

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PROPUESTA DE CAMBIOS EN EL NUMERO DE CABLES COMO
REFUERZO ESTRUCTURAL EN LA TORRE ATIRANTADA “LOMA DE
LA CRUZ”**

Autor: Lilian Beatriz Jiménez Ramírez.

HOLGUÍN 2021



**FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**PROPUESTA DE CAMBIOS EN EL NUMERO DE CABLES COMO
REFUERZO ESTRUCTURAL EN LA TORRE ATIRANTADA “LOMA DE
LA CRUZ”**

Autor: Lilian Beatriz Jiménez Ramírez.

Tutora: MSc. Elizabeth Rivas Freeman. P Aux.

HOLGUÍN 2021



PENSAMIENTO:

Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein



DEDICATORIA:

A mi familia que me ha apoyado siempre,
en especial a mi esposo e hija.

AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, que me ha permitido realizar mi sueño y avanzar hacia la meta, Él es mi luz y mi fuerza.

A mis padres, por su amor, por estar siempre a mi lado.

A mi hija y a mi esposo, por su paciencia y amor.

A mi tutora, Elizabeth, por su tiempo, cariño, sus conocimientos y consejos brindados, a lo largo del trabajo realizado, muchas gracias.

A mis amigos, ellos saben quiénes son, por su cariño y ayuda incondicional, en las buenas y en las malas.

A los profesores que me han impartido clases a lo largo de estos 6 años, por su ayuda y comprensión.

RESUMEN

En la torre de celosía atirantada “Loma de la Cruz”, existe una demostrada vulnerabilidad de los elementos estructurales asociados a los efectos del viento de huracanes de gran intensidad (huracanes categoría 3 en la escala Saffir-Simpson), lo que compromete la estabilidad del sistema y por consiguiente la interrupción de las comunicaciones, además de una pérdida económica importante. En el presente trabajo se proponen soluciones estructurales mediante la introducción de algunas modificaciones como: la incorporación de nuevos cables a la estructura, así como un aumento en la cantidad de anclajes. Se evidencia mediante la modelación la influencia de cada una sobre los restantes elementos, y se realiza un análisis hasta deducir la solución más viable que contrarreste los efectos desfavorables generados por este tipo de acción. Se realiza en cada paso, los modelos de cada una de las situaciones mediante el software SAP2000 v-14 y se obtienen las respuestas. Del análisis de los resultados se obtiene un incremento de la capacidad resistente del elemento que es sujeto a variaciones. Finalmente se llega a conclusiones y recomendaciones del trabajo.

ABSTRACT

At the tower of tautened window blind Loma of the Cross, a confirmed vulnerability of the structural elements once the effects of the wind of hurricanes of great intensity were associated to exists (hurricanes category 3 in the scale Saffir Simpson), that appoints the stability of the system and consequently the interruption of the communications in addition to an important economic loss. Structural intervening solutions propose the introduction of some modifications themselves in the present work like: The incorporation of new cables to the structure, as well as an increase in the quantity of anchorings. The influence out of every one on the remaining elements becomes evident by means of the modelation, and an analysis to deduce the most viable solution that offset the unfavorable effects generated by this type of action comes true. Comes true in each step, the models out of every one belonging to the intervening situations the software SAP2000 v 14 and they obtain answers. You get an increment from the resistant capability of the element that is liable to variations of the income analysis. Finally it takes place to findings and recommendations of work.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN:	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS RELATIVOS AL COMPORTAMIENTO DE LAS TORRES DE TELECOMUNICACIONES ATIRANTADAS Y LOS MÉTODOS ACTUALES PARA SU ANÁLISIS ESTRUCTURAL	6
1.1 Tipologías de torres de celosía para telecomunicaciones.....	6
1.2 Elementos componentes de las torres de telecomunicaciones atirantadas	9
1.3 Características y geometría de cableado en las torres de telecomunicaciones.....	12
1.4 Principales causas de fallos en torres atirantadas en Cuba.....	16
1.5 Estudios del comportamiento de torres de telecomunicaciones ante cambios en su estructura.....	17
1.5.1 Comportamiento de la estructura ante cambios en las diagonales:	18
1.5.2 Comportamiento de la estructura ante cambios en las columnas: .	19
1.5.3 Comportamiento de la estructura ante cambios en los tranques: ...	19
1.5.4 Variación en la tipología de los cables:	19
1.5.5 Variación de número y posición de los antitorsos:	21
1.6 Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones en Cuba	21
1.7 Posibles fallos de la torre atirantada “Loma de la Cruz” ante vientos extremos.....	22
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN Y PROPUESTA DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES DE LA TORRE ATIRANTADA “LOMA DE LA CRUZ”	25
2.1 Características de la torre “Loma de la Cruz”	25
2.3 Descripción de las variantes:.....	30
2.4 Modelación de las Variantes	33
2.4.1 Modelación de la Variante 1	33
2.4.2 Modelación de la Variante 2	35
2.5 Análisis de los resultados	36
2.5.1 Análisis de la variante 1	36
2.6 Propuesta de solución estructural para la torre de telecomunicaciones “Loma de la Cruz”	37



CONCLUSIONES	Error! Bookmark not defined.
RECOMENDACIONES.....	40
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS.....	44

INTRODUCCIÓN:

Desde los inicios de la civilización, el ser humano se ha visto en la necesidad de comunicarse con los demás. Dicha necesidad lo ha llevado a desarrollar innumerables técnicas de comunicación, partiendo de los métodos más rudimentarios, como la inclusión de jeroglíficos y las señales de humo, hasta evolucionar con la invención del telégrafo, el teléfono y la radio. Considerando actualmente la influencia de la globalización y las necesidades crecientes de la humanidad por establecer normas de comunicación estable, que permitan acceder con facilidad a una comunicación más rápida, clara, confiable, se puede mencionar la importancia del fenómeno de las telecomunicaciones. Como ejemplo relevante, el internet y los teléfonos celulares, los cuales basan su funcionamiento en antenas de transmisión de datos y señales de manera inalámbrica.

Las torres de celosía destinadas a las telecomunicaciones son de suma importancia en el desarrollo de un país, estas son el soporte de antenas a grandes alturas, que transmiten señales tanto para televisión como para la telefonía móvil. Estas estructuras surgen en la segunda década del siglo XX con el nacimiento de las transmisiones de radio y con la invención de la televisión, su uso es extendido como soporte de antenas a partir de la década del 50 del mismo siglo. El avance de las telecomunicaciones ha aumentado el desarrollo de estas torres en busca de nuevos modelos y de lograr torres más seguras, resistentes y capaces de soportar esfuerzos sin llegar a perder su integridad estructural. Estas estructuras suelen ser elementos esbeltos y ligeros con un diseño condicionado fundamentalmente por las cargas ecológicas, se clasifican según su tipología estructural en: autosoportadas y atirantadas, las torres autosoportadas se apoyan en la tierra o sobre edificios y se comportan como vigas en voladizo frente a la acción del viento y de las cargas sísmicas. Son por lo general de sección transversal variable que disminuye con la altura, mientras que las arriostradas, se apoyan igualmente en su base pero se encuentran arriostradas lateralmente mediante cables. La sección transversal más frecuente para este tipo de torres son las triangulares equiláteras y constantes en toda su altura. Este tipo de torres tiene más ligereza y menor consumo de materiales, pero tiene como desventaja de necesitar más terreno para el anclaje de los cables.



Las fallas estructurales en las torres atirantadas resultan más frecuentes que en otras estructuras, la carga de viento es la que predomina sobre otro tipo de carga, la cual en conjunto con otros factores son los causantes de numerosas afectaciones en las estructuras, lo que ha motivado a la investigación en torno a su análisis y diseño en las últimas décadas. La necesidad de evitar las fallas en estas estructuras, por su importancia estratégica en el país, aún en situaciones de fuertes vientos huracanados que son frecuentes en el territorio cubano, ha incentivado al estudio de su comportamiento estructural así como de los factores presentes en las fallas que pudieron dar lugar a un aumento de la vulnerabilidad estructural de la torres. En ingeniería es común referirse a las causas de fallas estructurales como errores de diseño, errores de construcción, falta de mantenimiento, fatiga, fractura de los materiales, daño accidental o malintencionado y fallas debido a la ocurrencia de eventos naturales extremos como sismos y huracanes. (Parnás, 2008)

Los cables tienen un papel fundamental en el comportamiento de las torres atirantadas, ya que estos garantizan desde su invariabilidad cinemática hasta su mayor o menor grado de hiperestaticidad frente a la acción de fuerzas laterales. La respuesta estructural del conjunto en estos casos, está determinada en gran medida por estos elementos y los estados de tensión y distensión que adquieren bajo la acción de las cargas de viento. (Parnás, 2008)

Según un estudio realizado por la autora antes mencionada y otros investigadores en el 2019 demuestra que la tipología de cables presenta influencia significativa en 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. Cuando varía la cantidad de cables y el diámetro de esta generan incrementos en los elementos de la torre, excepto en algunos de los tranques donde la disminución del diámetro de los cables provoca una disminución del 4% de la fuerza axial.

Cuba se encuentra bajo la amenaza permanente de desastres naturales como huracanes, terremotos y sequías. Su condición de archipiélago y ubicación geográfica en el mar Caribe, la hace altamente vulnerable a los eventos asociados a la variabilidad climática. La temporada ciclónica se extiende desde inicio de junio hasta finales de noviembre con un promedio histórico de hasta 10 ciclones por año. En los últimos



años en Cuba se han producido varias fallas de torres de celosías vinculadas al paso de huracanes con la incidencia de altas velocidades de viento provocando no solo afectaciones a la economía, sino también a las comunicaciones. Según datos recogidos por el Instituto de Meteorología de Cuba (2018), se evidencia el colapso de al menos 43 de estas estructuras en un período alrededor de veinte años (1996-2017). En 2008, tras el paso de Huracán Ike (Categoría III en la escala Saffir-Simpson), colapsa la torre auto-soportada de telecomunicaciones “Loma de la Cruz” HTV, con la cual se afectó la cadena nacional de radio, cadena de microondas, los enlaces digitales con Banes, Freyre y Gibara y pérdida de la señal de televisión. Actualmente en su lugar se encuentra en servicio una torre atirantada de modelo RG-55, de origen canadiense. La misma se ubica sobre una colina de 330 m de altura aproximadamente, en un terreno con poca vegetación, por lo que aumenta un poco más la acción del viento en la estructura. Según los estudios de los autores Briñones y Hernández en el año 2017, realizados a esta torre para categorías de huracán III, IV y V, hay fallos estructurales en algunos elementos estructurales a partir de la tercera categoría y se incrementan a medida que aumenta la magnitud.

El aporte de los cables actuales no es suficiente para mantener la estabilidad de la torre y provocan grandes esfuerzos en los elementos del fuste. Como se puede observar, esta situación es crítica y ocasiona afectaciones socio-económicas de gran importancia, pues las tecnologías de telecomunicación son costosas, así como un cambio parcial o total de la estructura de soporte. Por lo que surge como **problema de la investigación**: el número de cables que tiene actualmente la torre de telecomunicaciones “Loma de la Cruz”, no son suficientes para dar la estabilidad y resistencia necesaria a la estructura.

Objeto de la investigación: la torre de telecomunicaciones “Loma de la Cruz”

Objetivo General: Proponer cambio del número de cables, que eviten el fallo de la torre atirantada “Loma de la Cruz” ante la acción de vientos extremos.

Campo de acción: Soluciones estructurales de la torre atirantada “Loma de la Cruz” ante vientos extremos.

Hipótesis: Si se modifican aspectos relacionados con el cableado de la torre atirantada “Loma de la Cruz”, se comprobará su resistencia ante vientos extremos y,



por ende, minimiza la posibilidad de ocurrencia de fallos y las afectaciones económicas y sociales que se derivan de los mismos.

