



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

Facultad de Ingeniería

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

**ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE
LA ACCIÓN DE VIENTOS EXTREMOS DE LA TORRE
ATIRANTADA RG-55**

Autor: Fernando Briñones García

HOLGUÍN

2017



UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN

Facultad de Ingeniería

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES

TRABAJO DE DIPLOMA

ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL ANTE LA ACCIÓN DE VIENTOS EXTREMOS DE UNA TORRE ATIRANTADA RG-55

Autor: Fernando Briñones García

Tutora: Ing. Vivian Hernández Columbié

HOLGUÍN

2017

PENSAMIENTO

“De aquí en adelante la posición de una nación en el mundo será condicionada por tres factores: el petróleo, los transportes y las telecomunicaciones.”

Discurso pronunciado por el Presidente de los Estados Unidos Woodrow Wilson en la Conferencia de Paz de París de 1919.



DEDICATORIA

A mi madre, por todo su apoyo y amor. Los recuerdos de nuestros momentos juntos son mis más grandes tesoros.

A mi padre, por ser mi paradigma como persona y como profesional, por darme tanto cariño y atención, nunca un hijo se ha sentido tan orgulloso de su padre.

A mi hermana, por ser un motor fundamental en mi vida.

A mi mujer, por compartir conmigo 7 años de su vida y por amarme con mis defectos y virtudes, te amo.

A mis suegros, por haberme acogido como a un hijo en el momento más difícil de mi vida, los quiero.

A todos los amigos con los que compartí estos años de estudio, gracias por brindarme su apoyo desinteresado.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora Vivian, por todo el tiempo y el conocimiento brindado para la elaboración de este trabajo, gracias.

A todos los profesores que me impartieron clases durante estos 5 años de estudio, todos y cada uno pusieron su granito de arena en mi formación como ingeniero civil.

Al Msc Ing. Eddy Hernández, por ayudarme en la modelación de la torre en el programa SAP 2000 y por darme sugerencias para elaboración del trabajo.

A los Ingenieros en Telecomunicaciones de la empresa RADIOCUBA, Marcelino Rodríguez Sosa y José Luis Leyva Seisdedos, por haberme brindado los datos necesarios para la elaboración de este trabajo.

Al Ingeniero Pupo de la empresa ETECSA, por haberme confiado este proyecto y brindarme documentos de interés para el trabajo.

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó el comportamiento estructural de la torre atirantada RG-55 ante la acción de cargas de viento provocadas por fenómenos meteorológicos de gran intensidad. Este estudio ha sido realizado debido al alto índice de fallas estructurales ocurridas en los últimos años en las torres de telecomunicación ante la acción de vientos extremos y a los métodos de cálculo inexactos aplicados para su comprobación estructural. La torre en cuestión fue modelada mediante el software SAP 2000, en el cual se le aplicaron las cargas estáticas y dinámicas correspondientes al valor de presión básica que establece la norma cubana para la zona oriental del país, así como para vientos huracanados de categoría 3, 4 y 5 en la escala Saffir-Simpson. Los resultados obtenidos muestran fallos en las diagonales y columnas de los distintos tramos de la torre, fallos que aumenta en forma proporcional a la categoría de huracán que se analiza, además se demuestra que las direcciones de viento más desfavorables para el sistema estructural son las de 0° (normal a la cara de la torre) y 90° (paralela a la cara de la torre) siendo la más crítica la primera. También se establecen recomendaciones orientadas a la prevención y mitigación de riesgos por daños estructurales ante el efecto de fenómenos meteorológicos.

ABSTRACT

In the present work, the structural behavior of the rotor tower RG-55 was analyzed in the presence of wind loads caused by high intensity meteorological phenomena. This study has been carried out due to the high rate of structural failures that have occurred in the last years in the telecommunication towers due to the action of extreme winds and to the inaccurate calculation methods applied for its structural verification. The tower in question was modeled using SAP 2000 software, in which the static and dynamic loads corresponding to the basic pressure value established by the Cuban standard for the eastern part of the country were applied, as well as for Category 3 hurricane winds, 4 and 5 on the Saffir-Simpson scale. The results obtained show faults in the diagonals and columns of the different sections of the tower, faults that increases proportionally to the category of hurricane that is analyzed, in addition it is shown that the directions of wind more unfavorable for the structural system are those of 0° (normal to the face of the tower) and 90° (parallel to the face of the tower) being the most critical the first. It also establishes recommendations aimed at the prevention and mitigation of risks due to structural damage to the effect of weather phenomena.

INDICE

Introducción.....	1
1. CAPÍTULO 1: CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS TORRES DE TELECOMUNICACIONES ATIRANTADAS Y LOS MÉTODOS PARA SU CÁLCULO.	
1.1 Generalidades.....	7
1.2 Surgimiento y evolución de las torres de telecomunicaciones.....	7
1.2.1 Antecedentes históricos del estudio del comportamiento estructural de las torres atirantadas.....	8
1.3 Características generales de las torres de comunicaciones atirantadas....	12
1.3.1 Ventajas y desventajas de las torres atirantadas	13
1.3.2 Características de los materiales utilizados en las torres de atirantadas.....	14
1.3.3 Forma y dimensiones de las torres atirantadas.....	15
1.3.4 Clasificación de los elementos que componen las torres.....	16
1.3.4.1 Elementos principales.....	17
1.3.4.2 Elementos secundarios.....	17
1.3.4.3 Sistemas antitorsos.....	20
1.3.6 Proceso constructivo y tecnológico.....	22
1.4 Principales fallas de las torres atirantadas de comunicaciones	23
1.4.1 Principales afectaciones provocadas por eventos hidrometeorológicos en el campo de las telecomunicaciones, en la provincia de Holguín.....	24
1.5 Particularidades del análisis y diseño de torres de acero utilizando sistemas profesionales de cómputo.....	25
1.5.1 Métodos y análisis empleados en el contexto nacional.....	26
2. MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE LA TORRE ATIRANTADA RG55 MEDIANTE EL PROGRAMA SAAP 2000 V-15.....	28
2.1 Función y características del objeto de obra.....	28

2.1.1	Diagnóstico del estado actual del objeto de estudio	30
2.1.2	Acciones implementadas para el diagnóstico.....	30
2.1.3	Análisis de los resultados.....	30
2.2	Metodología de cálculo para la carga de viento	30
2.2.1	Análisis estático según establece la norma cubana NC: 285:2003. Cálculo de las cargas de viento.....	31
2.2.2	Análisis dinámico mediante el método de efecto de ráfagas : Método de análisis simplificado “Patch Load”	45
2.3	Especificaciones sobre la modelación de la torre objeto de estudio en el Programa SAP 2000 V-15.....	51
2.3.1	Modelación de la geometría.....	52
2.3.2	Modelación del material.....	52
2.3.3	Modelación de las condiciones de apoyo.....	52
2.3.4	Modelación de las cargas y combinaciones.....	53
	3. Análisis de la vulnerabilidad estructural del objeto de estudio.	
	Análisis de los resultados	55
3.1	Análisis de la incidencia de la dirección del viento en el valor de carga unitaria total.....	55
3.2	Análisis de la vulnerabilidad estructural de la torre RG-55.....	55
3.2.1	Análisis estático.....	55
3.2.2	Análisis dinámico.....	57
	Conclusiones del capítulo.....	59
	Conclusiones generales.....	60
	Recomendaciones.....	61
	Referencias bibliográficas	
	Anexos	

INTRODUCCIÓN

La telecomunicación es la herramienta más importante que tiene el hombre para su desarrollo. Su capacidad de comunicar de manera casi instantánea llevó las relaciones entre los seres humanos a otra dimensión tanto a nivel social como económico y político, sentando las bases para el surgimiento del mundo globalizado que conocemos hoy donde la información, el conocimiento y la creatividad son las nuevas materias primas de la economía

Para llevar a cabo esta revolución el hombre se apoyó en diferentes medios de transmisión; por un lado los medios guiados que son los que transmiten mediante un canal sólido (metales o vidrio) como es el caso de los cables coaxiales y la fibra óptica, y por otro los medios no guiados que a diferencia del anterior no utiliza un canal sólido sino que usa las variaciones del campo electromagnético como soporte para transmitir la información. Este medio de comunicación inalámbrica se conoce como radiocomunicación.

La radiocomunicación en específico es indispensable para el uso de la radio difusión, la televisión, la telefonía móvil, la comunicación entre radioaficionados e incluso la exploración espacial. Esta infraestructura tan básica en el contexto actual se compone de antenas que emiten y reciben señales de radio, las cuales se encuentran empotradas en torres de acero que le aportan la altura necesaria para realizar su función correctamente. Estas torres se caracterizan por ser muy esbeltas, con sistemas reticulados. Al usarse las celosías la estructura adopta una forma aerodinámica pues no cuenta con una superficie sólida, llana y de un tamaño que ofrezca gran resistencia al viento.

Existen dos tipos de torres: las autosoportadas y las atirantadas; las autosoportadas basan su rigidez en el peso propio de la estructura y en una adecuada cimentación mientras que las atirantadas se encuentran arriostradas mediante cables (vientos) en tres direcciones radiales a diferentes niveles de altura. Las torres más comunes utilizadas en el sistema nacional de radiodifusión son las autosoportadas de sección cuadrada con patas ligeramente inclinadas y las atirantadas de sección triangular,

constante en altura. La forma y tamaño de estas torres varía en dependencia del uso que se le dará y de las particularidades de la zona donde se ubicará la misma. Generalmente la altura de las torres oscila entre los 15 y 55m, aunque pueden sobrepasar los 300m. Estas torres deben asumir la responsabilidad de mantener un correcto estado técnico pues de ellas depende en gran medida el funcionamiento del sistema de telecomunicación nacional, y por ende el desarrollo de nuestro país.

En los últimos años se han producido numerosas pérdidas de torres en el territorio nacional tanto de comunicaciones como de tendido eléctrico. Son diversas las causas que han provocado la destrucción de estas estructuras pero las principales son los defectos de fábrica, la mala ejecución en el montaje de las piezas, la falta de un mantenimiento periódico y la más desfavorable por sus efectos devastadores son los vientos extremos asociados a eventos hidrometeorológicos, que por sí solos o en conjunto con las anteriores deficiencias ponen en serio peligro la seguridad estructural de la torre.

