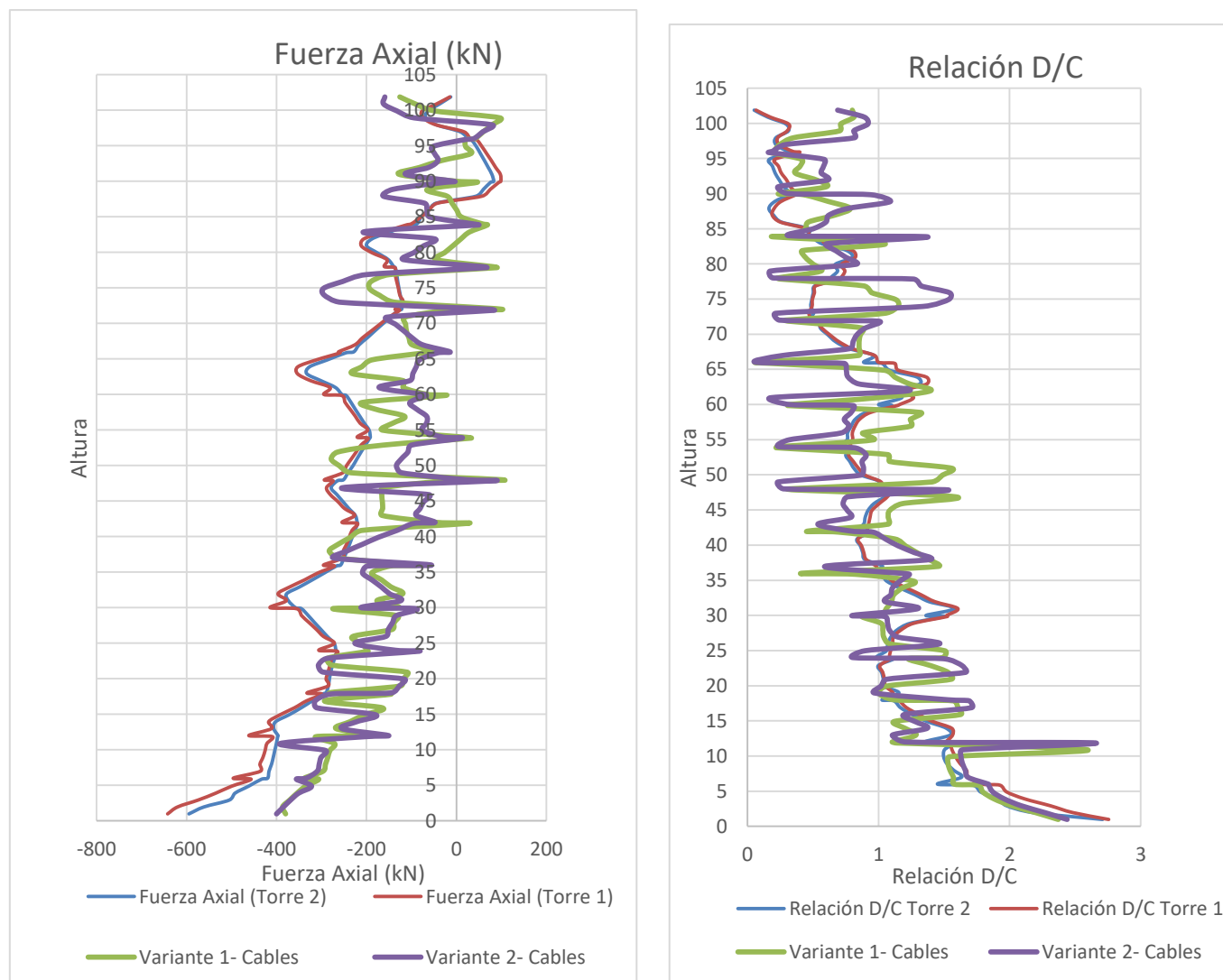


Fig.9 Valores en la columna situada en el vértice C de: a) carga axial b) relación demanda/capacida

La Figura 9 a) y b) muestra los valores de carga axial y relación demanda capacidad de la columna situada en el vértice C para las cuatro variantes de la torre, para la segunda variante del fuste se tuvo en cuenta el refuerzo en las columnas. Las variantes de cables presentan un comportamiento irregular con la altura en cuanto a su relación demanda capacidad, en algunos tramos presentan menor relación demanda capacidad que la variante original, y en otros, mayor. El valor de la relación demanda capacidad en el

tope de la torre presenta una diferencia porcentual entre 90% y 120% entre la variante más desfavorable de cables y la variante original.

La relación-demanda capacidad de los elementos estructurales de la columna de la variante 2 de la modificación de la topología los cables es la más elevada, en la primera mitad de la torre existen diferencias porcentuales de hasta un 70% con respecto a la variante original, en el resto de la torre las diferencias son mayores variando de forma irregular. La variante 2 de arreglo en el fuste, presenta en las alturas bajas de la torre diferencias porcentuales entre 25-35%, en el resto de la torre las diferencias oscilan entre un 1-10% variando de forma irregular con respecto a la variante original.

Al realizar el análisis de la carga axial se observa que la variante con mayores solicitaciones axiales es la variante original, teniendo un decremento de los valores de carga axial al aumentar la altura de la torre. Los elementos con mayor solicitación se encuentran en la base de la torre para la variante original. Existen diferencias porcentuales entre 1-10% de la variante original respecto a la variante 2 del fuste, alcanzando diferencias alrededor de 20% en la zona superior de la torre. Se observan además las grandes diferencias en los valores de fuerza axial que poseen las variantes de los cables con respecto a la variante original, las diferencias porcentuales ascienden hasta valores de 600%.