Objetivos específicos:

- Definir los principales aspectos teóricos relativos al comportamiento y los métodos de análisis las torres atirantadas para realizar la variante de cableado del caso en cuestión, mediante el estudio de investigaciones anteriores.
- Analizar el comportamiento de la torre atirantada “Loma de la Cruz”, ante los cambios en los cables, a partir de la modelación en el software SAP 2000 v-14.

Métodos de investigación:

- Método Teórico:
 - Historio-Lógico: para ejecutar un análisis histórico de las torres de acero utilizadas para soportar antenas de radio así como los huracanes que las han afectado.
 - Análisis y síntesis: para el análisis de la información procedente de la caracterización histórica, teórica, metodológica y empírica de las torres así como de los huracanes.
 - Modelación: para estudiar las diferentes variables que inciden en el comportamiento dinámico de la torre, mediante el empleo del software SAP 2000 v.14.
- Método Empírico
 - Análisis documental: para la búsqueda de información relacionada con la caracterización histórica, teórico-metodológica y empírica de las torres de telecomunicaciones.
 - Observación científica: para la realización del diagnóstico estructural de las torres.
 - Análisis numérico: según análisis comparativo de la respuesta modelada y medida de la estructura de la torre estudiada, se pueden inferir conclusiones sobre el comportamiento dinámico real y modelado de dichas estructuras, su nivel de daño estructural, la localización de los mismos, etc.

La novedad de esta investigación está en la obtención de una nueva solución estructural para la torre de acero modelo RG-55 atirantada, ante la vulnerabilidad de



cargas de viento debido a eventos hidrometeorológicos de gran intensidad, mediante un análisis del comportamiento de la estructura ante cambios en los cables.

Actualidad del tema: la investigación sigue la línea de investigación del Departamento de Construcciones “Modelación, diseño y evaluación de obras de obras de ingeniería” que, a su vez, forma parte de la línea de investigación de la Universidad de Holguín “Innovación para el desarrollo sostenible”. Se obtienen resultados favorables para la racionalización en las soluciones constructivas, lo que permite un ahorro de presupuesto y materiales que beneficia el medio ambiente y la economía del país, además vincula a la Universidad como centro de altos estudios en el desarrollo de los problemas actuales del país. Por lo tanto, este trabajo está acorde al modelo de Desarrollo Económico y Social del Partido y la Revolución y a lo previsto en la Agenda 2030.

Estructura del informe:

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I: Fundamentos teóricos relativos al comportamiento de las torres de telecomunicaciones atirantadas y los métodos actuales para su análisis estructural.

CAPÍTULO II: Análisis de la modelación y propuesta de soluciones estructurales de la torre atirantada “Loma de la Cruz”.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS RELATIVOS AL COMPORTAMIENTO DE LAS TORRES DE TELECOMUNICACIONES ATIRANTADAS Y LOS MÉTODOS ACTUALES PARA SU ANÁLISIS ESTRUCTURAL.

En este capítulo se abordan temas afines a la investigación que se lleva a cabo sobre los modelos de torres atirantadas de telecomunicaciones. Para realizar un correcto análisis de las torres de acero se debe conocer las características generales de las mismas como la tipología, funciones, características geométricas y mecánicas. Además, conocer los factores que pueden provocar fallas en la estructura como los vientos extremos y las características de estos. La información que se muestra en este capítulo sirve de apoyo teórico y metodológico para llevar a la práctica el análisis de las vulnerabilidades estructurales de la torre de acero atirantada RG-55.

1.1 Tipologías de torres de celosía para telecomunicaciones

Desde la década del 50 hasta las nuevas torres de telecomunicaciones diseñadas construidas e instaladas en los últimos años han aumentado de forma acelerada en cuanto a la actualización permanente de las cargas de diseño del viento a través de datos ambientales, los cambios en la forma que se aplica sobre las torres y el desarrollo alcanzado en el campo de las estructuras con la aplicación de métodos de cálculo y herramientas más precisas.

Estas estructuras de las torres de celosías suelen ser elementos esbeltos y ligeros con carencia de elementos que aporten rigidez adicional, son elementos lineales unidos entre sí por sus extremos logrando un sistema reticulado cinemáticamente invariable. Por su forma constructiva permite con poco consumo de materiales gran resistencia y por su permeabilidad reduce las fuerzas del viento sobre la estructura. Su sección transversal puede ser rectangular, triangular o cuadrada. Los elementos estructurales son perfiles angulares, tubulares o combinados entre ambos y sus uniones pueden ser atornilladas o planchas de metal o sobre el elemento directamente.

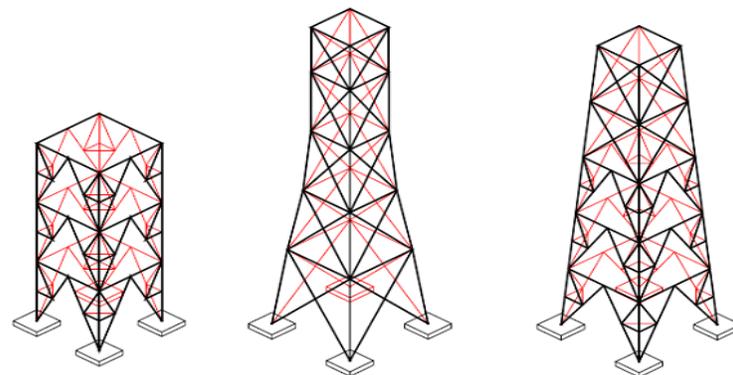
De las torres de celosías para soporte de antenas, se encuentran las de tipos autoportadas y las atirantadas.

Las torres de celosías autoportadas actuales pueden alcanzar alturas aproximadas de hasta 180m (600pies) (Madugula, 2002) requieren de un terreno cuadrado con una longitud entre un (8 y 12) % de su altura (Pérez, 2001) y son sustentadas sobre el



suelo o edificios. Estas torres se comportan como vigas en voladizo frente al viento y las cargas sísmicas. Estas presentan una variación de las dimensiones de su sección transversal, la que es mayor en la base y disminuye con la altura para proporcionarle una mayor estabilidad; las hay de sección constante, algunas tienen una configuración piramidal en todo su recorrido, otras comienzan con esta forma hasta cierto nivel y continúan con sección constante hasta el extremo superior (Figura 1.1) Este tipo de estructuras suelen ser costosas por la cantidad de acero y la cimentación que requieren, aunque como ventaja tiene gran capacidad para la instalación de antenas y es más resistente que las torres atirantadas. Su peso propio actúa de forma favorable frente a la acción de las cargas de viento. Las torres construidas con elementos lineales de acero en forma de celosía son las más eficientes. El uso de las celosías evita la exposición de una superficie llena y plana a la acción del viento permitiendo mayor ligereza con rigidez suficiente. (García, 2011)

En este tipo de torre las vulnerabilidades principales son las cargas de viento especialmente en caso de ciclones, sismos y la colocación de un mayor número de antenas o la sustitución de las existentes por otras más grandes y pesadas debido a que estas antenas actúan como pantalla frente al viento provocando que se genere fuerzas adicionales sobre la estructura.



Sección constante

Sección combinada

Sección piramidal

Figura 1.1 Tipologías torres de celosía autoportadas. Fuente: Rodríguez (2015)

Las torres atirantadas (figura 1.2) son estructuras formadas por una armadura espacial de sección triangular constante y un conjunto de cables tesados en los cuales se apoya lateralmente el fuste. Los cables son inclinados y se unen por uno de sus extremos a



los vértices de la sección transversal del fuste a diferentes niveles de la altura y en el otro extremo se anclan en el terreno en tres direcciones radiales espaciadas entre sí a 120 grados. (Parnas, 2008)

Este tipo de torres son utilizadas cuando se requieren grandes alturas y donde el espacio circundante no está limitado, permitiendo mayor economía con relación a las autosoportadas en cuanto a los costos de producción, montaje y cimentación, aunque presentan como desventaja que necesitan un amplio radio de emplazamiento para el anclaje de sus cables y es más vulnerable ante la acción del viento que las autosoportadas. El empleo de tensores o tirantes permite alcanzar alturas importantes a un costo bajo de material. La sección transversal más común de las torres atirantadas es triangular por las características de las antenas que soportan.

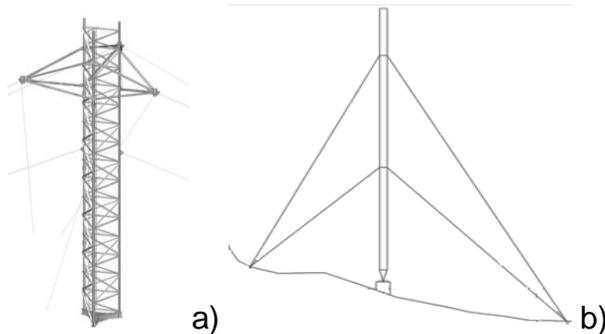


Figura 1.2 Torre atirantada. a) Fuste b) Elevación típica. Fuente: Catálogo RADIAN

Estas torres se estructuran con tirantes a diferentes alturas (por lo general de $2/3$ de la altura de la torre. Los cables o arriostres se tensan para proporcionar la estabilidad adecuada a la estructura de celosía. (Méndez, 2015) Hay innumerables formas de colocar los cables de soporte en una torre, el más común es tres cables en cada nivel, cada uno sujeta una columna. Si se quiere reducir el efecto de torsión lo ideal es colocar 6 cables en cada nivel, para mantener la estabilidad como muestra la figura 1.3b. En el nivel de la torre donde se localizan estas excesivas solicitaciones, se pueden colocar estructuras triangulares, llamadas antitorsores la cual se fijan a los cables (figura1.3c).si las torsiones ocurren en toda la estructura, se recomienda utilizar el diseño de la figura1.3d.

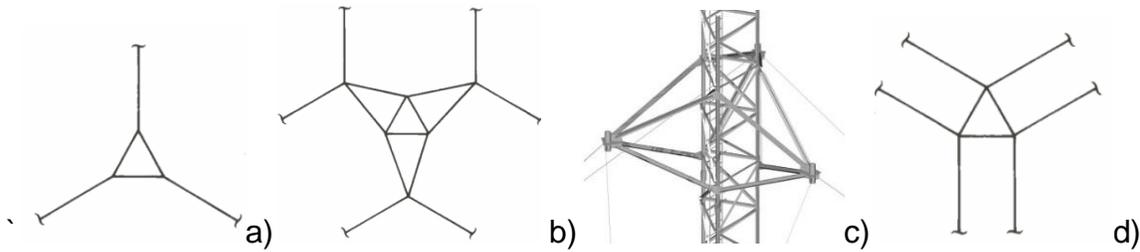


Figura 1.3 Distribución más común en los cables de soporte. Fuente: Windle; Kearsley(1987)

La selección del modelo de la torre está dada por aspectos importantes como son: las cargas incidentes, el área que ocupa, la altura requerida en correspondencia a la tecnología de las antenas y el presupuesto que se disponga. El número de niveles donde se anclan los cables varía en dependencia de la altura, ancho, localización del equipamiento y las cargas ecológicas a que está sometida. (Smith, 2009; Florea, 2014).

1.2 Elementos componentes de las torres de telecomunicaciones atirantadas

El modelo de torre escogido está compuesto por un fuste formado por elementos columnas, diagonales y tranques y por un sistema de cables en tres direcciones radiales, los cuales proporcionan rigidez lateral a la torre. Las fuerzas provocadas por la presión del viento son absorbidas por los elementos estructurales que forman dicha torre estos son: columnas, diagonales y tranques. Las columnas o montantes son las encargadas de transmitir los esfuerzos recibidos hacia la base. Pueden clasificarse en cuanto a la formas en dos tipos: de sección angular o tubular.