La región Atlántico Norte es una de las más afectadas a nivel mundial en cuanto a ciclones tropicales. La formación de ciclones tropicales en esta región varía ampliamente de un año a otro, oscilando entre 1 y 20, promediando históricamente 10 ciclones por año; destaca de manera negativa el año 2005 en el cual se llegó a la cifra record de 28 ciclones tropicales formados. La región Atlántico Norte comprende las zonas del océano Atlántico, el Golfo de México y especialmente el Mar Caribe, donde se encuentra el archipiélago cubano.

El territorio cubano está considerado en la región del Caribe como uno de los países más amenazados por los ciclones. Desde inicios del nuevo milenio la zona oriental de Cuba se ha visto azotada por un número considerable de huracanes que han provocado importantes pérdidas materiales relacionadas con la destrucción parcial o total de las edificaciones y sistemas estructurales. Las torres de comunicación no permanecen ajenas a los efectos de estos fenómenos naturales. La destrucción de estas estructuras se produce principalmente por los vientos sostenidos y las ráfagas que golpean sobre ellas, en presencia de un huracán de gran categoría. Por lo tanto

es fundamental conocer las características de los vientos que se producen durante un fenómeno de este tipo para conocer el nivel de vulnerabilidad de las torres.

Los huracanes que afectan a Cuba, y en especial a la región oriental en los últimos años han tenido vientos sostenidos que superan los 140 km/h y rachas de más de 200 km/h. La norma cubana NC 285:2003 de carga de viento considera como viento extremo en la región oriental, un valor de presión básica de $0,9 \text{ kn/m}^2$ perteneciente a velocidades de 137 km/h. Esta información demuestra que la NC 285:2003 de carga de viento está diseñada para valores de velocidad de viento que no se corresponden con los obtenidos de los fenómenos meteorológicos que han afectado a la región, y por lo tanto las torres existentes no se cuenta con un procedimiento exacto que permita analizar sus vulnerabilidades.

Cabe destacar que de las torres utilizadas por el sistema cubano de telecomunicaciones, la gran mayoría son importadas (Argentina, Canadá, Guatemala, España, México, etc...); muchas de estas torres no cumplen los requisitos de presión y resistencia al viento para resistir el paso de un huracán; debido en parte a que los países donde fueron construidas no tienen las mismas características climatológicas que nuestra isla caribeña.

Lo expuesto anteriormente demuestra que los fallos estructurales que han provocado afectaciones en las torres son un claro ejemplo de un incorrecto análisis de los valores de velocidad y presión del viento y su consideración en el sistema de cargas aplicadas sobre la estructura para su diseño. De este modo la valoración teórica y los resultados del estudio fáctico realizado hasta este momento permiten exponer la contradicción existente entre las vulnerabilidades estructurales y el nivel de resistencia de la torre antes vientos extremos para enfrentar exitosamente las exigencias de un huracán sin comprometer el buen funcionamiento de las antenas como su principal objetivo.

Problema de la investigación:

Necesidad de analizar el comportamiento estructural ante vientos extremos de la torre atirantada RG – 55 para definir el grado de vulnerabilidad de las mismas.

Objeto de la investigación: Torre atirantada RG-55.

Campo de acción: Vulnerabilidad estructural ante la acción de vientos extremos.

Objetivo General: Analizar la vulnerabilidad estructural de la torre atirantada RG-55 ante la acción de vientos extremos.

Objetivos específicos:

- 1- Estudiar las características y los métodos de análisis de las torres de acero atirantadas.
- 2- Realizar la modelación de la torre de acero RG-55, aplicando los valores de carga de viento en condiciones extremas de huracán, mediante el software especializado (SAP 2000 v-15).
- 3- Analizar los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los métodos de cálculos.

Hipótesis:

Si se efectúa un análisis estático y dinámico ante la acción de vientos extremos a la torre atirantada RG-55 se puede determinar la vulnerabilidad estructural de la misma.

Variable independiente: Análisis estático y dinámico de la torre atirantada RG-55 ante la acción de vientos extremos.

Variable dependiente: Vulnerabilidad estructural de la torre.

Métodos de la investigación

- Métodos Teóricos:
 - Histórico–Lógico: Para realizar un análisis histórico de las torres de acero utilizadas para soportar antenas de radio así como de los huracanes que las han afectado.

- Análisis y Síntesis: Para el análisis de la información procedente de la caracterización histórica, teórica, metodológica y empírica tanto de las torres como de los huracanes.
- Modelación: Para modelar el objeto analizado mediante una herramienta informática.
- Método Empírico
- Análisis documental: Para la búsqueda e 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.

La novedad de esta investigación radica en la obtención de un comportamiento estructural más de la torre de acero RG-55 atirantada para la obtención del grado de vulnerabilidad estructural, considerando aspectos y procedimientos que hoy en Cuba no son contemplados en las normas para el diseño de nuevas torres o la revisión de aquellas que son importadas, sirviendo como base además para la realización de otros análisis.

La actualidad del tema está dada por la correspondencia con las líneas de investigación que lleva a cabo el departamento de Construcciones, especialidad estructura: Vulnerabilidad ante vientos extremos en la región oriental. Por otro lado este estudio responde a una de las exigencias presentadas por la Unión Nacional de Electricidad (UNE).

Estructura del informe de la investigación: El informe de la investigación se estructura en tres capítulos. En el primer capítulo se muestran los resultados de la caracterización histórica, teórico–metodológica y empírica de las torres de celosías para telecomunicaciones, así como también el estudio de las principales causas de fallas. En el segundo capítulo se fundamenta teóricamente la concepción de metodología que se asume, las características de la metodología elaborada y las concepciones para la modelación del objeto en el software SAP 2000 V-15. Los resultados de dicha modelación son analizados en el tercer capítulo, en el que

además se detalla las particularidades del desempeño estructural en cuanto a resistencia y deformación.

CAPÍTULO 1: CONCEPTUALIZACIÓN DE LAS TORRES DE TELECOMUNICACIONES ATIRANTADAS Y LOS MÉTODOS PARA SU CÁLCULO.

1.1 Generalidades.

Para que las torres sean seguras, estas deben ser objeto de un análisis minucioso que desvele cuáles son sus principales vulnerabilidades para luego tomar medidas encaminadas a su mitigación. Para realizar un correcto análisis de las torres de acero se debe conocer las características generales de las mismas (tipología, funciones, características geométricas y mecánicas).

Luego se deben conocer los factores que pueden provocar fallas en la estructura (en este caso los vientos extremos) y las características de estos. Para aplicar una metodología de análisis de las torres de acero, es necesario hacer una revisión actualizada de las normas y estudios realizados con respecto a este tema, a partir de este estudio se seleccionará la metodología más idónea para analizar el objeto.

El siguiente trabajo exige el uso de un sistema de cómputo que permita modelar la torre que se va a analizar, y que además arroje datos estructurales de una manera más simplificada; por lo tanto se debe realizar una correcta selección del mismo. El gran volumen de 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.

1.2 Surgimiento y evolución de las torres de telecomunicaciones.

Una torre de celosía es una estructura formada por elementos lineales unidos entre sí por sus extremos logrando un arreglo espacial en forma de reticulado cinemáticamente invariable. Este tipo de construcción ofrece gran resistencia con poco consumo de material y por su permeabilidad reduce las fuerzas del viento que son generadas sobre la estructura. [2]

A lo largo de la historia el hombre ha construido estructuras tipo celosías cada vez más esbeltas, ya sea para fines militares o civiles. Gran parte del desarrollo alcanzado por la humanidad es debido al papel que han jugado las torres. Las

mismas en sus inicios fueron construidas de madera, lo que suponía una limitación por las características del material y las tecnologías disponibles en la época. Fue entonces que surgió el acero con la llegada de la Revolución Industrial en el siglo XVIII, un material que suponía una ventaja con respecto a la madera debido a la alta capacidad portante bajo estados de tracción, compresión, flexión. [2]

Las torres autosportadas fueron las primeras utilizadas para la colocación de cables de telefonía, cuando las telecomunicaciones daban sus primeros pasos. Estas eran de madera y sus secciones transversales eran variadas, llegando a tener algunas torres hasta ocho lados. [2]

En 1836, aparece el perfil “doble T” que inicia el auge de la producción estandarizada de piezas de acero. A partir de este momento el acero relegó a la madera a un segundo plano y revolucionó la industria de la construcción creando las bases de la fabricación de piezas en serie. [2]

Una de las obras más significativas del siglo XIX es la torre Eiffel, símbolo emblemático de París, de Francia y del mundo. Esta maravilla tan reconocida y admirada en la actualidad, fue rechazada en sus inicios por los parisinos, quienes deseaban su demolición. Esto hubiese ocurrido de no ser por las Fuerzas Armadas que reconocieron el valor utilitario de la torre como soporte de antenas para transmisión de radio. De esta manera la torre Eiffel se convierte en una de las primeras torres para comunicaciones en todo el mundo. [2]

Con el surgimiento de la televisión y el desarrollo de la radio, las torres de celosía para telecomunicaciones adquirieron mayor uso y se diseminaron por todo el planeta. En los últimos años, con el auge de la telefonía celular, han incrementado su uso como soporte de antenas para comunicaciones inalámbricas. [2]

1.2.1 Antecedentes históricos del estudio del comportamiento estructural de las torres atirantadas.

El campo de las telecomunicaciones se encuentra en una constante evolución tecnológica, las antenas que se utilizaban hace más de medio siglo cuando nació la televisión difieren en términos geométricos, de masa y funcionalidad con respecto a las que se utilizan al día de hoy. Las torres de acero por su papel vital en el soporte

de tan importantes equipos, necesitan un adecuado diseño que disminuya el nivel de incertidumbre que existe con respecto a la seguridad estructural de estas. Al igual que los equipos de radiodifusión, las torres también han evolucionado, como también lo han hecho los métodos de cálculo y la precisión en las herramientas para su estudio. A continuación se explica la evolución en el estudio del comportamiento estático y dinámico de las torres atirantadas, tan necesario para el análisis estructural de estas estructuras.