4. Conclusiones

La dirección de viento más desfavorable para el análisis estructural de la torre es la dirección cero grados, esta aporta el mayor número de elementos en fallo para las cuatro variantes y ambas combinaciones de cargas. Mientras que la variante que presenta la mayor cantidad de elementos en fallo para las tres direcciones del viento y ambas combinaciones es la segunda variante de topología de cables. Todas las variantes presentan un elevado número de elementos en fallo y ninguna variante resiste la carga de viento extremo actuante calculada por la norma cubana. Las variantes de los cables con respecto a la variante original poseen los valores de carga axial y relación demanda capacidad más desfavorable en la parte más alta de la torre, aunque de manera general poseen valores mucho menores en gran parte de los puntos de la torre con respecto a la variante original. La variante 2 del fuste reforzada resiste la mayor carga de viento antes del fallo de la torre con respecto a la que la variante original, debido principalmente a la influencia del refuerzo en las columnas del primer tramo de la torre, reconocidos como elementos claves en el funcionamiento de la misma. Se recomienda realizar estudios donde se analicen nuevas variantes, así como su impacto económico en función de su desempeño ante la carga de viento.

Referencias

1. Fu, L.T.X.Z.X., *Collapse Simulations of Communication Tower Subjected to Wind Loads Using Dynamic Explicit Method*. 2020: p. 12.
2. Hussam, M., Meshmesha, J.B., Kennedy, K.S., *Static and dynamic analysis of guyed steel lattice towers*. Structural Engineering and Mechanics, 2019. **69 (5)** p. 567-577.
3. Matuszkiewicz, M., *Analysis of guyed lattice mast considering various types of mast shaft geometrical imperfections*. Czasopismo Techniczne 2019, 2019. **9**: p. 97-106.
4. Featherston, N., *Non-linear analysis of tall Telecommunication Towers in South Africa*. Advances in Engineering Materials Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications, 2019: p. 957-962.
5. López Llanusa, A., Elena Parnás, V., Martín Rodríguez, P., *Análisis de la forma del fuste y condiciones de apoyo para una Torre Atirantada*. Revista de Arquitectura e Ingeniería, 2009. **10**.
6. Ellis, J.S., *Latticed Mast Structures*. Journal of Structural Engineering, 1998.
7. Marjanovic, M., Petronijevic, M., *Desing of 120 m guyed steel mast in Alibunar according to Eurocode*. 18th International Symposium of MASE, 2019. **24**: p. 1090-1099.
8. Kister, A., *Analysis or mast and tower construction with heights of about 100 m telecom industry (Doctoral dissertation, Instytut Inzynierii Budowlanej)*. 2021.
9. Matuszkiewicz, M., Pigon, R., *Parametric analysis of mast guys within the elastic and inelastic range*. Archives of Civil Engineering, 2022. **68**: p. 169-187.
10. Orzłowska, R., *Experimental study of mechanical properties of steel cables*. MATEC Web of Conferences, 2018. **219**: p. 02004.
11. Elena, V., Martín, P., Luis, K., *Análisis topológico de los cables en un modelo de torre atirantada*. Obras y Proyectos, 2019. **26**: p. 65-73.
12. Ballaben, J.S., Rosales, M.B., *Nonlinear dynamic analysis of a 3D guyed mast*. Nonlinear Dynamic, 2018. **93 (3)**.
13. Fernández, I., *Comparación de métodos de análisis dinámico en una torre atirantada sometida a cargas de viento extremas en Cuba*. Revista de la Asociación Internacional de Conchas y Estructuras Espaciales, 2019. **60**.
14. Ismail, A.M., Hassnien, S.H., *Non-Linear Dynamic Analysis of Guyed Towers to Wind Loading*. IOSR J. Mech. Civ. Eng. e-ISSN, 2018. **15 (1)**: p. 21-29.
15. Sparling, B.F., Wegner, L.D., *Comparison of frequency- and time-domain analyses for guyed masts in turbulent winds*. Can. J. Civ. Eng., 2006. **33**: p. 169-182.
16. Sparling, B.F., *The dynamic behaviour of guys and guyed masts in turbulent winds*. . 1995, University of Western Ontario, London, Canada.
17. IASS WG 4, *Recommendations for the Design and Analysis of Guyed Masts*. 1981, International Association of Shell and Spatial Structures, Madrid.
18. Davenport, A.G., Gerstoft, P., *A Simplified Method for Dynamic Analysis of a Guyed Mast*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1986. **23**: p. 487-499.
19. Davenport, A.G., Sparling, B.F., *Dynamic gust response factors for guyed towers*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1992. **41**: p. 2237-2248.
20. María, A., *Guía metodológica de iniciación al programa SAP2000*. 2021: Universidad de la Salle.

21. UPNJATIM, C.T., *Comparative analysis of tower base transceiver station (BTS) foot 4 between bracing type x*. CI-TECH, 2020. **1**: p. 1-6.
22. Guzmán, A.M., *Inferencia del período de mástiles arriostrados de baja altura*. Mecánica Computacional 2021. **28**: p. 249-258.
23. Normalización, O.N., *Edificaciones-Factores de carga o ponderación-Combinaciones*. NC 450:2006. 2006: Ciudad de La Habana, Cuba.
24. Normalización, O.N., *Carga de viento. Método de cálculo*. NC 285:2003. 2003: Ciudad de La Habana, Cuba.
25. BS1800-4, *British Standards on Lattice Towers and Masts: Part 4 Code of Practice for Loading of Guyed Masts*. 1995: London.