El perfil más adecuado para las columnas de la torre es un perfil redondo (figura 1.4a), ya sea hueco o macizo, debido a que tiene mejores propiedades de inercia y excelentes propiedades aerodinámicas que uno de sección angular (figura 1.4b) de igual área (según la norma ITEA (2005)). Según estudios realizados por el autor De la Cruz (2015), demuestra que utilizar una sección tubular, disminuye los esfuerzos ante la acción del viento en los elementos estructurales de la torre, hasta un 24% en comparación con los de una sección angular, por ser esta poco aerodinámica, lo que provoca un aumento en las sollicitaciones en la estructura. El perfil angular permite más facilidades en el ensamblaje, debido a que sus lados son planos y no necesita modificar sus características geométricas, para lograr la unión entre los elementos; en



cuanto al caso de la sección tubular, en esta se aprecian efectos desfavorables como la reducción de su rigidez y reducción del área resistente a la fractura, por ser aplanadas en una parte de su longitud con el fin de lograr la unión con los demás elementos estructurales.



Figura 1.4 Elementos estructurales: a) sección tubular, b) sección angular.

Fuente: Catálogo RADIAN

Las diagonales: se encargan de soportar los esfuerzos axiales, a compresión y a tensión, provocados por la acción de fuerzas externas, son capaces de resistir la carga perpendicular ejercida por el viento, son elementos que teóricamente no soportan cargas muertas ajenas a su propio peso, ni cargas vivas que no sean causadas por el viento. Los perfiles más utilizados en las diagonales son los de sección circular y los angulares. Los de sección circular son tubos con extremos planos, lo que representa un inconveniente en la elaboración de las juntas y dificulta a la hora de fabricar los elementos con longitudes exactas. Por su parte los perfiles angulares son más fáciles de fabricar y ensamblar, garantizan mayor rigidez estructural; por lo que son más recomendables

El diseño de las diagonales puede ser: diagonales simples o diagonales dobles como se muestra en la figura 1.5. En el primer caso tiene la ventaja de utilizar poco material logrando mayor economía y menor peso, aunque no se recomienda para soportar grandes solicitaciones. Se utiliza principalmente en estructuras de poca altura y sección transversal pequeña, de esta forma la corta longitud de las diagonales no genera esbelteces considerables y puede resistir con mayor efectividad los esfuerzos de compresión, que para este elemento son los más críticos. Las diagonales dobles se utilizan para reducir la relación de esbeltez en torres de gran altura donde la sección



transversal se la base es grande y por tanto la longitud de sus elementos. También se utilizan para lograr una distribución de esfuerzos en dos, uno que trabaja a tracción y otro a compresión, por lo que así se logra que los esfuerzos de cortante en las columnas sean despreciables.

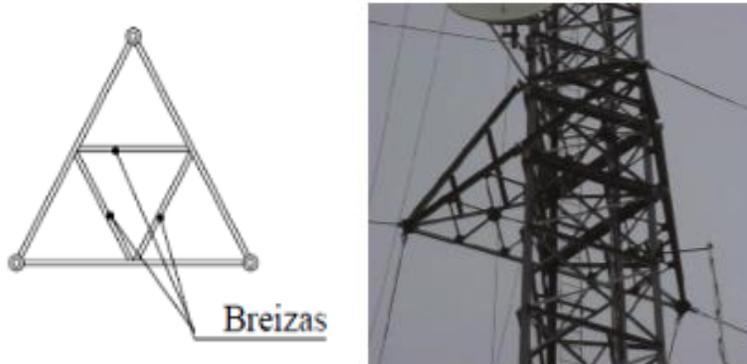


Figura 1.5 Sistemas antitorsores

Sistema antitorsores: se utiliza para contrarrestar los momentos torsores provocados por los fuertes vientos. Consiste en la colocación de diagonales auxiliares en el plano transversal de la torre, puede contar con uno o varios sistemas ubicados en diferentes lugares de altura. Los vértices de la figura formada por las diagonales auxiliares, deben de estar ubicados a la mitad de la distancia de las columnas que forman el fuste de la torre. Cada vértice tendrá amarrado dos cables, que irán arriostros a los anclajes que corresponden a los vientos utilizados en las columnas que quedan a cada lado del vértice.

Anclaje: los más utilizados a nivel mundial son el tipo T, compuesto por tres losas de hormigón: losa horizontal o base, losa vertical y losa llamada “alma” alineada con los tirantes. En Cuba los anclajes más utilizados son los de tipo bloque, enterrados en el suelo, donde el peso propio del bloque de hormigón es encargado de resistir la fuerza de tracción que le solicita la estructura. Estos se utilizan a nivel mundial cuando las cargas de tracción transmitidas por el tensor son muy grandes y los parámetros de resistencia del suelo son pequeños. Por su funcionamiento geotécnico esta cimentación no es la más eficiente y económicas.

El material que se utiliza con más frecuencia para las torres atirantadas es el acero de tipo A36 (al carbono) y el de tipo A572 de grado 50 (alta resistencia y baja aleación),



ambos clasificados por la *American Society of Testing and Materials (ASTM)*; con esfuerzos mínimos de fluencia (F_y) entre 36 ksi (248 MPa) y 60 ksi (414 MPa), respectivamente. En casi todas las torres de celosía los miembros estructurales deben ir atornillados y nunca soldados, excepto en condiciones especiales que deben ser objeto de estudio cuidadoso (Pérez, 2001). Los tornillos deben ser de acero y llevar arandela plana, arandela de presión y, preferiblemente, doble tuerca para evitar que la vibración por causa del viento llegue a aflojar los tornillos. Los cables que se utilizan generalmente son de acero galvanizado del tipo ASTM B227-04, con carga de rotura igual a 120 kg/mm² (1177 MPa).

1.3 Características y geometría de cableado en las torres de telecomunicaciones

Los cables son muy eficientes soportando los miembros en tensión aunque ellos no tienen la capacidad de resistir la curvatura o la compresión axial. Los cables son también altamente no lineales a causa de los cambios significativos en su geometría debido a los desplazamientos en los fines o en las cargas externas, estos están anclados a tierra y se sujetan a la estructura en diferentes niveles. La cantidad de arriostres que se colocan son directamente proporcionales a la altura de la torre, estos se localizan a partir de las 2/3 partes de su altura y son anclados a 3 o 4 soportes ubicados, generalmente, a nivel de la base de la torre.

Según la metodología de cálculo de las torres atirantadas (Elena, V. y Martin, P., 2012) El comportamiento no lineal, en una torre atirantada, es debido a los cambios en la rigidez de los cables con los cambios de tensión y a los grandes desplazamientos que ocurren en la estructura bajo cargas de diseño. Cuando una torre atirantada es sometida a la acción del viento, se deforma lateralmente desplazando el punto de apoyo de los cables en la torre y lo que modifica consecuentemente la componente horizontal del cable y su perfil. Los cables que se encuentran a barlovento aumentan su tensión mientras que los cables que se encuentran a sotavento experimentan una disminución de tensión y un aumento notable de la flecha, para la cual las expresiones comúnmente asumidas del cable no son válidas, ver Fig. 1.6



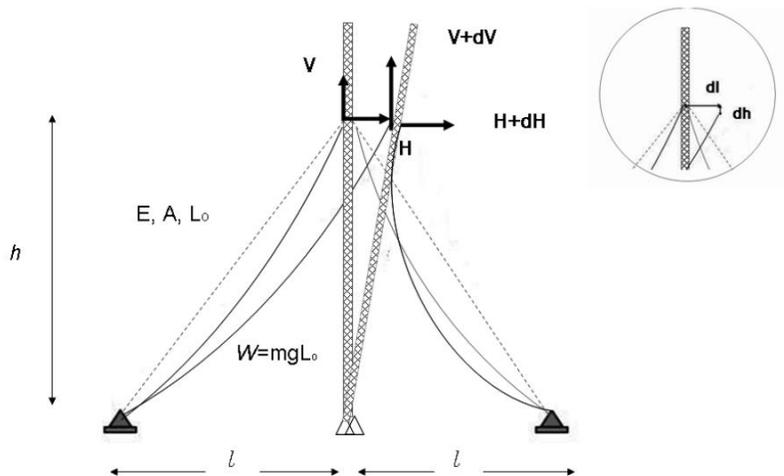


Figura 1.6: Esquema deformado de la torre con variación de perfil del cable debido a la carga horizontal.

Según el modelo de cada torre, las características de los cables varían en dependencia de la geometría del fuste y las cargas a que estará sometida la estructura. El catálogo de RADIANT, para todos los modelos de torre atirantada, la hebra del alambre de fuerza alta adicional (EHS) se conforma a ASTM A475 estándar, hebra del tipo (GS) se conforma a la Asociación Canadiense de Normas Standard G12 Grado 180, y hebra del puente (BS) se conforman a ASTM Standard A586. Todas las hebras del tipo están galvanizadas, pretensadas, medido y pelado.

En el modelo de torre atirantada, MAR-2008, de uso común en el país, consta de una sección transversal de 0.94m, posee 7 niveles de cables espaciados a 120° a continuación, en la tabla 1.1, se describen las características del cableado de dicha torre.

Tabla 1.1 Características del cableado de la torre MAR-2008. Fuente: Elena, V. (2008)



Nivel	Tipo	Alturas (m)	Dist. De anclaje (m)	Diámetro (m)
1	TS1	16.91	42	0.013
2	TS2	32.95	42	0.013
3	TS3	49.98	42	0.013
4	RS4	67.98	42	0.013
5	TS5	85.998	82	0.013
6	TS6	102.98	82	0.013
7	TS7	118.9	82	0.013

TS: tensor simple

Para el modelo de torre atirantada, MAR-300, típica en el país, posee una sección transversal de 1.02m, con 5 niveles de cables distribuidos a una altura de 90m y espaciados a 120°. Este modelo tiene en cuenta las siguientes especificaciones para los cables.

Tabla 1.2 Características del cableado de la torre MAR-300. Fuente: Elena, V. (2008)

Nivel	Tipo	Alturas (m)	Dist. De anclaje (m)	Diámetro (m)
1	TS1	17.01	42	0.009
2	TS2	33.01	42	0.009
3	TS3	50	42	0.009
4	RS4	68	42	0.013
5	TS5	86	82	0.013

Nota: Para la clasificación de los tipos de cables se utiliza la misma nomenclatura.

El modelo típico de fabricación nacional, MAR-181, al igual que el modelo anterior, es ampliamente utilizado en el país. Este consta de una sección transversal de 1.20m, de 7 niveles de cables espaciados a 120° en tres direcciones radiales. En la tabla 1.3 se muestra los tipos de cables utilizados en este modelo de torre.

Tabla 1.3 Características del cableado de la torre MAR-181. Fuente: Elena, V. (2008)

Nivel	Tipo	Alturas (m)	Dist. De anclaje (m)	Diámetro (m)
1	TS1	15	49.31	0.016
2	TS2	30	49.31	0.016
3	TS3	48	49.31	0.016
4	RS4	66	79.31	0.019
5	TS5	89	79.31	0.019
6	TS6	102	109.31	0.019
7	TS7	120	109.31	0.019

Nota: Para la clasificación de los tipos de cables se utilizó la misma nomenclatura.

Televilla es una de las torres más importantes del país, que se ubica en la ciudad de la Habana, por el área de transmisión que abarca, además de ser una de las más altas dentro del territorio nacional. Responde al modelo americano Blaw Knox, con una sección transversal de 1.50 m, con una altura de 209 m y presenta 4 niveles de cables espaciados a 120°, el tope de la torre es un mástil de 10 m, de sección tubular de 0.21 m de diámetro y 7 mm de espesor, para un total de 219 m de altura. en dicha torre las columnas son tubulares y su diámetro varía según la altura de la torre, los demás elementos estructurales son angulares.