El estudio del comportamiento estático de las torres atirantadas se remontan a los años 50, cuando Cohen y Perrin (1957)[3,4], considerados pioneros en este tipo de investigaciones, realizaron un análisis estático utilizando el modelo viga-columna sobre apoyos elásticos formados por cables que seguían un perfil parabólico. Rowe (1958)[5] analizó el efecto de los cambios de geometría de la torre en los valores de fuerzas internas y desplazamientos de la misma. A mediados de la década de los 60 Goldberg y Meyers (1965)[6] estudiaron el efecto del viento sobre los cables (vientos). Esta investigación arrojó resultados notablemente diferentes en los valores de las tensiones en los cables, los desplazamientos en la torre y los valores de momento y cortante, cuando se tomaba o no en cuenta la consideración antes mencionada. Shears y Clough (1968)[7,8] analizaron el comportamiento estático de los mástiles de las torres atirantadas, para ello consideraron la idealización por elementos finitos de una torre atirantada con los cables parabólicos y modelo de viga equivalente para el cuerpo de la torre.

Mediante un proceso iterativo obtuvieron la respuesta estática no lineal de la estructura. Raman y Kumar (1988) [9] publicaron un estudio del comportamiento de los desplazamientos en torres atirantadas utilizando igualmente elementos finitos. Kalha (1995)[10,11] utilizó el concepto de viga equivalente para el análisis no lineal geométrico de una torre atirantada, además introdujo propiedades de la viga-columna equivalente para varios tipos de secciones triangulares, comparando los resultados obtenidos con el modelo espacial de armadura real. Esta comparación demostró que ambos modelos arrojaban resultados similares en cuánto a momentos

y cortantes en el conjunto viga-columna, tensión en los cables y desplazamientos en la dirección del viento.

Wahba, Madugula y Monforton (1998)[12] analizaron dos modelos diferentes de elementos finitos para torres atirantadas; enfocándose en las tensiones en los cables, fuerza axial en los miembros, desplazamientos y rotaciones del mástil. Para el primer modelo utilizaron elementos tridimensionales de armadura para modelar el mástil de la torre y elementos no lineales para los cables. En el segundo se utilizó la viga-columna equivalente y también elementos no lineales para los cables. Los resultados de la comparación validaron las conclusiones de estudios previos de Kalha y demostró la respuesta no lineal geométrica de estas estructuras frente a las cargas de viento.

El efecto fluctuante del viento sobre las torres atirantadas y la respuesta dinámica de estas fue un tema de gran interés para los investigadores a partir de la segunda mitad del siglo XX. Los primeros estudios acerca de esta temática fueron realizados por Davenport (1967) [13], quien propuso el uso de un factor de ráfaga que permitía estimar la respuesta estructural frente al viento. Davenport declaró que los desplazamientos máximos debido al viento podían ser determinados multiplicando el promedio de los desplazamientos estáticos por el factor ráfaga dependiente de las características espectrales de la velocidad del viento, de la frecuencia natural de la estructura y del primer modo de oscilación.

En las décadas de los 70 y 80 los estudiosos siguieron dos líneas de investigación: unos siguieron el modelo propuesto por Davenport como fueron los casos de Vellozzi y Cohen (1968)[14] y Simiu (1976)[15], los primeros introdujeron mejoras sobre el factor de ráfaga perfeccionando la modelación aerodinámica del viento, mientras que el segundo determinó los efectos de la carga de viento por medio de diferentes funciones. Solari (1983) [16], (1988) [17] desarrolla la técnica de espectro equivalente del viento, que permitía determinar tanto el comportamiento dinámico ante el viento, como la respuesta sísmica de la estructura.

Holmes (1996) [18] basado en estos conceptos, introdujo una nueva definición del factor de ráfaga. A la par desarrolló la técnica tridireccional de factor de ráfaga generalizando el método de Davenport unidireccional en respuestas tridimensionales. Según esta técnica la fuerza estática equivalente se determina por medio de una distribución general de la carga multiplicada por tres factores no dimensionales y constantes según la dirección de la respuesta: lineal, transversal o torsional.

Davenport y Sparling (1992) [19] se basan en los trabajos de Cohen y Perrin (1957) [3,4] y del propio Davenport y Gerstoft (1986) [20] desarrollaron un método simplificado (Patch load) para determinar la respuesta dinámica de las torres atirantadas frente a vientos turbulentos, empleando una serie de combinaciones de carga y factores de escala para modelar el efecto del viento sobre la torre atirantada. Este método tiene en cuenta las particularidades de la respuesta dinámica de las torres atirantadas.

Los estudios realizados por Smith (2007) [21] mediante el análisis de varias torres validan la confiabilidad de este modelo, por lo que ha sido adoptado por varias normas relacionadas con torres atirantadas y recomendado por la IASS para el análisis de estas estructuras. A partir de la década de los 90, el estudio de las torres atirantadas se concentró en la respuesta dinámica a partir de la presencia de puntos de inversión en la forma del primer modo de oscilación, el comportamiento no lineal de estas estructuras y la interrelación entre cables y estructura.

Los cables(vientos) es un elemento de especial importancia a la hora de analizar la respuesta estructural de las torres atirantadas, pues de los estados de tensión y distensión que adquieren bajo la acción de las cargas de viento depende en gran medida el grado de hiperestaticidad del conjunto frente a la acción de fuerzas laterales. El primer método utilizado para modelar los cables de una torre atirantada fue sustituirlos en cada nivel por apoyos elásticos, ver Figura 1.1.

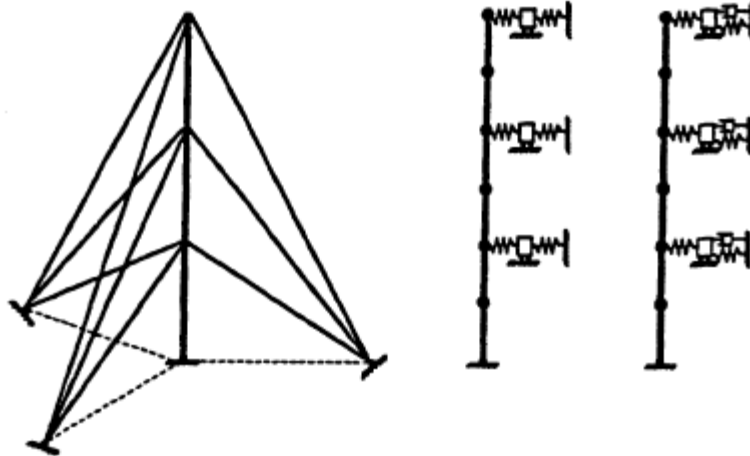


Fig. 1.1 Modelos simplificados de cables como apoyos elásticos con rigidez horizontal equivalente.

Fuente: Monografía Metodología de cálculo para torres atirantadas.

Con el tiempo se incorporaron modelos de representación por medios de barras rectas, donde la rigidez era calculada a través de un módulo equivalente o módulo de Ernst, él tiene en cuenta la variación de rigidez horizontal debido a la flecha. Este método es muy utilizado en torres atirantadas en las cuáles sus cables se encuentran sometidos a gran tensión. En los últimos años, utilizando el método de los elementos finitos, se ha logrado calcular analíticamente la deformada del cable bajo fuerza de tesado y peso propio. Esta deformada puede ser modelada por una serie de elementos pequeños rectos con capacidad nula a compresión, que permiten una mejor simulación del problema. [21]

Recientemente los estudios sobre torres atirantadas (incluyendo la norma NC 285:2003) aplican 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 [21-24].

1.3 Características generales de las torres de comunicaciones atirantadas.

Las torres atirantadas se estabilizan mediante cables anclados a una cierta distancia de la base. Esta distancia generalmente equivale a la longitud entre el 70 y el 80% de la altura de la torre[25], aunque existen diseños de torres atirantadas que solo necesitan un área que permita inscribir una circunferencia de radio aproximadamente

igual a la mitad de la altura de la torre. En el caso de las torres de sección triangular sus anclas deben estar colocadas a 120° unas de otras con respecto al eje de la torre para exista una distribución uniforme de las tensiones en los cables. De no ser así, una de las anclas debe estar colocada de forma tal que, que la línea formada entre ella y el eje de la torre sea una bisectriz con respecto al ángulo formado entre las anclas restantes. [25]

Las torres pueden ser de distintas secciones transversales. Las más utilizadas para las atirantadas son las triangulares, cuadradas y rectangulares. La utilización de cada una está en dependencia del consumo de material y del comportamiento a torsión. [2]

Los elementos que componen las torres pueden ser perfiles laminares (angulares de alas iguales o desiguales), tubos y mixtas. La unión entre los elementos se realiza mediante pernos y planchuelas o directamente entre perfiles con pernos. En el caso de que los elementos componentes sean de perfil tubular, las uniones generalmente son soldadas.

1.3.1 Ventajas y desventajas de las torres atirantadas.

Las torres atirantadas tienen el inconveniente de necesitar mucho terreno alrededor de ellas para el anclaje de sus cables. En cambio, permiten mayor economía con respecto a las autosoportadas, en términos de costos de producción, montaje y cimentación. Además, la diferencia entre los costos de ambas tipologías crece de forma proporcional con la altura de la estructura. El análisis de las torres atirantadas se complejiza debido a la influencia de los cables en el comportamiento estructural de la torre.

La mayor ventaja del uso de las torres atirantadas por sobre las autosoportadas consiste en que la primera es más liviana y por lo tanto no necesita de una cimentación tan profunda, dos aspectos que repercuten de manera positiva en el costo de la estructura. Sin embargo el modo de elección del tipo de torre a emplear no está condicionado solamente por el tema económico sino por el terreno disponible para edificarla. Como se explicaba anteriormente las torres atirantadas necesitan de un área más extensa que las autosoportadas que requieren un terreno cuadrado

cuyos lados tengan una longitud aproximada entre el 8 y 20% de la altura de la torre, por lo que su selección es determinada por las condiciones topográficas del lugar de erección de la torre.

1.3.2 Características de los materiales utilizados en las torres de atirantadas.

Las torres de celosía están compuestas generalmente por dos tipos de aceros, el A36 ATSM y el de tipo A572 ATSM, de grado 50 o equivalente. El A36 es acero estructural al carbón y el A572 es acero de alta resistencia y baja aleación de niobio y vanadio. Debido a los esfuerzos para los que se diseñan las torres de celosía, el acero a emplear debe ser de bajo contenido de carbón, con tensiones deformaciones entre 36 000 psi² (2531kg/cm²) y 60 000 psi² (4218 kg/cm²). El hormigón armado para cimentación generalmente es diseñado con una resistencia a los 28 días de 210 kg/cm².