Tabla 1.4 Características del cableado de la torre Blaw Knox. Fuente: Elena, V. (2008)

Nivel	Tipo	Alturas (m)	Dist. De anclaje (m)	Diámetro (m)
1	TS1	44.69	47	0.038
2	TS2	96.37	106	0.38
3	TS3	148.05	135	0.045
4	RS4	193.65	158	0.041

Nota: Para la clasificación de los tipos de cables se utilizó la misma nomenclatura. (López 2013)

Según (2017 torre atirantada) El punto más importante de una instalación de la torre es la correcta sujeción de los tirantes. Estos determinarán la estabilidad que tendrá la torre, y por ende, es el punto donde debemos tener mayor cuidado. Para el tipo de cable es recomendable siempre utilizar cable de retenida de varios hilos de acero y



galvanizado por inmersión; es aconsejable evitar el uso de alambre de cualquier calibre. La distancia del ancla al centro de la torre debe ser de aproximadamente 70% la altura de la torre. Por ejemplo, una torre de 10 metros, debe tener un anclaje ubicado a 7 metros de la torre; en instalaciones críticas se puede reducir este porcentaje bajo la valoración de un experto, pero de igual forma no se recomienda una distancia menor del 50%.

Las alturas a las que se debe sujetar una torre son arbitrarias y deben ser revisadas mediante un estudio de ingeniería. Se colocan los anclajes en tres direcciones diferentes y con igual separación aproximada a 120°, visto desde arriba. El uso de una 4ª dirección implicará esfuerzo adicional en una de las piernas de la torre por lo que no siempre es una solución efectiva. El calibre a seleccionar es un factor importante, ya que el cable indicado asegurara una eficiente instalación. No siempre un cable grueso es la solución. Se recomienda el grosor para los cables de la siguiente manera: las recomendaciones para el cableado de una torre atirantada, se describen a continuación:

Tramo de 30cm de ancho (STZ-30G) —————> Retenida de 1/8”

Tramo de 35 cm de ancho (STZ-35G) —————> Retenida de 3/16”

Tramo de 45 cm de ancho (STZ-30G) —————> Retenida de 1/4”

Para tramos superiores se pueden usar combinaciones de 1/4” y 5/16”

1.4 Principales causas de fallos en torres atirantadas en Cuba

Cuba por su situación geográfica se encuentra en una posición desventajosa para la seguridad al fallo de torres de telecomunicaciones. Tras el paso de los huracanes por el territorio se han reportado pérdidas importantes en torres tanto atirantadas como autosoportadas. El comportamiento de los cables es un factor fundamental en el fallo de las torres atirantadas, estos resisten esfuerzos de tracción y de cortante por la influencia del viento. Un mal funcionamiento de los cables donde ocurran grandes períodos de oscilación conlleva no solo a fallos en los cables sino también en elementos estructurales, una ruptura en ellos puede dañar irreparablemente la estructura.

Por otro lado, existen otros tipos de fallas donde las causas que las provocan son diversas, entre ellas se encuentran: la falta de mantenimiento, el incumplimiento de las



normas de proyecto, inestabilidad en cimientos, errores de ejecución, insuficiencias en el análisis estructural, consideraciones sobre cargas de viento y antenas sobre las torres y La ubicación de muchas torres en terrenos de topografía irregular marcada (zonas montañosas o colinas) que condicionan la ubicación asimétrica de los anclajes de torres atirantadas añadiendo mayor complejidad a su comportamiento.

Según una investigación realizada por la investigadora Elena Parnás en el 2008 las fallas descritas anteriormente que se evidencian en Cuba son provocadas por los fuertes vientos huracanados, donde el 80% de torres estudiadas se encuentran en zonas topográficas vulnerables que aumentan el valor de la presión del viento y el 70% de las fallas son causadas por un aumento considerable de la cantidad de antenas con respecto a la cantidad para la que fue diseñada inicialmente la torre, lo que provoca mayor carga a soportar. También puede suceder en algunos casos, que en la zona donde se ubique la torre ocurran variaciones en los valores de las cargas de viento que superen las normativas de la región. Según dicha investigación ratifica que los colapsos de las torres en Cuba se deben a: la simplificación del modelo de análisis de la estructura, lo que trae como consecuencia una disminución de las solicitaciones que están presentes en los componentes estructurales de la misma, no contemplan la asimetría de los cables, la no linealidad geométrica de los elementos estructurales y el efecto que tienen las antenas ante la acción de vientos extremos.

1.5 Estudios del comportamiento de torres de telecomunicaciones ante cambios en su estructura.

Diferentes estudios e investigaciones desarrolladas alrededor del mundo, han estado enfocadas a determinar las condiciones geométricas y estructurales para la correcta modelación de las torres en celosía. Por ende, es importante mencionar que la idealización es una de las partes más importantes del diseño estructural, ya que las estructuras deben modelarse de forma análoga a la realidad. Las primeras investigaciones publicadas en torno al comportamiento estructural de las torres atirantadas fueron Cohen y Perrin en 1957 sus trabajos tratan el análisis estático a través del modelo de viga-columna sobre apoyos elásticos formados por cables que seguían un perfil parabólico.



Davenport, propuso el uso de un factor de ráfaga que permitía estimar la respuesta estructural frente al viento. Formuló que los desplazamientos máximos de la estructura debido al viento podían ser determinados multiplicando los desplazamientos estáticos medios por el factor de ráfaga dependiente de las características espectrales de la velocidad del viento, de la frecuencia natural de la estructura y del primer modo de oscilación. Así se definió el concepto de fuerza estática equivalente como la fuerza que aplicada estáticamente a la estructura, produce los mismos desplazamientos que la fuerza dinámica que realmente actúa sobre ella.

Davenport y Sparling [18] basados en trabajos anteriores de Cohen [2] y de Davenport y Gerstoft, desarrollaron un método simplificado (Patch load) para determinar la respuesta dinámica de torres atirantadas frente a vientos turbulentos. Este método tiene en cuenta las características particulares de respuesta dinámica de las torres de tipo atirantadas. Estos estudios son adoptados por varias normas relativas a torres atirantadas y recomendado por la IASS para el análisis de estas estructuras. Los estudios más recientes relacionados con torres atirantadas están encaminados a la aplicación de modelos de elementos finitos para el análisis frente a la acción del viento y de sismo, teniendo en cuenta la no linealidad geométrica de este tipo de estructuras y considerando los cables como elementos de perfil catenaria. (Vivian P. 2008)

Actualmente un grupo de especialistas y profesores de la CUJAE estudia sobre la vulnerabilidad estructural de las torres de telecomunicaciones, tanto del tipo atirantada como autosoportadas. Un ejemplo es el Proyecto de Investigación y Desarrollo para el Programa Ramal de Telecomunicaciones. Bajo este mismo marco se crea el Grupo de Investigación de Torres, desarrollando varias investigaciones que ayudan a mejorar y optimizar los diseños de las torres de telecomunicaciones.

- **Comportamiento de la estructura ante cambios en las diagonales.**

Al modificar las diagonales simples por diagonales dobles en todos los niveles de la estructura, disminuyen los esfuerzos de compresión y aumentan la capacidad resistente, teniendo mayor influencia en los travesaños y en las propias diagonales modificadas, en caso de los travesaños aumenta hasta un 70% el valor de la fuerza axial. Sin embargo al ubicar las diagonales dobles solo en los niveles que se representa fallo, los valores de las solicitaciones se incrementan en las diagonales



significativamente, al sobrepasar los límites de resistencia en elementos que no fallan en la estructura inicial y en las columnas existe un ligero cambio que no es muy considerable, en los tranques aumentan las solicitaciones sin sobrepasar el límite de capacidad resistente de la sección y disminuyen las solicitaciones ante el cambio.

Si colocamos arriostres en las diagonales en todos los niveles de la estructura no tiene una influencia considerable en los tranques y las columnas pero sí en las diagonales, al reducir la esbeltez se elimina el fallo por acusa de un aumento de la capacidad resistente. En cambio, si colocamos arriostre en las diagonales, solo en los niveles que representa el fallo, los resultados serían similares al cambio anterior lo que tiene como ventaja un ahorro del material. Esto demuestra que los cambios realizados solo tienen efecto importante en las propias diagonales, aunque se producen cambios en los otros elementos estos no son significativos en los casos que disminuyen o aumentan se hacen en base a valores muy pequeños.

- **Comportamiento de la estructura ante cambios en las columnas:**

Si se cambia la sección original por una de mayores dimensiones, se reduce las solicitaciones en los tranques y aumentan estos valores en las columnas y diagonales, aumenta solo aumenta la capacidad resistente a la compresión y disminuye el fallo en ellas. Al cambiar la sección original por una sección tubular (Tubo extrafuerte de Ø5 pulgadas) En este caso los valores de la solicitación axial no aumentan significativamente y las condiciones de fallo en las condiciones no varían a pesar de que la capacidad de resistencia aumenta con relación a la del perfil original, aunque se genera un incremento de los valores de las solicitaciones por un aumento en el peso de la torre. En las diagonales y tranques su comportamiento no es significativo, a pesar de que disminuye en algunas diagonales la probabilidad de fallo generado por una disminución de las solicitaciones.

- **Comportamiento de la estructura ante cambios en los tranques:**

El valor de la capacidad resistente de los tranques a la tracción doblé el valor original, permitiendo que los elementos que antes presentaban fallo, ahora no los hay, aportando una forma con mayor facilidad constructiva. En este caso no se aprecian modificaciones considerables en los demás elementos estructurales de la torre.

- **Variación en la tipología de los cables:**

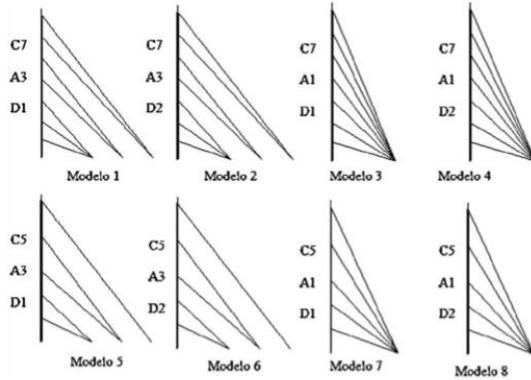


Para la topología de los cables se tuvo en cuenta el ángulo de estos con respecto a la torre, el cual depende la posición de los cables y anclajes, quedando definidas tres variables independientes: la cantidad de cables, la cantidad de anclajes y el diámetro de los cables. Según un estudio realizado por la investigadora Elena Parnás en el 2019, se emplea un experimento factorial completo donde sonde se obtuvieron 8 modelos de combinaciones de variable como se muestra en la figura 1.7 y en la tabla 1, si disminuyen la cantidad de cables de 7 a 5 aumentan las solicitaciones en los elementos del fuste en un 6% para las columnas, un 3% para los tranques y un 13% para las diagonales, la redistribución de los esfuerzos en la estructura provoca un incremento de las fuerzas en los cables de un 37% ,donde a menor cantidad de cables las fuerzas axiales serán mayores en los elementos de la torre, por tanto, al disminuir la cantidad de anclaje de 3 a 1, aumentan las solicitaciones en los elementos del fuste de 22% para las columnas, 28% para los tranques y un 21% para las diagonales, así como un 34% de incremento sobre las fuerzas que actúan sobre los cable, esta disminución de los anclajes aleja el ángulo de los cables de la condición ideal.

La disminución del diámetro de cables reduce la rigidez estructural de la torre ante cargas horizontales, produce variaciones en las solicitaciones del fuste, las columnas sufren un incremento del 3%, los tranques se mueven en el rango de un decremento del 4% hasta un incremento del 33% y las fuerzas en las diagonales se incrementan en un 4%, en el caso de los cables, los incrementos fueron del 37%. El resultado de dicho estudio demuestra que sí existe influencia en la topología de los cables en los valores de fuerza axial y desplazamiento. La cantidad de cables influye en todas las variables dependientes siendo la más significativa en un 60% de los resultados obtenidos. Al disminuir la cantidad de cables y el diámetro de estos genera incrementos de un (3- 37) % en los elementos de la torre, con excepción de algunos tranques donde la disminución del diámetro de los cables provoca un descenso de un 4% de la fuerza axial.

Fuente: análisis topológico de los cables en un modelo de torre atirantada





Modelo	Cantidad de cables C	ID	Cantidad de anclajes A	ID	Diámetro de cables D	ID
1	7	C7	3	A3	4 Φ 19-3 Φ 16	D1
2	7	C7	3	A3	7 Φ 16	D2
3	7	C7	1	A1	4 Φ 19-3 Φ 16	D1
4	7	C7	1	A1	7 Φ 16	D2
5	5	C5	3	A3	4 Φ 19-3 Φ 16	D1
6	5	C5	3	A3	7 Φ 16	D2
7	5	C5	1	A1	4 Φ 19-3 Φ 16	D1
8	5	C5	1	A1	7 Φ 16	D2

Figura 1.7 Variación en cables de torres atirantadas. Fuente: Elena, V. et al (2019)

- Variación de número y posición de los antitorsos:

Al variar la cantidad de los antitorsos y la posición, reduce el giro y el desplazamiento horizontal de la torre proporcional a la cantidad empleada y su efecto reductor se produce fundamentalmente en los tramos por debajo de la ubicación del mismo, mientras que los giros relativos entre secciones se mantienen iguales por encima de este. La posición de antitorsor que más reduce el giro de la torre es en el tope de la misma. La colocación de antitorsos logra reducir el giro máximo con respecto a un modelo típico sin antitorsor.

1.6 Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones en Cuba

Cuba no cuenta con una norma específica para el diseño y análisis de torres de telecomunicaciones, lo que limita el estudio de las torres y aumenta el riesgo de fallas estructurales. No obstante, cuenta con una norma de viento NC-285:2003 a la cual se le hicieron modificaciones y se incluyó diversos coeficientes de forma que aumentaron de especificación de la norma, la misma tiene en cuenta elementos de la ISO 4354:1997 y la ASCE 7- 98. Esta norma sustituyó a la norma anterior NC 53-41:1990. Los diseños realizados por los especialistas cubanos para torres atirantadas, se basan



en métodos y modelos de análisis simplificados. Según los resultados de los autores (Elena, 2008; López, 2013; Martín, 2012; Fernández, 2011; Véliz, 2011) se brinda una metodología para el cálculo de estas torres frente a la acción del viento:

- Proponer un diseño inicial a partir de la experiencia previa, teniendo en cuenta diseños anteriores de estructuras similares y condiciones específicas de la torre a construir.
- Determinación de las cargas permanentes sobre la estructura y tesado inicial de los cables.
- Selección de la velocidad básica según la zona de emplazamiento de la estructura de acuerdo a la NC 285:2003.
- Determinar los coeficientes de altura, sitio, recurrencia y ráfaga de acuerdo a lo planteado en la NC 285:2003.
- Determinar las cargas estáticas sobre la torre a partir de los coeficientes de forma y área neta de la estructura por tramos.
- Determinar las cargas de viento sobre los cables, antenas y accesorios.
- Realizar análisis estático no lineal bajo cargas mayoradas para las direcciones de viento determinadas.
- Obtener las solicitaciones y verificar cumplimiento de estado límite de resistencia para cada miembro de la torre, se realizará teniendo en cuenta la norma vigente de diseño de estructuras metálicas y el empleo de software especializados.
- Si no se cumplen los requerimientos anteriores modificar el diseño y repetir análisis.
- Chequear el diseño final aplicando el análisis dinámico, o estático equivalente (Patch Load) bajo cargas mayoradas para la dirección de viento crítica.

1.7 Posibles fallos de la torre atirantada “Loma de la Cruz” ante vientos extremos

La torre atirantada de la Loma de la Cruz por estar situada en una colina se encuentra expuesta y se considera desfavorable ante eventos meteorológicos y muestra alta vulnerabilidad de la estructura ante la acción de vientos huracanados de categoría 3 y aumenta para categorías mayores. El análisis de la estructura de la torre para huracanes Categoría 3 (Velocidad = 193 km/h) muestra que el comportamiento de la



misma varía según el tramo y la dirección de viento. Las direcciones de viento más desfavorables fueron la de 0° y 90° . Las solicitaciones de tracción se observan principalmente en los tranques y en algunas diagonales. La compresión es predominio en las columnas y en la mayoría de las diagonales.

En el caso de los tranques, los elementos que fallan son los correspondientes a cada nivel de cable, solo en las caras Sur (S) y Noreste (NE), caracterizado el fallo por fluencia. Las diagonales de la cara S no presentan ningún problema; los fallos son en niveles aleatorios con un total de 43 elementos, de los cuales 17 son por resistencia a la compresión, 17 por estabilidad y los restantes por flexo-compresión. Las columnas tienen fallo por resistencia a la compresión hasta el nivel 102 m para un total de 204 columnas. En los niveles superiores solo se encuentran en esta situación columnas del sudeste (SE) y suroeste (SO) aleatorias, para un total de 10 unidades.

Las mayores solicitaciones se ubican en las vigas W del nivel 0m de la torre (cortante eje 2 y 3, torsión y momento 3), en el cable 6 del SO (tracción) y en la columna SO del nivel 6m. Los máximos valores de desplazamientos se obtienen en los niveles 132m (eje x y z), correspondiente a la última sección de la torre y en el nivel 115.5m (eje y).

Conclusiones parciales del capítulo:

- Las torres atirantadas de celosía son más económicas que las torres autosoportadas cuando se requiere de grandes alturas, pero tiene como desventaja la vulnerabilidad de la torre ante vientos extremos.
- Se revisaron las causas de fallas de torres las torres atirantadas, que son causadas generalmente por insuficiencias en el análisis estructural, no contemplar la no linealidad geométrica y el estado de carga de la estructura, falta de capacitación del equipo encargado de la revisión.
- El país no cuenta con una norma específica de diseño y análisis de torres atirantadas lo que limita su estudio y aumenta el riesgo a las fallas estructurales.
- Los cables son elementos fundamentales que provocan un comportamiento no lineal geométrico complejo, en una torre atirantada, debido a los cambios en la rigidez de los cables.
- La torre de telecomunicaciones “Loma de la Cruz”, presenta alta vulnerabilidad ante huracanes de categoría 3, lo que conlleva a que se tome en cuenta



soluciones que incrementen su capacidad resistente para reducir las probabilidades de fallas de los elementos que la componen.



CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DE LA MODELACIÓN Y PROPUESTA DE SOLUCIONES ESTRUCTURALES DE LA TORRE ATIRANTADA “LOMA DE LA CRUZ”.

En este capítulo se analizan variantes para modificar la estructura de la torre, modelo de estudio, que compense la vulnerabilidad expuesta en el epígrafe 1.7 del capítulo anterior. En cada una de las variantes se analiza cómo se comporta la capacidad resistente de la estructura ante variaciones en los cables, para poder seleccionar la solución más factible. A través del empleo de la metodología para torres atirantadas y la utilización del software SAP200 v-14 se obtendrá los resultados basados en la modelación y análisis de las variantes empleadas.

2.1 Características de la torre “Loma de la Cruz”

La torre de análisis es del tipo atirantada modelo RG-55, diseño de la empresa canadiense RADIAN. Cuenta con una sección transversal de forma triangular equilátera, con lados de 1.5 m constante en toda su altura. El fuste se eleva a 132m del nivel del suelo, compuesto por 22 secciones de 6m cada una, si se suma además el mástil donde se encuentra empotrada la antena UHF, la altura total de la torre es de 143m, como se muestra en la figura 2.1.

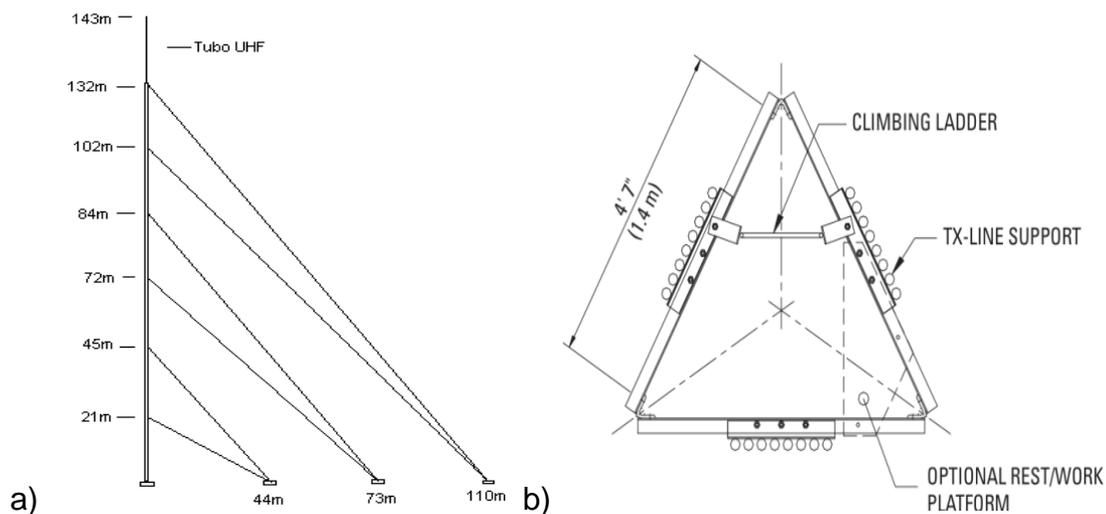


Figura 2.1 Torre “Loma de la Cruz”. a) elevación b) sección transversal.

Fuente: Catálogo RADIAN



Su estructura de celosía se conforma de columnas, diagonales y tranques de sección angular con alas iguales. Los tranques se encuentran espaciados a una distancia de 1,5m y el tipo de diagonal es simple, como se muestra la figura 2.2.



Figura 2.2 Sección del fuste de la torre. Fuente: archivos de ETECSA

Los perfiles que se utilizan son de 130x17x6000 mm para las columnas, en el caso de las diagonales son de 65x6x2050 mm y de los tranques 50x5x1400mm. El acero de los elementos es A572 ATSM, grado 50 y los cables tienen una carga de rotura de 120 kgf/mm². Las uniones son de tornillería galvanizada en todos los casos. En el caso de los tranques y diagonales es una unión simple (articulada), mientras que la unión entre columnas es mediante empalmes con seis tornillos (se considera una unión rígida). (Ver figura 2.2).

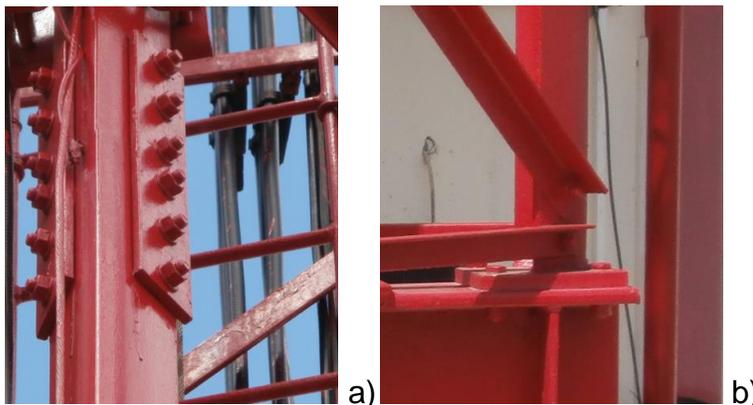


Figura 2.3 Uniones de los elementos estructurales de la torre. a) unión entre columnas b) unión de tranques y diagonales. Fuente: archivos de ETECSA



Dicha torre cuenta con seis niveles de cables que se distribuyen en la torre a alturas de 21m, 45m, 72m, 84m, 102m y 132m. Los cables de la cara norte tienen mayor longitud porque esta se encuentra en una pendiente. Los diámetros de los cables por nivel se muestran a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Diámetros de los cables por nivel. Fuente: Elaboración propia

Nivel de cable	Diámetro (m)
1	0.015
2	0.02
3	0.02
4	0.022
5	0.028
6	0.032

La cimentación se conforma por tres anclajes tipo bloque en cada dirección de viento. Los anclajes se encuentran a una distancia con respecto al fuste de la torre de 44 m, 73 m y 110 m. A cada uno de ellos se arriostran dos niveles de cables. Como la torre que se analiza se encuentra encima de una colina, sus anclajes no se encuentran al mismo nivel de terreno en relación a la base de la torre, por lo que los desniveles de los anclajes para cada dirección se muestran en la tabla 2.2 y figura 2.3.