Aunque no existe un diseño en la forma de los perfiles que sea considerado el más idóneo desde el punto de vista estructural, prácticamente todos los miembros estructurales de las torres son de perfil angular, laminados en caliente y deben ser galvanizados (A123,ASTM) por inmersión para que conseguir la máxima protección contra la corrosión. El espesor del galvanizado no debe ser a 0.086 mm (0.0034 pulg.). Los miembros de las torres de celosía deben estar atornillados y nunca soldados, de no ser así “las conexiones soldadas se deben lograr bajo condiciones controladas de fábrica y cada soldadura debe superar la resistencia de la pieza conectada” [26] Los tornillos deben ser de acero (A394 tipo 0 ó SAE grado 5, ASTM), llevar arandela plana, de presión y, preferiblemente, doble tuerca para evitar que la vibración causada por el viento llegue a aflojar los tornillos.

El material más utilizado para las riostras es el cable de acero galvanizado. En torres de radio (AM), o que estén cercanas a otras antenas de TV o FM, se utilizan generalmente materiales no conductores en las riostras, como son los cables de Kevlar o de fibra de vidrio. Cuando se emplean estos materiales, es necesario prestar especial atención a la protección contra la fatiga mecánica y deterioro por exposición a luz ultravioleta. Desde el punto de vista estructural es necesario analizar las características de elongación bajo condiciones de carga y atender cuidadosamente a las recomendaciones para su manejo.

Las conexiones para la sujeción de las riostras son tan importantes como el propio material de éstas. Entre las juntas más usadas están los zócalos de acero forjado o moldeado, galvanizados por inmersión o tratados con resinas epóxicas que soporten todo el esfuerzo de la riostra. Se prueban en fábrica a una carga del 50% de la tensión de ruptura de la riostra. Este tipo de junta es más común para las riostras más largas en torres altas. Otro tipo de juntas muy utilizadas son los perros o mordazas, en forma de silla de montar, para sujetar los extremos de las riostras, una vez que éstas han sido tensadas al 90% del esfuerzo que deben soportar. [25]

1.3.3 Forma y dimensiones de las torres atirantadas.

Existe una gran variedad de secciones de torres, pero las más populares y utilizadas por su funcionalidad y facilidad de construcción, son las torres de sección triangular y las de sección cuadrada. En este trabajo se realizará el análisis estructural de una torre de sección triangular. [2]

Las torres de sección cuadrada según su diseño, puede ser de sección constante, de forma piramidal o mixta, que son las torres que en sus primeros niveles tienen secciones piramidales que reducen su área conforme aumenta los niveles para finalizar con sección constante. [2]

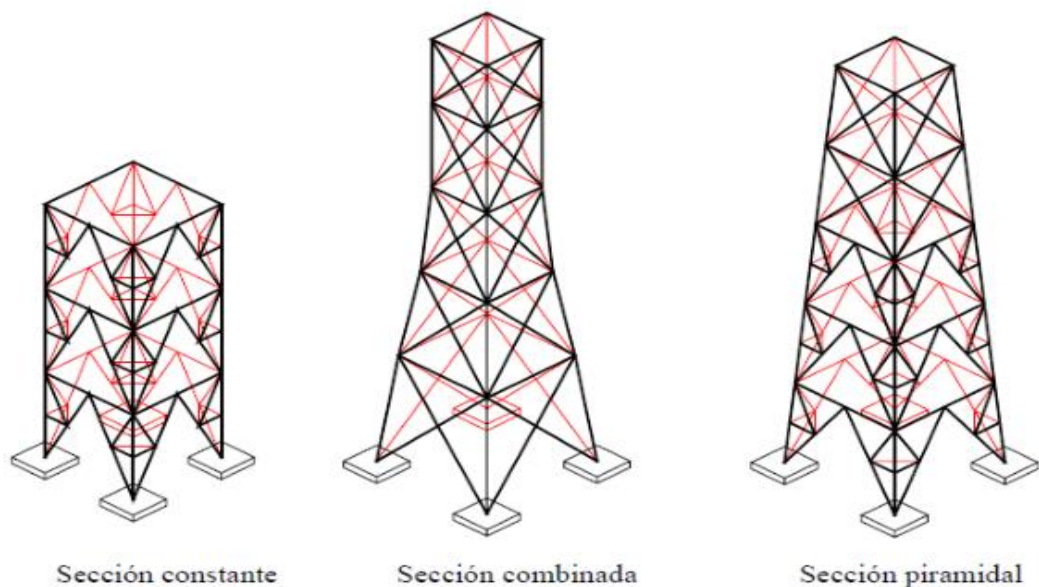


Fig. 1.2 Secciones transversales del fuste de torres.

(Fuente: Tesis Edgar Eloy Rodríguez Reinoso.)

Este tipo de torre es utilizada cuando se requiere la colocación de un número considerable de antenas, ya que al contar con cuatro caras, su área disponible para la ubicación de equipos es mayor. Sin embargo tiene la desventaja de ser más costosa, pues el volumen de acero necesario para la fabricación de la misma es elevado, lo que aumenta su peso y costo. [2]

Los elementos que conforman las torres de sección cuadrada generalmente son angulares de lados iguales, ya que por ser un cuadrado es práctica la utilización de este tipo de perfil. La construcción y montaje de este tipo de torre es relativamente complejo, debido a la gran cantidad de empalmes que posee, lo que prolonga el tiempo de construcción y montaje de la misma. [2]

Al igual que las torres de sección cuadrada, las torres de sección triangular pueden ser de sección constante, de forma piramidal o pueden tener una proyección piramidal en las primeras secciones y constante en las últimas. [2]

En la actualidad, las torres de sección triangular son las más demandadas, debido a que cuentan con el área suficiente para la colocación de antenas en solo tres caras. A diferencia de las de sección cuadrada, este tipo de torre es más económica, ya que poseen solo tres caras, lo que las hace más liviana debido al menor volumen de acero, y de esta manera el área superficial para pintarla y galvanizarla es menor.

Por lo general, las torres de sección triangular están compuestas por elementos de secciones tubulares y angulares, para la colocación de los equipos y de las diagonales respectivamente. Para la construcción y montaje de este tipo de torre se necesita la misma cantidad de personal que en el caso de las torres de sección cuadrada, con la diferencia que esta fase se realiza en menos tiempo. [2]

1.3.4 Clasificación de los elementos que componen las torres.

La fuerza provocada por la presión del viento es aplicada para efectos de análisis en los nudos de la estructura, actuando en ellos mismos las fuerzas de reacción interna. Dichas fuerzas son absorbidas por los elementos estructurales que conforman dicha torre, estos son las columnas, elementos principales o esquineros, y las diagonales y tranques como elementos secundarios o de celosía.

1.3.4.1 Elementos principales.

Las columnas o montantes, son las estructuras encargadas de transmitir los esfuerzos recibidos hacia la base. Por su forma, pueden clasificarse en dos tipos: de sección circular y angular. La selección de cada uno puede condicionarse por diferentes factores. Según Rodríguez (2015) [2], el desempeño estructural de una torre de elementos circulares en las esquinas mejora al desempeño de la propia torre con elementos angulares. Además, afirma que es “más económico colocar elementos esquineros en una torre autosoportada”. No obstante, la práctica indica que es más conveniente construir las torres con elementos angulares, ya la superficie del perfil facilita la fijación de los tranques y diagonales a las columnas.

1.3.4.2 Elementos secundarios.

Los esfuerzos de la carga de viento sobre las torres de telecomunicación pueden provocar movimientos oscilatorios que perjudiquen la calidad de trabajo de los sistemas de comunicación. Para contrarrestar este fenómeno, se utilizan las diagonales, cuyo objetivo es proporcionar suficiente rigidez a la torre.

Las diagonales son elementos que teóricamente no soportan cargas muertas ajenas a su propio peso, ni cargas vivas que no sean las causadas por el viento. Estas se encargan de soportar los esfuerzos axiales, a compresión y a tensión, provocados por la acción de fuerzas externas. También deben ser capaces de resistir la carga perpendicular ejercida por el viento. [2]

Los perfiles más utilizados como diagonales son los de sección circular o redonda, y los angulares. Los redondos como su nombre lo indica son tubos de sección circular con extremos planos, lo que representa un inconveniente en la elaboración de las juntas. Otra desventaja es la dificultad para fabricar los elementos con longitudes exactas, lo que a su vez complica la instalación de los mismos. Por su parte, los perfiles angulares son más fáciles de fabricar y ensamblar en obra, por lo que se garantiza una mayor rigidez estructural. Por lo tanto es aconsejable utilizar perfiles angulares en los tranques y diagonales. [2]

Específicamente, el diseño de las diagonales puede ser de tres tipos: diagonal simple, diagonal doble y diagonales auxiliares. El uso del embreizado de diagonal

simple tiene la ventaja de utilizar poco material, lo que repercute en el peso y el costo de la torre. Además el área de contacto con el viento es menor, lo que influye favorablemente en el efecto del viento sobre la estructura. [2]

Este tipo de embreizado es usado en torres de sección cuadrada de base pequeña y en torres atirantadas, ya que en estas las diagonales son de corta longitud, lo que favorece la resistencia a los esfuerzos de compresión, debido a que la esbeltez de los elementos es pequeña. En este trabajo se analiza una torre atirantada con diagonal simple. [2]

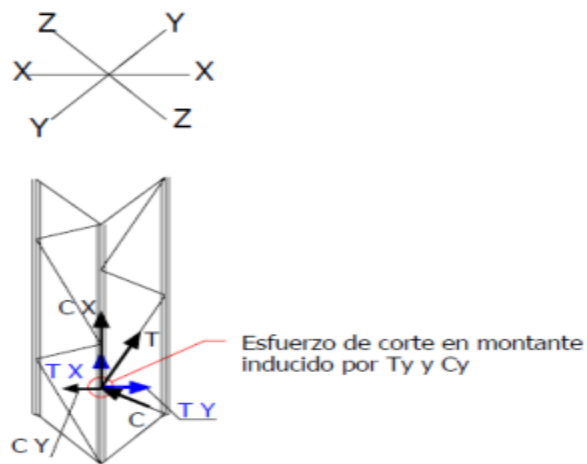


Fig. 1.3 Esfuerzos en diagonales simples
(Fuente: Tesis Edgar Eloy Rodríguez Reinoso.)