Tabla 2.2 Distancias de anclajes según ubicación. Fuente: Elaboración propia

Dirección de los anclajes	Altura por anclajes (m)		
	1er anclaje	2do anclaje	3er anclaje
Norte	8	17	25
Sureste	4	6	9
Suroeste	5	7	9



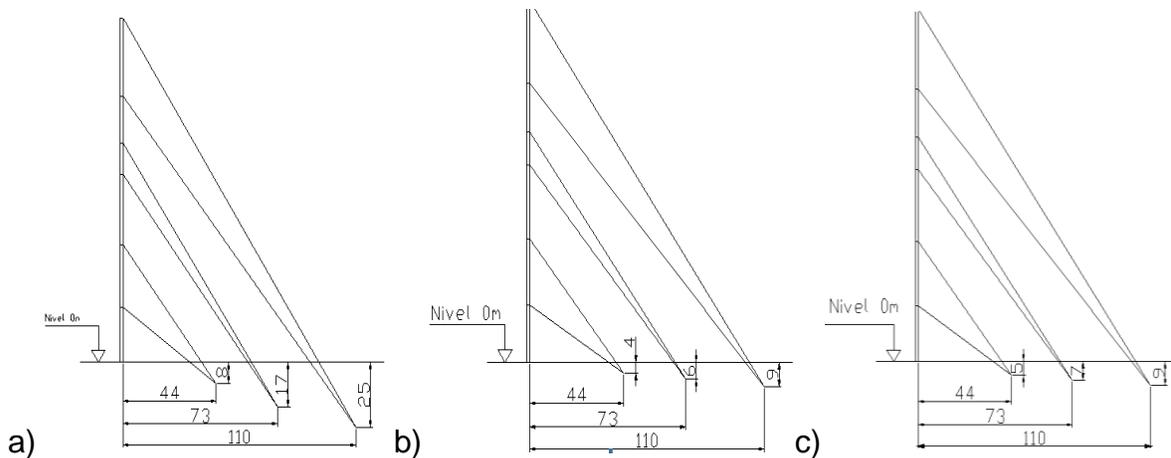


Figura 2.3 Asimetría en cada dirección de cables Torre “Loma de la Cruz” a) Norte b) Sureste c) Suroeste. Fuente: Rivas, E. (2018)

2.2 Determinación de las variantes para cambio del cableado en la torre.

El comportamiento de los cables en la estructura desarrolla un factor fundamental; entre las principales causas de fallo en estas estructuras está la acción del viento y la rotura de los cables. Como se muestra en epígrafes anteriores, la variación en los cables influye notablemente en el comportamiento estructural en las torres atirantadas. En el mismo intervienen varios factores como son: la cantidad de niveles de cables, de anclajes, la tensión de los mismos en el momento que actúa la carga de viento, el diámetro y el ángulo con respecto al fuste.

Para determinar las variantes a realizar en la búsqueda de disminuir la vulnerabilidad estructural de la torre, se tienen en cuenta dos elementos esenciales: uno es el resultado del estudio del posible colapso de la torre ante vientos extremos y el otro es el estudio del comportamiento de la estructura ante cambios en los cables. Las posibles soluciones se conciben según la afectación que se quiera eliminar y depende de la influencia que pueda generar el cambio del cableado en los componentes del fuste.

Según el estudio del posible fallo de la torre, las sollicitaciones que generan la mayor cantidad de fallos en los elementos son por compresión y flexo-compresión. En algunos casos las secciones presentan pérdida de la estabilidad y en el último nivel aparecen desplazamientos considerables. La mayor cantidad de elementos afectados



se presentan en los niveles inferiores y en el nivel superior aparecen de forma aleatoria. Por esta causa se tomarán las principales medidas para disminuir las solicitaciones, que pueden ser: aumentar la cantidad de cables, así como el diámetro de estos y la cantidad de anclajes. Además de brindarle resistencia estructural en la torre, ya que un fallo en estos provoca un aumento significativo en las solicitaciones en la estructura del fuste y puede llevar a un colapso general de la torre ante vientos extremos.

A continuación, se muestra una tabla resumen de la relación, por elementos, del posible fallo de la torre y del comportamiento de estos ante cambios en los cables, que permiten tomar decisiones con respecto a las variantes.

Tabla 2.3 Posible fallo de la torre y del comportamiento de estos ante cambios en los cables. Fuente: Elaboración propia

Torre atirantada	Elementos estructurales		
	Diagonales	Tranques	Columnas
Loma de la cruz	En algunas aumentan las solicitaciones de tracción	Aumentan las solicitaciones a tracción	
	En la mayoría aumentan las solicitaciones a compresión		Aumentan las solicitaciones a compresión
	En la cara (S) no presentan fallo	Aumenta el fallo en cada nivel de cable por fluencia en la cara (S) y (NE)	
Modelo típico	C : Aumentan las solicitaciones en un 13%	Aumentan las solicitaciones en un 3%	Aumentan las solicitaciones en un 6%



	A: Aumentan las solicitaciones en un 21%	Aumentan las solicitaciones en un 28%	Aumentan las solicitaciones en un 22%
	Ø: Aumentan las solicitaciones en un 4%	Aumentan las solicitaciones entre 4-33%	Aumentan las solicitaciones en un 3%

Nota: c: disminución de la cantidad de cables, A: disminución de la cantidad de anclajes, Ø: disminución del diámetro.

2.3 Descripción de las variantes:

Se proponen dos variantes para la posible solución estructural que contrarreste la vulnerabilidad de la torre y le brinde resistencia lateral ante fuertes vientos. En la primera variante se propone aumentar la cantidad de cables, que busca disminuir las solicitaciones en fuste, el fallo por fluencia que presenta la torre en cada nivel de cable y reducir el fallo de las columnas y tranques por compresión y flexo-compresión. Se le añaden tres niveles más de viento a la torre: uno en el nivel 33 m, otro en el nivel 59 m para evitar máximos valores de desplazamientos, los cuales se evidencian a partir del nivel 132 m, que corresponde a la última sección de la torre. Este aumento se realiza igual para cada vértice del fuste, lo que resulta un total de seis cables auxiliares en toda la estructura. Estos cables (de color rojo en la figura) se sujetan a los anclajes ya existentes y su disposición se muestra en la figura 2.4

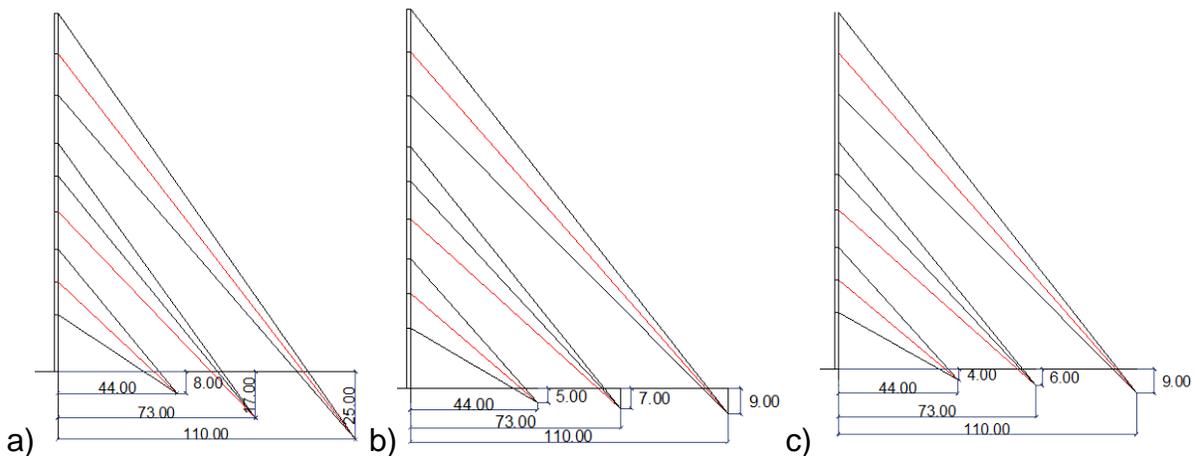


Figura 2.4 Disposición de los cables a) Norte, b) Sureste, c) Suroeste. Fuente: Elaboración propia



En la segunda variante se aumentan dos niveles de cables: uno en el nivel 33 m y otro en el nivel 59 m, pero en este caso se colocan anclajes nuevos para su sujeción. Por lo que se incluyen dos cables y dos anclajes por vértice, para un total de seis respectivamente. El anclaje D se ubica entre el primero y segundo anclaje, y el E, entre el segundo y el tercero. La distancia y profundidad se muestran en la figura 2.5 y la tabla 2.3, respectivamente. El diámetro de los nuevos cables, se toman similar a los ya existentes, según el lugar que ocupen en la altura de la torre, aumentando su valor a medida que esta aumente, lo cual se muestra en las tablas 2.4 y 2.5