En la mayoría de los casos, las torres de telecomunicación utilizan diagonal doble. Esto se debe a que las torres de gran altura cuentan con una sección transversal grande, determinando que las diagonales se ubiquen en tramos largos, lo que incrementa su relación de esbeltez y su vulnerabilidad al pandeo por esfuerzos de compresión. Por lo tanto se necesario colocar una segunda diagonal en sentido opuesto, sujetándose en el punto de intersección entre las dos, para reducir dicho efecto. Además, al utilizar diagonales dobles, los esfuerzos aplicados a estos elementos se distribuyen en dos, trabajando una diagonal a compresión y otra a tracción simultáneamente. Las columnas de la torre se benefician también de esta disposición de las diagonales, pues como en los nudos concurren cuatro elementos,

dos trabajan a compresión y dos a tracción, logrando que los esfuerzos de corte en las columnas sean despreciables. [2]

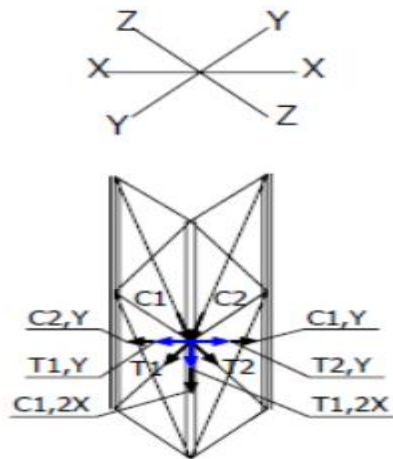
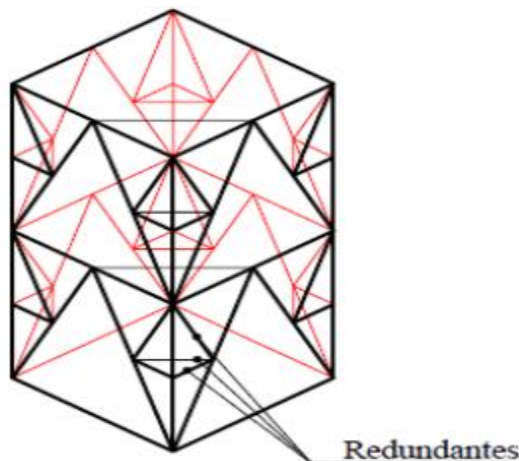


Fig. 1.4 Esfuerzos en diagonales simples.
(Fuente: Tesis Edgar Eloy Rodríguez Reinoso.)

Las torres de sección transversal muy grande, requieren el uso de diagonales muy largas. Si las dimensiones de las mismas están por encima del límite de esbeltez, es necesario aumentar el ancho y espesor de dichos miembros, lo que a su vez incrementa el peso del elemento y de la estructura, elevando el costo de la misma. Además, es posible que la pieza pueda pandearse debido a su peso propio. Una solución a estos problemas es la implementación de diagonales auxiliares o elementos redundantes. Estos elementos son colocados en el centro de las diagonales, para reducir la luz entre los apoyos de las mismas, y disminuir su relación de esbeltez. [2]



*Fig. 1.5 Diagonales auxiliares o elementos redundantes.
(Fuente: Tesis Edgar Eloy Rodríguez Reinoso.)*

1.3.4.3 Sistemas antitorsores.

Las torres de telecomunicación de gran altura que sufren la acción de fuertes vientos, no solo deben resistir los esfuerzos de compresión y tracción a las que normalmente son sometidas, sino que también pueden ser afectadas por momentos torsores. Para contrarrestar este fenómeno es necesario instalar sistemas antitorsores en las torres. Este sistema consiste en la colocación de diagonales auxiliares en el plano transversal de la torre. [2]

Los sistemas antitorsores son generalmente instalados en torres atirantadas de gran altura. Las mismas pueden contar con uno o varios sistemas ubicados a diferentes niveles de altura. En el caso de las torres de sección triangular, las diagonales deben formar una figura triangular, mientras que en la de sección cuadrada, una figura cuadrada. En todos los casos, los vértices de la figura formada por las diagonales auxiliares, deben estar ubicados a la mitad de la distancia entre las columnas que forman el fuste de la torre. Cada vértice tendrá amarrado dos cables, que irán arriostrados a los anclajes que corresponden a los vientos utilizados en las columnas que están a cada lado del vértice. [2]

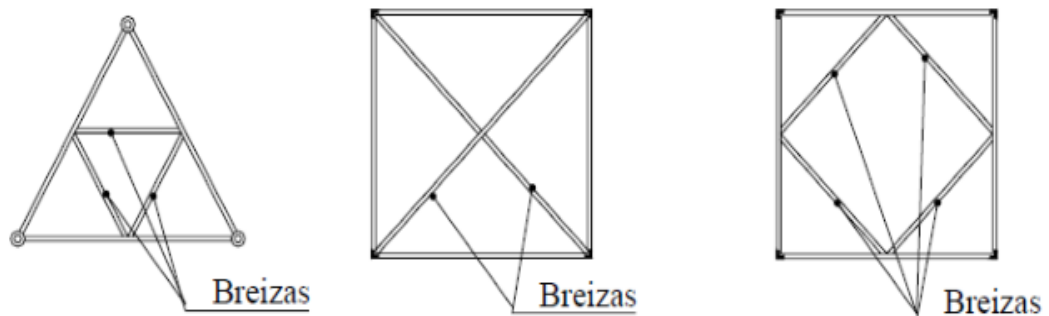
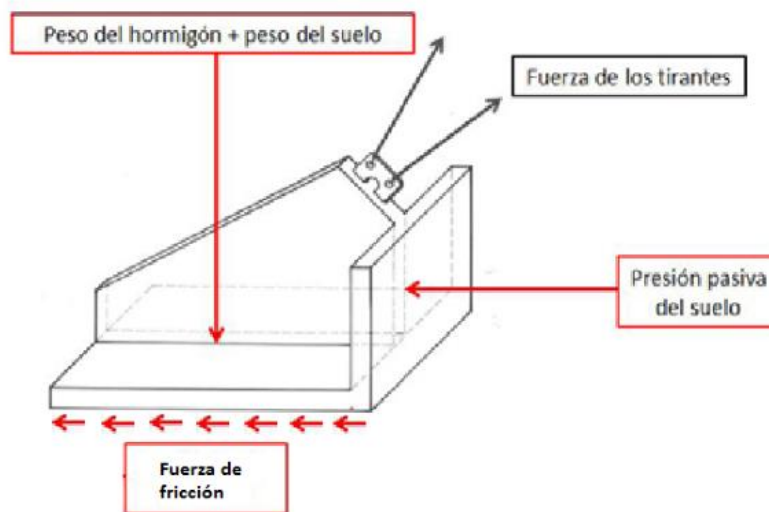


Fig. 1.6 Tipos de sistemas antitorsores.

(Fuente: Tesis Edgar Eloy Rodríguez Reinoso.)

1.3.5 Tipologías de anclajes empleados para la sujeción de los cables.

Los anclajes más utilizados a nivel mundial para la sujeción de los cables en torres atirantadas son los llamados tipo T. Este anclaje prefabricado está compuesto por tres losas de hormigón: losa horizontal o base, losa vertical y una tercera llamada “alma” alineada con los tirantes. En esta tipología, las fuerzas de tracción, transmitidas por los cables de la torre, son contrarrestadas por el peso de las losas y el suelo contenido sobre la base. Mientras que a la componente horizontal se le oponen la presión pasiva del suelo generada sobre la losa vertical. [27]



*Fig. 1.7 Forma de trabajo de los anclajes tipo T invertida.
(Fuente: Tesis Ingrid Fernández Lorenzo.)*

En Cuba, los anclajes más utilizados son los de tipo bloque, enterrados en el suelo. En estos anclajes, el peso propio del bloque de hormigón es el encargado de resistir las fuerzas de tracción que le solicita la superestructura. Este tipo de cimentación no es de las más eficientes ni económicas debido a su comportamiento geotécnico[27]. Muestra de ello fue el caso de la torre auto soportada HTV de la Loma de la Cruz, la cual se encontraba situada junto a la torre atirantada Holguín TV (objeto de esta investigación). La torre antes mencionada colapsó debido al fallo de su cimiento, compuesto por anclajes tipo bloque. (Ver imagen 1.8)



Figura 1.8 Anclaje tipo bloque de la torre fallada. (Foto tomada 31/03/17)

Fuente: Elaboración propia

1.3.6 Proceso constructivo y tecnológico.

El montaje de las torres reúne la ingeniería civil, la ingeniería mecánica estructural y el trabajo arriesgado de los montadores de torres. Cuando las bases de la torre están listas, comienza el trabajo de armado de un enorme rompecabezas de piezas gigantes y muy pesadas, que meticulosamente van uniéndose según el diseño y los planos. Cuando finaliza el proceso de montaje, la compañía contratante verifica según el diseño y los planos el resultado final. [28]

Una vez la torre está completamente montada y pintada, se continúa con la instalación de los equipos que la constituirán como un verdadero instrumento de las telecomunicaciones. Primero se empieza por la instalación de pararrayos, energía eléctrica y una luz de obstrucción (para cumplir con las exigencias de Aeronáutica Civil), luego por la colocación de los soportes y las antenas con sus respectivos cables y guías de onda. Estos equipos son instalados en su mayoría por personal técnico, y bajo su responsabilidad y conocimiento está lograr una adecuada instalación, evitando que las conexiones de las antenas queden ubicadas por debajo de las plataformas; de otra forma el personal de mantenimiento debería descolgarse por debajo de estas, arriesgando su propia integridad. [28]

La instalación de antenas se realiza normalmente muchas veces dependiendo de las necesidades de ampliación de la red; por tal motivo es necesario tener en cuenta la resistencia de la torre basados en su cálculo original; es posible que las áreas responsables adicionen enlaces sin tener en cuenta este aspecto y por efecto de las cargas de viento, la estabilidad de la torre podría estar al límite. [28]

La fase de mantenimiento se convertirá en la más común, con alta frecuencia de trabajos en altura por parte del personal encargado de la compañía o de empresas contratistas. Los trabajos son varios y van desde mantenimiento de las luces de obstrucción, de las puestas a tierra, hasta mantenimiento y cambio de antenas. Algunos trabajos en las torres van desde el inventario de equipos en donde empresas asignan a ingenieros o técnicos para llegar hasta las antenas y revisar seriales y anotar datos específicos. Cuando la torre tiene algún tiempo de construida se realizan mantenimientos en su estructura que van desde el cambio de partes hasta el pelado y posterior pintura. [28]

1.4 Principales fallas de las torres atirantadas de telecomunicaciones.

En el caso de las torres atirantadas, el factor determinante en el fallo o no de la misma, es el comportamiento de los cables que resisten esfuerzos de tracción y de cortante por la influencia del viento. Una ruptura en los cables puede dañar irremediablemente a la estructura, mientras que un mal funcionamiento de los cables que conduzcan a largos períodos de oscilación, pueden producir el fallo de los propios cables o de los elementos estructurales debido al estado de fatiga de los materiales.

Por otro lado, las causas que determinan el fallo estructural de una torre son las siguientes:

1. Errores de diseño.
2. Errores de construcción.
3. Fatiga.
4. Falta de mantenimiento.
5. Fractura de los materiales.
6. Daño accidental.

7. Accion de cargas accidentales , sismos y vientos.

1.4.1 Principales afectaciones provocadas por eventos hidrometeorológicos en el campo de las telecomunicaciones, en la provincia de Holguín.

El huracán Ike ha sido en los últimos años el fenómeno meteorológico más devastador en cuanto a afectaciones al sector de las telecomunicaciones se refiere. A continuación se presenta los daños en los municipios más afectados en cuanto a servicios de telecomunicación:

MUNICIPIO RAFAEL FREYRE:

1. Pérdida de la torre del centro de telecomunicaciones de Rafael Freyre.
2. Afectaciones de la torre Diputada aislando las comunicaciones con Banes y Antillas.
3. Se encuentran afectados más de 2500 servicios.

MUNICIPIO HOLGUIN:

1. Pérdida de torre de Loma de la Cruz HTV afectando la cadena nacional de radio, cadena de microondas, los enlaces digitales con Banes, Freyre y Gibara y servicios beeper y de trunking.
2. Pérdida parcial (torreta) de la torre ubicada en la Dirección Territorial afectando el servicio móvil en el municipio Holguín y servicio de los 714 FAO instalados.
3. 12 radio bases afectadas (Aguada la Piedra, Pesquero, Río de Mares, Freyre, Yaguajay, Flora, San Francisco, Gibara, Banes, Diputada, Holguín TV y Gerencia Holguín.
4. Pérdida de señal de televisión por incidencia de la caída de torre Loma de la Cruz.
5. Caída de la torre Radio Reloj y emisora provincial.
6. Afectaciones al 100 % de los servicios del correo de Cuba.

MUNICIPIO MAYARI:

1. Afectaciones en las líneas de Guatemala, Felton, Nicaro y Guaro lo que nos mantiene incomunicado con estas localidades.

MUNICIPIO BAGUANO:

2. Afectada la torre de TV y comunicaciones de Diputada.

(Estos datos fueron suministrados por la Oficina de Gestión de Riesgos perteneciente al Gobierno Provincial.)

1.5 Particularidades del análisis y diseño de torres de acero utilizando sistemas profesionales de cómputo

Existen software que realizan el análisis y diseño de los elementos de las torres y recomiendan aspectos importantes para su construcción. En estos programas especializados, las torres se diseñan estructuralmente por computadora. Se realiza el análisis a partir de las cargas o árboles de carga que actúan sobre la torre en todas las direcciones. [30] El software incluye las cargas transversales, verticales, longitudinales y viento, que actúan sobre la estructura tipo celosía y revisa los perfiles que garantizan el diseño óptimo. También suministra las reacciones para el diseño de la cimentación en concreto.

El método de análisis de SAP2000 se basa en la teoría elemento finito, la cual básicamente es dividir el elemento en cuestión en partes pequeñas las cuales poseen las siguientes características:

1. Geometría: sistema de referencia.
2. Material: ley constitutiva.
3. Condiciones de frontera esenciales: apoyos.
4. Condiciones de frontera naturales: cargas.

Las características antes expuestas permiten construir el modelo, verificarlo gráficamente, realizar el análisis y el diseño, revisar los resultados, ordenar, buscar los datos para crear un reporte, y todo dentro del mismo ambiente gráfico. Contiene una extensa variedad de recursos para el diseño de miembros estructurales, así como componentes individuales dentro de una estructura. Los recursos con los que cuenta para el diseño de miembros, proporcionan la capacidad de llevar a cabo un gran número de operaciones de diseño diferentes. [27]

1.5.1 Métodos y análisis empleados en el contexto nacional.

Nuestro país cuenta con la norma de viento NC-285:2003, la cual sustituyó a la anterior NC 53-41:1990. En esta se realizó una revisión de la norma anterior, y se incluyó diversos coeficientes de forma que aumentaron de especificación de la norma. La misma ha tenido en cuenta elementos de la ISO 4354:1997 y la ASCE 7-98. No obstante, en nuestro país no se cuenta con una norma para el diseño y análisis de torres de telecomunicaciones, lo que limita el estudio de las torres y aumenta el riesgo de fallas estructurales.

Actualmente el Ministerio de la Informática y de las Comunicaciones lleva a cabo diferentes proyectos, con montos financieros considerables, que ayudarán a mejorar la infraestructura de las telecomunicaciones [27,31]

Un ejemplo es el Proyecto de Investigación y Desarrollo para el Programa Ramal de Telecomunicaciones que se realiza en colaboración con el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, sobre la vulnerabilidad estructural de las torres de telecomunicaciones, tanto de tipo atirantada como autosoportadas. Bajo este mismo marco se creó, formando parte de la facultad de Ingeniería Civil, el Grupo de Investigación de Torres de Telecomunicaciones: Vulnerabilidad estructural y bases para una normativa cubana, bajo la tutela de Dr. Ing. Vivian Elena Parnás, en el cual los especialistas integrantes han desarrollado distintas investigaciones que ayudan a mejorar y optimizar los diseños de torres de telecomunicaciones. La mayoría de los estudios que se están llevando a cabo en este momento se encuentran enfocados principalmente en la superestructura de las torres.

Conclusiones parciales.

1. Se caracterizó las torres de comunicación atirantadas en cuánto a sus ventajas, materiales utilizados para su construcción, forma, y elementos que la componen.
2. Se revisaron las principales causas de fallas en torres de comunicación, se muestran los daños que han provocado el efecto del viento en este tipo de estructura.
3. Se revisa la clasificación de los vientos huracanados y las características de los mismos en la provincia de Holguín. Se concluye que el territorio holguinero no es de los más afectados por fenómenos hidrometeorológicos, ya que los vientos máximos esperados para un período de retorno de 50 años en las zonas más críticas llegan a los 190 km/h (huracán categoría III). Por otro lado el municipio holguinero, zona donde se encuentra ubicada el objeto de estudio, los vientos máximos esperados para 50 años superan levemente los 170 km/h (huracán categoría II)
4. Se realizó una revisión bibliográfica de los estudios y métodos de análisis aplicados a las torres de comunicación atirantadas tanto en Cuba como a nivel internacional.

CAPÍTULO 2: MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE LA TORRE ATIRANTADA RG-55 MEDIANTE EL PROGRAMA SAAP 2000 V-15.

Introducción

En este capítulo se exponen las características y funciones del objeto que se analiza. Se describe el método estático empleado para el cálculo de la carga de viento según establece la norma cubana NC: 285:2003 “Metodología de cálculo de para la carga de viento”; así como también las especificaciones que se tuvieron en cuenta para la selección del método de análisis dinámico: Método simplificado Patch load o efecto de ráfaga de viento. En este apartado se detalla, además, las consideraciones generales para desarrollar la modelación de la torre con el empleo del programa SAP 2000 v-15.

2.1 Función y características del objeto de obra.

El objeto de análisis de este trabajo es una torre atirantada modelo RG-55, confeccionada por la empresa canadiense RADIANT. La misma cuenta con una sección triangular equilátera constante. Su estructura de celosía está conformada por columnas, diagonales y tranques que forman figuras triangulares. Todos los elementos componentes son de sección angular con alas iguales. Vale destacar el uso de diagonal simple en la torre.

El fuste tiene una altura de 132m, compuesto por 22 secciones de 6m cada una. Si contamos el mástil donde se encuentra empotrada la antena UHF, la altura total de la torre es de 143m. La sección transversal tiene dimensiones de 1,5x1,5x1,5m. Los tranques se encuentran espaciados a una distancia de 1,5m. Los perfiles utilizados son de 130x17x6000 mm para las columnas, en el caso de las diagonales son de 65x6x2050 mm y de los tranques 50x5x1400 mm. El acero utilizado es A572 ATSM, grado 50.

Las uniones son de tornillería galvanizada en todos los casos. En el caso de los tranques y diagonales es una unión simple con respecto a las columnas, mientras que la unión entre columnas es mediante empalmes con 6 tornillos.

La torre cuenta con seis niveles de cables distribuidos en la torre a alturas de 21m, 45m, 72m, 84m, 102m y 132m. Los cables de la cara norte tiene mayor longitud

porque esta se encuentra frente a una pendiente. Las dimensiones de los cables por nivel se muestran a continuación en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Dimensiones de los cables por niveles

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 está conformada 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 anclaje se encuentran arriostrados dos niveles de viento. Como la torre que se analiza se encuentra encima de una colina, sus anclajes no se encuentran al mismo nivel de terreno que la base de la torre, por lo que los desniveles de los anclajes para cada dirección son:

Tabla 2.2 Distancias de anclajes según ubicación.

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

La torre atirantada Holguín TV perteneciente a RADIOCUBA, presta diversos servicios al municipio y a la provincia de Holguín. Por ejemplo, la torre cuenta con la antena UHF, la cual transmite todos los canales de televisión para el municipio. Además contiene numerosas antenas tipo YAGUI para la emisión radial de ondas FM, por lo que todas las emisoras que emiten en esta frecuencia, depende del servicio prestado por estas antenas.

También la torre soporta una antena parabólica de 2,7m de diámetro, la cual sirve de enlace con el centro de telecomunicaciones de Gibara. Como se ha podido contactar las funciones que realiza la torre en cuestión como soporte de antenas que permiten la correcta transmisión y emisión de las señales radio televisivas y de telefonía móvil, son de alta importancia, lo que le confiere un carácter importante desde el punto de vista económico, político y social.

2.1.1 Diagnóstico del estado actual.

En el año 2015 la torre Holguín TV fue objeto de exhaustivas labores mantenimiento. La torre fue pintada completamente, los elementos que presentaban altos grados de corrosión se sustituyeron por otros nuevos, y en los que no fue así, fueron cepillados y pintados con óxidos rojo. Por lo tanto el estado actual de la torre es impecable, (Ver anexo 1 figura 1).