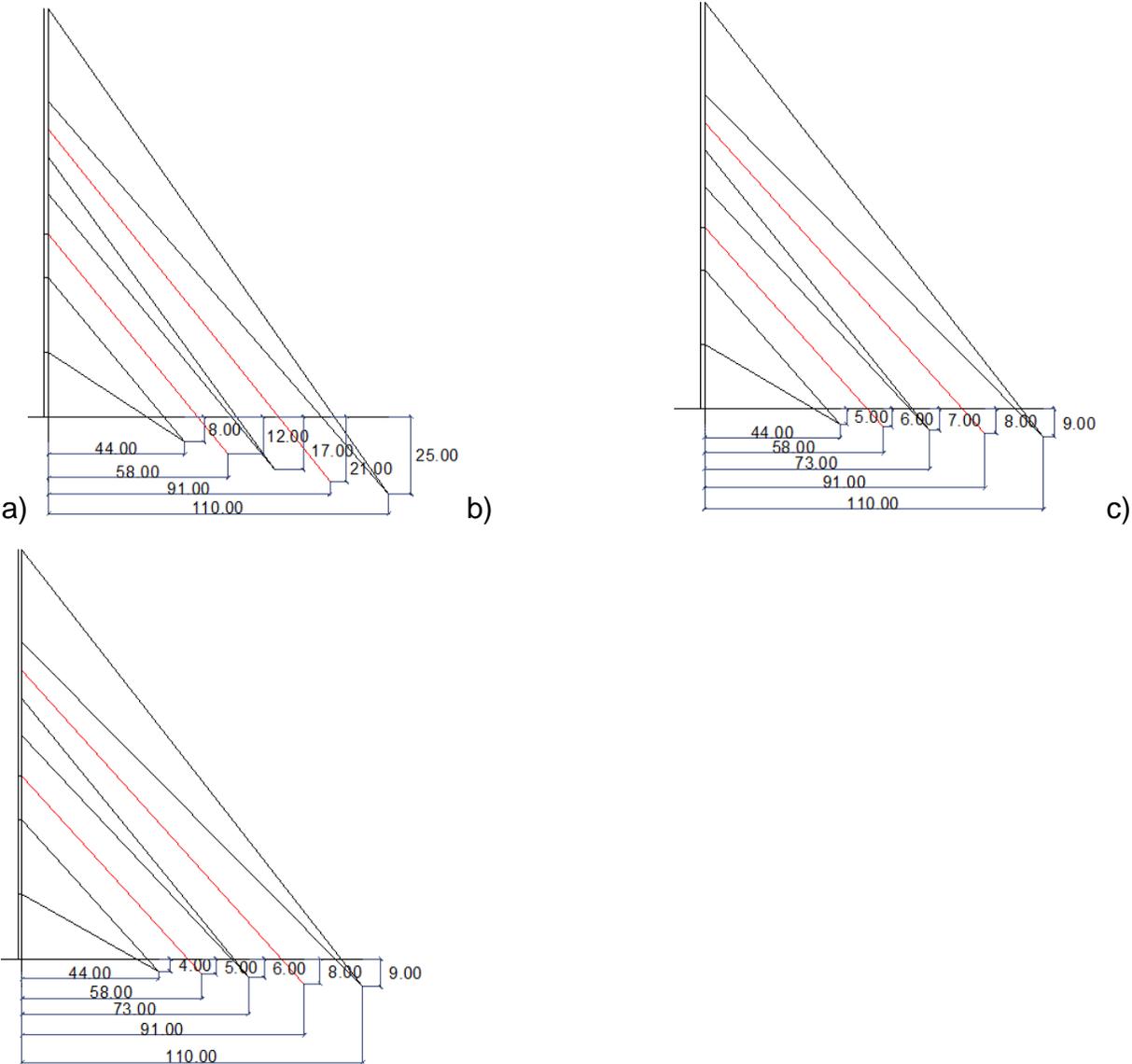


Figura 2.5 Disposición de los cables y los anclajes de la variante 2, a) Norte, b) Sureste, c) Suroeste. Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.3. Profundidad de los anclajes. Fuente: Elaboración propia

Dirección de los anclajes	Altura por anclajes (m)				
	1er anclaje	D	2do anclaje	E	3ro anclaje
Norte	8	12	17	21	25
Sureste	5	6	7	8	9
Suroeste	4	5	6	8	9

Tabla 2.4. Diámetro de los cables en la Variante 1. Fuente: Elaboración propia

Nivel de cable	Diámetro (m)
1	0.015
A	0.015
2	0.013
B	0.02
3	0.02
4	0.022
5	0.028
C	0.013
6	0.032

Tabla 2.5. Diámetro de los cables en la Variante 2. Fuente: Elaboración propia

Nivel de cable	Diámetro (m)
1	0.015
2	0.02
A	0.02
3	0.02
4	0.022
B	0.028
5	0.028
6	0.032



2.4 Modelación de las Variantes

A continuación, se exponen las particularidades de la modelación de cada una de las variantes presentadas y los procedimientos en correspondencia con el software que se emplea (SAP 2000v 14).

Modelación de la Variante 1

En el software, se tiene en cuenta para modelar, las características esenciales de cada elemento estructural. En este caso, solo se aumenta la cantidad de cables, por lo que se modelan los mismos como un elemento lineal, con formulación catenaria, que va desde el anclaje existente hasta el nivel que se define en la variante. A pesar de tener esa forma en el modelo, se definen en las características geométricas propias de un elemento tipo cable, el diámetro, longitud del cable y el tesado inicial.

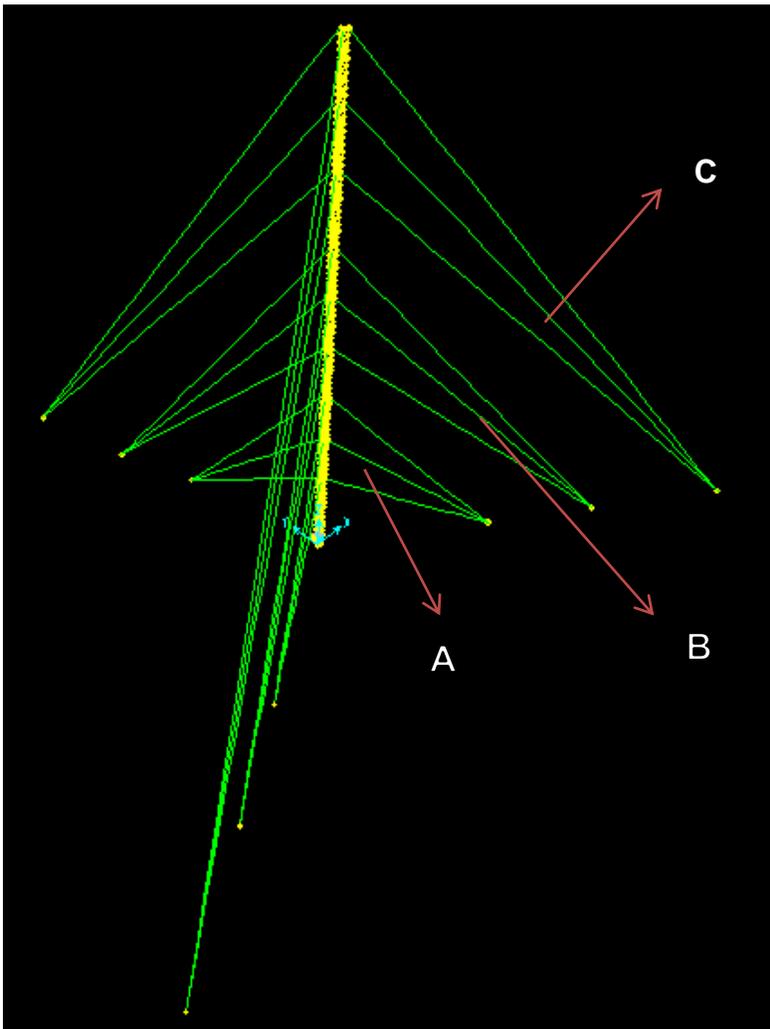


Figura 2.6 modelación de la variante 1. Fuente: elaboración propia



Para obtener la deformada inicial se aplica una fuerza en el extremo de ésta unido al anclaje igual al valor del tesado inicial. Esta fuerza se realiza de manera iterativa mediante un análisis no lineal hasta alcanzar el equilibrio entre la deformada y la tensión fijada en el extremo. En la tabla 2.6 se muestran los valores del tesado inicial

Tabla 2.6 Valores de tesado inicial. Fuente: elaboración propia

Cables	Fu (kN)	% de Fu	Norte (kN)	% de Fu	Sureste (kN)	% de Fu	Suroeste (kN)
A	960	14.22	136.5	15	144	15	144
B	372	13	48.35	12.74	42.28	12.71	47.39
C	960	9.93	95.3	9.38	90.1	9.46	90.9

Llegado a este punto se obtiene la configuración inicial del cable, la cual está determinada por la longitud real del cable y la relación entre este y la cuerda.

Se realiza el cálculo de la carga de viento en el cable, que se considera uniformemente distribuida en toda su extensión, el valor se calculó a partir de la velocidad básica del viento y los coeficientes correspondiente a la mitad de la altura, entre el anclaje del cable y el nivel de sujeción en el fuste. La carga de viento se aplica en sentido y dirección del viento para 0°, 60° y 90° teniendo en cuenta el ángulo formado entre el vector de viento y el cable. En el análisis estático, el valor de la carga de viento sobre la estructura está determinado por la velocidad básica de viento, la cual se tomará a partir de lo establecido en la NC 285:2003

$$Q \text{ cables} = q_{10} * Ch * Cs * Ct * Cra * Cf * \text{Diámetro} * \text{sen}3\varphi \text{ (kN/m)}$$

Dónde:

q_{10} , Ch , Cs , Ct , Cra , Cf se determinan según la NC-285:2003

$$Cq_{10} = \frac{V_{10}}{1.6 * 10^3} \text{ Donde } V_{10} = 193 \text{ Km/h} \longrightarrow \text{Velocidad en un huracán categoría 3}$$

$Ct = 1$ Coeficiente de recurrencia

$Cs = 1.1$ Coeficiente de sitio

$Cra = 0.9$ Coeficiente reductor de viento

$Ch \longrightarrow$ Longitud media entre la altura del cable y el anclaje

φ : Ángulo comprendido entre el vector viento y el cable



Los anclajes a tierra de los cables se consideran como articulaciones espaciales teniendo en cuenta la incapacidad de los cables de tomar flexiones. Como los anclajes están ubicados a diferentes cotas de terreno, la aplicación de fuerzas de tesado no es igual para todos los cables, ya que bajo esa condición la torre no estaría en su posición de aplomo. Las tensiones iniciales se toman en un rango de 8 y el 20% de la carga de rotura, los desplazamientos del fuste menores a 0.01 metros en los niveles de unión con los cables. El máximo desplazamiento para el estado inicial de la torre es 0.0092

Modelación de la Variante 2

En esta variante se modelan los cables similares a la variante anterior. En este caso los cables auxiliares se sujetan a tierra por medio de nuevos anclajes, a diferencia de la variante anterior que se sujetaban a los ya existentes. El máximo desplazamiento para el estado inicial de la torre es 0.0074 m. Los anclajes a tierra estos cables se consideraron como articulaciones espaciales al igual que los anteriores

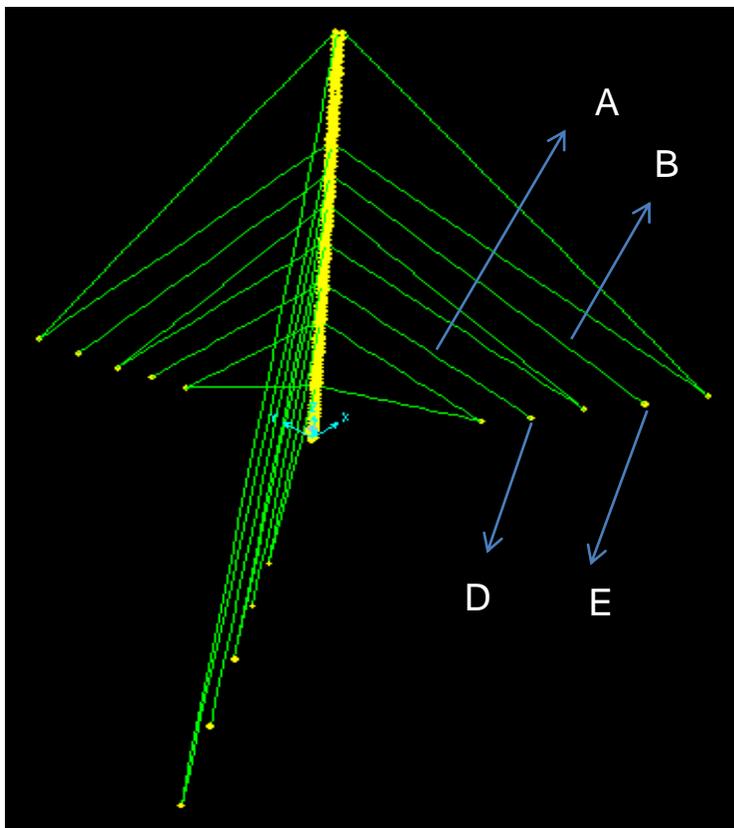


Figura 2.7 Denominación de los anclajes y los cables auxiliares. Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.7 Valores de tesado inicial para la variante 2. Fuente: elaboración propia



Cables	Fu (kN)	% de Fu	Norte	% de Fu	Sureste	% de Fu	Suroeste
A	372	13	48.36	12.72	47.32	12.74	47.39
B	456	11.65	53.12	10.49	47.83	10.5	47.88

2.5 Análisis de los resultados

De estas dos variantes propuestas se toma la que más contrarreste el fallo de la torre y que a su vez la torre pueda soportar un huracán categoría 3 sin que se afecten los cables y aumenten en gran manera las solicitaciones en la torre.

Análisis de la variante 1

Al aumentar el número de los cables y disminución de diámetro de estos disminuyen los esfuerzos de tracción en la mayoría los tranques y diagonales sobre todo en los niveles de cables, para una disminución de los fallos en estos elementos del 98.5% y 97.4% respectivamente, aumentando su capacidad resistente a la torre, sin embargo aún existe fallo en las columnas de la cara Sureste y Suroeste por esfuerzos a compresión por debajo del primer nivel de cable y después del nivel 117 m por tracción

Tabla 2.8 Fallo por elementos (Fuente: Elaboración propia)

Elementos	Torre original	Torre modelo 1	Reducción de la falla%
Diagonales	37	5	86.5
Columnas	209	52	75.1
Tranques	10	8	20

Análisis de la variante 2

En esta variante persiste el fallo en la estructura de la torre principalmente en las columnas que son de un (cantidad de columnas) aumentando las solicitaciones a compresión y flexo-compresión. No se evidencia cambios significativos con relación al modelo existente donde fallaban 256 elementos para un total de 792, los fallos en los tranques son generalmente a tracción en algunos niveles de cables.

Tabla 2.9 Fallo por elementos (Fuente: Elaboración propia)

Elementos	Torre original	Torre modelo 2	Reducción de la falla%
Diagonales	37	38	-2.8



Columnas	209	203	2.8
Tranques	10	10	-

2.6 Propuesta de solución estructural para la torre de telecomunicaciones “Loma de la Cruz”

Luego de analizar el comportamiento de la torre ante las modificaciones propuestas, se conforma una propuesta de soluciones para evitar el fallo de la torre ante la rotura de los cables en la torre atirantada objeto de estudio.

Ante el fallo de las torres se decide tomar como solución la variante uno que propone aumentar tres niveles de cables para un total de 9 cables auxiliares. Los cables A y C con un diámetro de 0.013 m y B con diámetro igual a 0.02 m que se anclan a los anclajes ya existentes para disminuir el posible fallo por tracción en los tranques y diagonales que se evidencia en los niveles de cables y disminuir las solicitaciones a compresión de algunas columnas. Aunque esta variante no contrarresta en su totalidad la vulnerabilidad de la estructura se considera factible, la cantidad de cables propuestos permite que la torre aumente su resistencia estructural, proporcionándole rigidez al fuste y evitar la menor cantidad de fallos ante las cargas de viento.



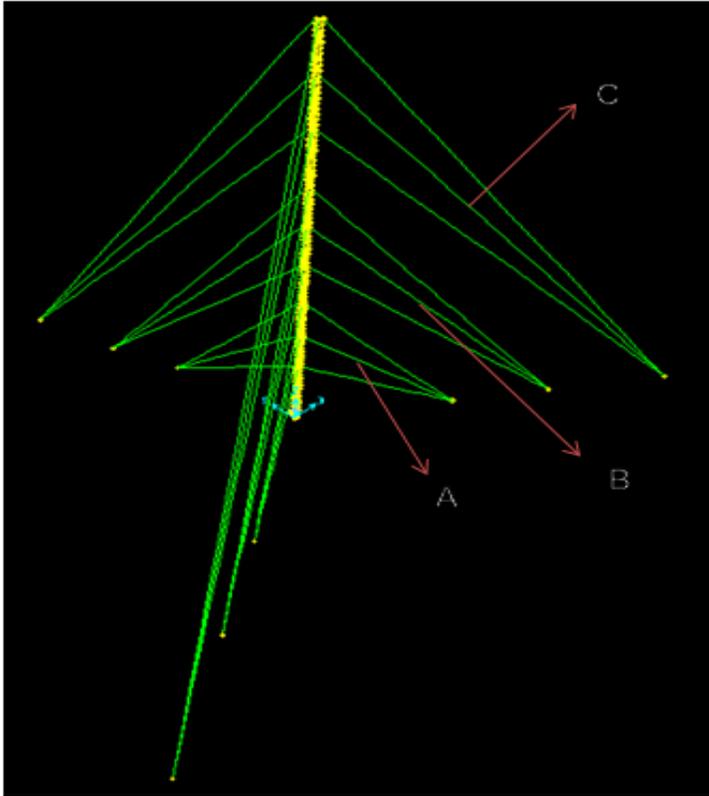


Figura 2.8 Variante final de cambio en los cables. Fuente: Elaboración propia

Conclusiones parciales

- La solución que se propone para aumentar la cantidad de cables en la estructura, aumenta su capacidad resistente.
- Cuando introducimos la variante cantidad de cable juntamente con el aumento de la cantidad de anclajes, no hay cambios significativos en los elementos del fuste lo cual no es viable porque no cambia la situación con respecto al modelo actual, ocurren fallos en algunos elementos donde antes no ocurría.
- Sin embargo cuando disminuimos el diámetro y aumentamos la cantidad de cable, se nota cambios en la mayoría de los elementos aumentando su capacidad resistente de la.
- Se demuestra que la solución más efectiva debe ser la variante 1 porque disminuyen los esfuerzos en gran manera en la torre.



CONCLUSIONES

- Mediante el estudio de los principales aspectos teóricos relativos al comportamiento, los métodos de análisis las torres atirantadas e investigaciones anteriores, se pudo realizar una adecuada selección de las variantes del cableado.
- Para llegar a definir una solución se hizo necesario introducir cambios en la cantidad de elementos como los cables y el diámetro, intencionados a incrementar la capacidad resistente en estos elementos y en otros elementos.
- Se demostró el aumento de la cantidad de anclajes y el aumento de diámetro no siempre es una solución factible cuando se quiere disminuir las solicitaciones en los elementos que componen el fuste.
- Por tanto, se demuestra que la cantidad de cables que se propone aumentar hace que disminuyan la fuerza axial en estos elementos y a su vez las solicitaciones y aumente su capacidad resistente ante la carga de viento en los cables, lo que disminuye la probabilidad de fallo ante vientos extremos hasta categoría 3.
-



RECOMENDACIONES

- Se recomienda en estudios posteriores el análisis de los anclajes cables, para comprobar la resistencia del mismo ante las nuevas cargas a la que es expuesto.
- Se recomienda colocar arriostrar los tranques correspondientes a cada nivel de cable para evitar esfuerzos a tracción y perfiles dobles en las columnas que se encuentran por debajo del nivel 21 m, para evitar el fallo por compresión.
- Las soluciones planteadas se consideran viables y por tanto se recomienda a los especialistas el análisis económico de las mismas para su posible implementación.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- Elena Vivian P.(2008) Fallas estructurales en torres reticuladas para telecomunicaciones
- 2- <https://www.syscomblog.com/2017/04/torres-arriostradas.html?m=1>
- 3- Rodríguez, E. (2015). “Análisis y diseño comparativo entre una torre autosoportada triangular de 40m de altura con montantes UV y una con montantes circulares”
- 4- Madugula, M. (2002). American Society of Civil Engineers. “Dynamic response of lattice towers and guyed mast”. Reston Virginia
- 5- Pérez, C. (2001). “Torres para antenas”. Departamento de Ingeniería de Comunicaciones, Universidad de Cantabria
- 6- García, c. G. 2011. Análisis estructural de torres autosoportadas bajo cargas de viento y sismo.
- 7- Catálogo RADIANT (sf)
- 8- Elena Vivian P. (2008). Influencia de la asimetría de los anclajes y la no linealidad de los cables en la vulnerabilidad estructural de torres atirantadas.
- 9- Elena Vivian P. (2019). Análisis topológico de los cables en un modelo de torre atirantada
- 10- <http://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-743f2505-3d2b-90d3-532acf40eb5e/tab/summary> Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers. Rio de Janeiro, 2005, p. 1109.
- 11-Méndez, k. C. G. 2015. Análisis de una torre de telecomunicaciones atirantada ante los efectos de viento: relación del costo de la torre en función de la velocidad del viento. Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 12- Windle, J.; Kearsley, W. (1987). Engineering Handbook 7th edition, National Association of Broadcasters, Section 2: antennas and towers. “Design, Erection, and Maintenance of Antenna Structures”.
<https://www.americanradiohistory.com/Archive-NAB-Engineering/NAB-7th-Edition/2-NAB-7th.pdf>



- 13-Smith, B.W. (2007), Communication structures. First ed, ed. A. Thomas Telford., London, Great Britain.
- 14-Norma ITEA (2005). Instituto Técnico de la Estructura en Acero. Tomo 19: Sistemas estructurales, Otras estructuras.
- 15-Elena Vivian P. (2012) Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones bajo la acción del viento.
- 16-<http://www.ampliantena.com/img/cms/Manuales/Manual%20de%20Torres%20Triangulares%20Arriostradas%20Series%20460-360-250-180.pdf>
- 17-http://www.researchgate.net/publication/277665104_influencia_de_la_presencia_de_antenas_en_torres_de_telecomunicaciones_en_la_vulnerabilidad_estructural_ante_cargas_de_viento
- 18-Torre atirantada (2017)
<https://www.syscomblog.com/2017/04/torresarriostradas.html?m=1>
- 19-Elena Vivian P., Patricia Martín y Katia Luis (2019) Análisis topológico de los cables en un modelo de torre atirantada
- 20-De la Cruz, A. (2015) “Structural Behavior of a Guyed Mast”. 14th International Conference on Wind Engineering. Porto Alegre, Brazil.
- 21-Norma Cubana NC 285:2003 “Carga de viento. Método de cálculo”
- 22-López, A. (2013). Influencia de la presencia de antenas en torres de telecomunicaciones en la vulnerabilidad estructural ante cargas de viento.
http://www.researchgate.net/publication/277665104_influencia_de_la_presencia_de_antenas_en_torres_de_telecomunicaciones_en_la_vulnerabilidad_estructural_ante_cargas_de_viento
- 23-Rivas Elizabeth F. (2018) Propuestas de soluciones estructurales para la torre de telecomunicaciones “loma de la cruz” ante vientos extremos
- 24-Briñones Fernando G. (2017) Análisis de la vulnerabilidad estructural ante la acción de vientos extremos de la torre atirantada rg-55
- 25-http://www.researchgate.net/publication/258087505_MODELACIÓN_COMPUTACIONAL_UTILIZANDO_EL_MÉTODO_DE_LOS_ELEMENTOS_FINITOS_DE_ANCLAJE_TIPO_T_PARA_TORRES_ATIRANTADAS_DE_TELECOMUNICACIONES



26- <http://www.ampliantena.com/img/cms/Manuales/Manual%20de%20Torres%20Triangulares%20Arriostradas%20Series%20460-360-250-180.pdf>



ANEXOS

ID	Modelo	Año Const	Año caída	Altura Torre	Columnas	Diagonales	Tranques	An/Ab	Anti torsor	Niveles de Cables
1	MAR 181	88	2004	70	L 100 x 100 x 10	L 50 x50x5	L63x63x6	0.29	2	3
2	BABINEY	76	2001	80	L 75x75x8	L 40 x40x4	L 50x50x5	0.25	2	5
3	Atirantada atípica	70	2001	82.5	L 150 x150 x 13	L 50 x 50 x 6	L 50 x 50 x6	0.27-0.57	2	4
4	BABINEY	70	2001	150	L 75x75x8	L 40 x40x4	L 50x50x5	0.25	2	6
5	Atirantada atípica	77	2001	80	tubular	tubular	tubular	?	3	6
6	BABINEY	78-80	2005	51	L 75x75x8	L 40 x40x4	L 50x50x5	0.25	?	3
7	Atirantada atípica	76	2005	45	perfil	perfil	perfil	?	?	3
8	MAR 300	80	2005	33	L 75x75x8	L 32 x32x4	L 40x40x4	?	0	6