2.1.2 Acciones implementadas para el diagnóstico.

Para el diagnóstico de la torre, se hizo una revisión visual de la torre en su lugar de edificación, constatándose el excelente estado de conservación que muestra. Además, se tuvo en cuenta criterios de los trabajadores que operan el centro de telecomunicaciones de la Loma de la Cruz.

2.1.3 Análisis de los resultados.

La torre atirantada Holguín TV presta numerosos servicios de telecomunicación para el municipio y la provincia. La misma presenta un estado técnico excelente tras el mantenimiento recibido en el año 2015. Vale destacar que la torre presenta asimetría en los anclajes debido a los diferentes desniveles en los que se encuentran cada uno, además de que no existe uniformidad en la colocación de antenas ya que hay caras de la torres más cargadas que otras.

2.2 Metodología de cálculo para la carga de viento en la torre atirantada RG-55.

Para la determinación de las cargas de viento actuando en el conjunto objeto, se emplea la metodología de cálculo que se desarrolla la Norma Cubana NC: 285:2003. Aun cuando en la norma NC: 285:2003 se establece un mapa de zonificación eólica, definiendo una presión básica para cada región del país, el estudio que se muestra se realiza partiendo de las presiones básicas que se obtienen de las velocidades

medias para las categorías de huracanes 3,4 y 5 en la escala de Saffir Simpson. (Estas categorías son las que se consideran como eventos extremos)

2.2.1 Análisis estático basado en la NC: 285:2003. Análisis de la carga de viento en la zona oriental de Cuba.

- **Presión del viento.**

La presión básica sobre una superficie depende de la ubicación del elemento, de la región y topografía del lugar así como de la altura del nivel medio circundante. Cuando se tengan observaciones directas de las velocidades básicas del viento, se podrán calcular las presiones básicas características del viento. [22]

Las presiones básicas (q_{10}) se debe calcular por la siguiente fórmula:

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1.6 \cdot 10^3} \quad (2.1)$$

Donde:

q_{10} : presión básica característica del viento correspondiente a velocidades del aire en terrenos llanos y abiertos a una altura de 10m sobre el terreno, [kN/m²]

V_{10} : velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10m sobre el terreno, (m/s), 1,6 factor empírico.

- **Carga unitaria característica total (q)**

Carga unitaria característica total. Las cargas unitarias características totales por unidad de área (q) a considerar en los cálculos se determinan por la fórmula:

$$q = q_{10} * C_t * C_s * C_h * C_r * C_{ra} * C_f \quad (2.2)$$

Donde:

q_{10} : presión básica del viento, [kN/m²]

C_t : coeficiente de recurrencia

C_s : coeficiente de topografía o sitio

C_h : coeficiente de altura

C_r : coeficiente de ráfaga

Cra: coeficiente de reducción

Cf: coeficiente de forma

- **Coeficiente de recurrencia.(Ct)**

Según esta norma la velocidad del viento se toma con un período básico de recurrencia de 50 años para todas las estructuras permanentes y que además presenten características normales de sensibilidad al viento, importancia económica y duración. [22]

- **Coeficiente de topografía o de sitio (Cs)**

Este parámetro depende exclusivamente del lugar de ubicación de la estructura, si la misma se encuentra muy vulnerable a la acción de los vientos es un sitio expuesto ejemplo: faros y torres. Para elementos y proyectos típicos de uso múltiple y nacional se usará el coeficiente correspondiente a sitio normal; excepto en obras cuya ubicación normal es siempre en sitio expuesto. [22]

- **Coeficiente de altura (Ch)**

Para estructuras situadas en colinas como es el caso de la torre que se analiza, el incremento de la velocidad normativa del viento sobre colinas y acantilados es un aspecto importante a considerar. [12] Ver figura 2.1

El coeficiente de altura Ch en este caso es igual a su valor definido para el terreno llano de la categoría A multiplicado por un factor $(1 + \Delta Sz)^2$ donde ΔS es el factor de incremento de la velocidad normativa del viento. [22]

Cuando la estructura está cerca de la cresta y a una distancia no mayor que:

$|X| < k_{red}L_H$, el coeficiente de altura se modifica y queda como sigue:

$$Ch, mod = Ch \left[1 + \Delta Sz, max \left(1 - \frac{|x|}{k_{red}L_H} \right) \left(e^{-\left(\frac{az}{LH}\right)} \right) \right]^2 \quad (2.3)$$

Donde:

Ch: coeficiente de altura para un terreno llano (categoría A).

$\Delta Sz, max$: factor relativo de incremento de la velocidad en la cresta cerca de la superficie; [22]

a: coeficiente de decaimiento del incremento de la velocidad del viento con la altura.

X: distancia (corriente arriba o abajo del viento) medida desde la cresta hasta la fachada del edificio u obra en metros.

Z: altura sobre el nivel del terreno local en metros.

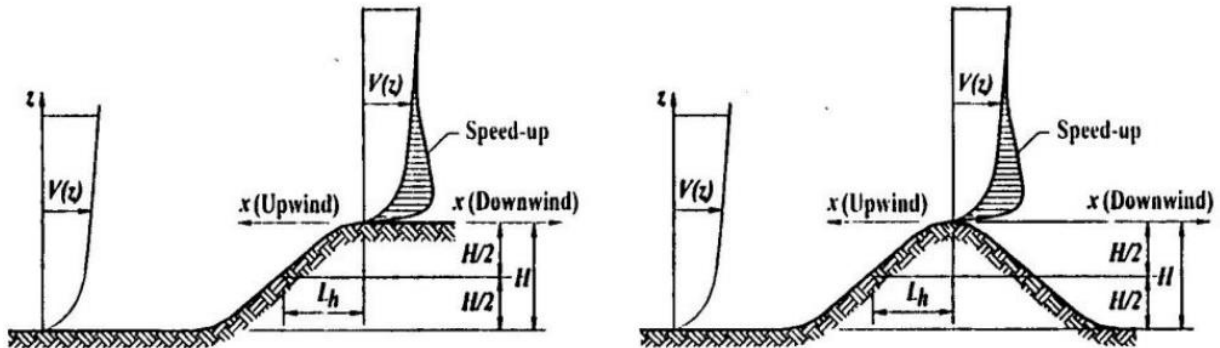


Figura 2.1 Coeficiente de altura para colinas y acantilados.

Fuente: NC:285:2003. Carga de viento. Método de cálculo

- **Coeficiente de ráfaga (C_r)**

Los coeficientes de ráfaga son empleados para tener en cuenta la naturaleza fluctuante de los vientos y su interacción con edificaciones y otras construcciones y está en función del tipo de terreno y la altura total de la estructura. [12] Su valor se determina según la Tabla 2.3, en función del tipo de terreno y para la altura total del edificio o estructura H. [22]

Tabla 2.3: Valores de coeficientes de ráfaga

Altura (m)	Tipos de terreno		
	A	B	C
< 10	1,22	1,46	1,90
10	1,18	1,36	1,72
20	1,14	1,28	1,54
30	1,12	1,24	1,44
40	1,10	1,21	1,38
50	1,09	1,18	1,32
60	1,08	1,17	1,30
70	1,07	1,15	1,27
80	1,06	1,14	1,24
90	1,06	1,13	1,22
100	1,05	1,12	1,21
110	1,04	1,11	1,19
120	1,03	1,10	1,18
130	1,02	1,09	1,17
140	1,01	1,08	1,15
150	1,00	1,07	1,14

- **Coefficiente de reducción por área expuesta:**

Las presiones del viento que actúan sobre los elementos constituyentes de una obra deben ser afectadas por un coeficiente de reducción en función de la mayor dimensión (horizontal o vertical) de la superficie o área que expuesta al viento actúa o transmite carga sobre el elemento considerado. La reducción solo se usará cuando la mayor dimensión señalada sea igual o mayor que 15m. [12] (Referirse a figura 2.2)

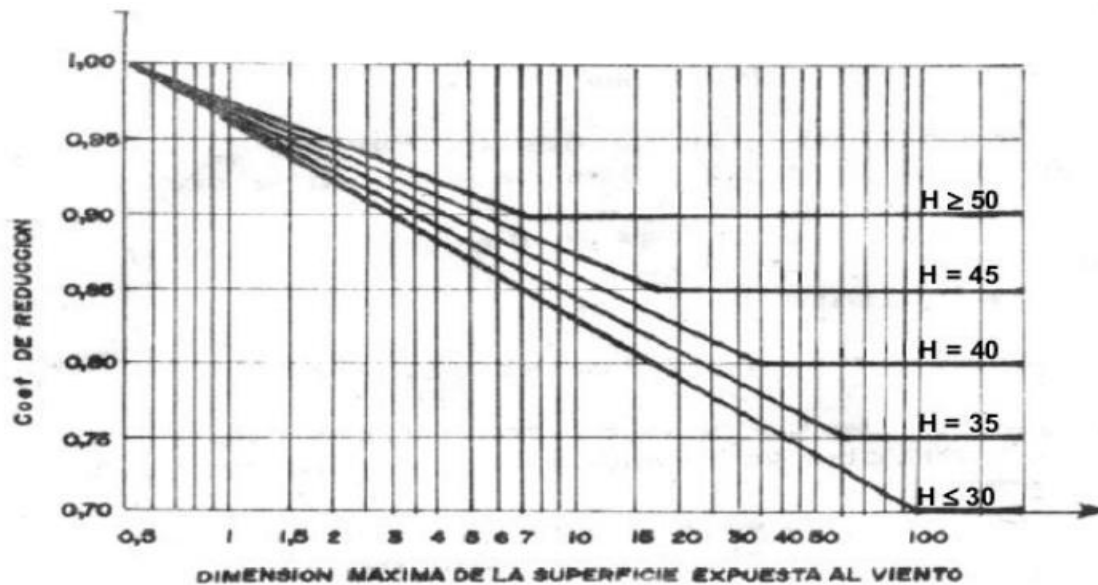


Figura 2.2. Coeficiente de reducción por área expuesta

Fuente: NC:285:2003. Carga de viento. Método de cálculo

- **Coefficientes de forma o aerodinámicos incluidas en el análisis de torres.**

Los coeficientes de forma para estos elementos estructurales tienen un campo de variación bastante amplio, pues estas estructuras están en su conjunto constituidas por la unión de elementos estructurales formando elementos con un por ciento generalmente altos de superficies vacías, por lo que es muy importante la relación área neta / área bruta, definida como el cociente de área proyectada de los elementos de un lado o cara de la estructura y el área bruta o contorno proyectado de dicho lado o cara. [22]

Las torres de celosía constituyen en realidad una estructura especial de igual forma que el estéreo-celosía; por su amplio uso en posición vertical, constituyendo objetos de obra de uso común y repetido, como antenas, soporte de torres, tranques y otros, por lo que es importante recalcar las particularidades y formas (secciones) más

comunes. [12] Según la NC285:2003 existen 4 casos para calcular estos coeficientes de acuerdo el elemento a analizar. Para torres de celosía el coeficiente de forma se obtiene por el cuarto caso.

Caso 4: El coeficiente de forma C_{fE} se calcula de la fórmula:

$$C_{fE} = C_f(1 + N) \quad (2.4)$$

Donde:

C_f coeficiente determinado según los datos del caso 2 de la Norma NC: 285: 2003.

$$C_f = \frac{\sum C_{fi} a_i}{A} \quad (2.5)$$

Donde:

a_i : área de proyección del elemento de la cercha sobre su plano (m^2).

C_{fi} : coeficiente de forma del elemento de la cercha, según los datos de la Tabla 10 y 11.

A : área bruta de la cercha, calculada según perímetro exterior, $A = L \cdot h$ (m^2).

N : coeficiente determinado según el caso 3 de la tabla 11.

El cual se determina en función de $\sum a_i / A$ y b/h

Para torres de tres bordes con $\sum a_i / A$ mayor o igual a 0,1 el coeficiente C_f se multiplica por 0,9.

Al calcular C_{fE} los valores de C_f se determinan, en todos los casos, suponiendo que la dirección del viento es perpendicular al plano del borde frente al viento de la cercha (torre). [36]

- **Área Neta**

A la carga unitaria total (q) se le multiplicará el valor del área neta correspondiente al tramo de estudio. Esta variante es propuesta en el trabajo de Vivian Elena Parnás [22], para detallar la superficie neta que sufre los embates de los vientos. [36]

Para la obtención del área neta se tiene en cuenta tanto los elementos de la estructura como los accesorios que se encuentren en el tramo de estudio.

El área neta es entonces, el área proyectada normal al tramo o la sombra proyectada de cada tramo. El área bruta corresponde al área total del tramo como si este fuera

macizo. Los tramos serán iguales en altura y no superiores a 6 metros. De esta forma, los valores de los coeficientes dependientes de la altura z sobre el nivel de terreno, así como la presión de viento se calcularán para la altura media de cada tramo especificado. [36]

- **Carga de viento sobre los cables**

La carga de viento sobre los cables debe ser considerada uniformemente distribuida en toda su longitud. El valor se determina a partir de la velocidad básica y los coeficientes correspondientes a la mitad de la altura entre el anclaje del cable y su nivel de sujeción en el fuste. La fuerza se aplica en el sentido y dirección del viento teniendo en cuenta el ángulo formado entre el vector de viento y el cable según el caso de análisis. Los procedimientos para el cálculo del coeficiente de forma en los cables son los establecidos en la NC-285:2003.

El cálculo total de la carga estática en los cables se determina por la ecuación:

$$Q_{cables} = q_{10} * Ch * Cs * Ct * Cra * Cf * Diámetro * sen^3 \phi \quad (2.6)$$

Donde:

Q_{cables} : carga distribuida de viento en los cables, [kN/m]

q_{10} : presión básica del viento, [kN/m²]

Ch , Cs , Ct , Cra se determinan según la NC-285:2003

Cf : Coeficiente de Forma se determina según el caso 5 de la Norma NC-85:2003 (Ver tabla 2.4).

ϕ : Ángulo comprendido entre el vector viento y el cable

A continuación se profundiza en la forma de obtención de los dos últimos valores:

El coeficiente de forma del cable está determinado por la expresión:

$$CfD = Cf * sen^2 \alpha \quad (2.7)$$

Ángulo comprendido entre el vector viento y el cable:

Se aplicará el caso que utiliza la NC 285:2003 donde el ángulo formado por el vector viento con el cable en el plano horizontal es igual a 0^0 , ya que el vector viento queda

contenido en el plano y el ángulo de este con el cable sería igual al ángulo que forma el cable con la horizontal. (Ver figura 2.3)

Tabla 2.4 Coeficientes de forma C_f válidos para $l/D > 100$.

Tipo de postes cables y alambres	$D \sqrt{q_{10} C_h}$	
	$< 0,167$	$> 0,167$
Alambres, postes y tuberías lisas	1,2	0,5
Alambres, postes y tuberías moderadamente lisas	1,2	0,7
Cables de alambres finos	1,2	0,9
Cables de alambres gruesos	1,3	1,1

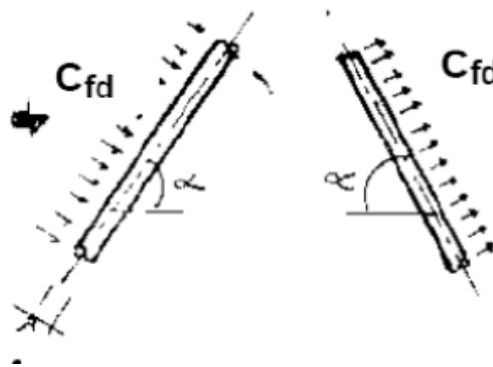


Figura 2.3 Esquema de la carga de viento en barras inclinadas
Fuente: Fuente: NC:285:2003. Carga de viento.Método de cálculo

- **Direcciones de viento**

Para el análisis de las torres triangulares se trabaja con tres direcciones de viento principalmente, correspondientes a los ángulos: 0 grado (normal a la cara), 60 grados (dirección de la mediana del triángulo), 90 grados (paralelo a una cara). Ver fig. 2.4 y 2.5.

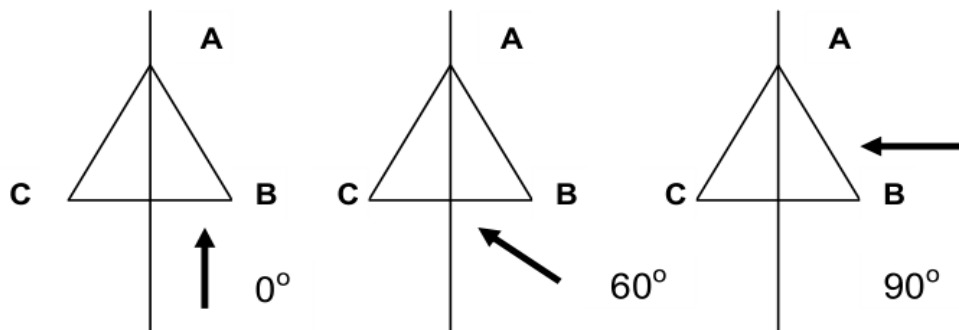


Figura 2.4 Esquema de la carga de viento en barras inclinadas

Fuente: Fuente: NC:285:2003. Carga de viento.Método de cálculo

Fuente: Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones bajo la acción del viento.

Vivian E. Parnás. 2012

La norma cubana no especifica nada al respecto, por esto se trabaja con la conversión que hace la norma británica (British Standards Institution, Lattice towers and masts) para llevar de 0° a 60° y 90°. Para obtener las cargas de viento correspondientes a las direcciones de 60° y 90°, se modifica el valor global de la carga para 0 grados multiplicándolo por coeficiente k_{θ} que depende del ángulo de incidencia del viento, la relación de solidez (A_f/A_r) y el tipo de torre, según se muestra en la fig. 2.6.

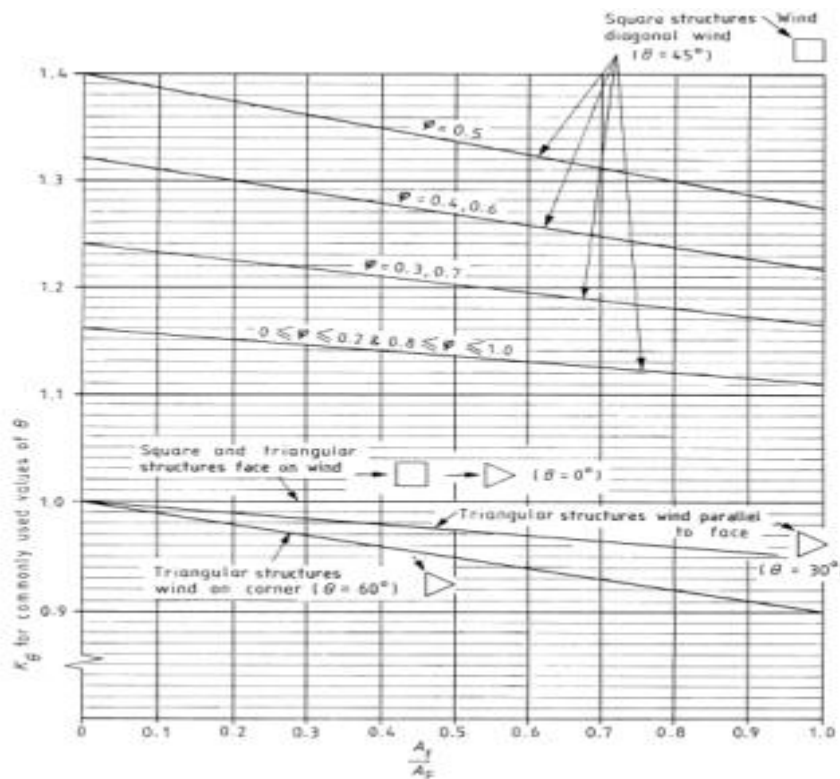


Fig. 2.5: factor de incidencia del viento.

Fuente: Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones bajo la acción del viento.

Vivian E. Parnás. 2012

- **Carga sobre las antenas**

La carga de viento sobre las antenas, es la fuerza equivalente que actúa sobre el fuste en el punto de colocación de la antena sobre él, debida a la presión que ejerce el viento sobre la misma.

Para el cálculo de las antenas se utilizará la formulación:

$$Q_v = P_v \cdot S_a \quad (2.8)$$

donde:

Q_v : carga de viento de la antena.

P_v : presión del viento.

S_a : superficie equivalente de la antena.

Generalmente el fabricante de la antena, suministra la Q_v de una antena a una presión P_v determinada, por lo que con estos datos se puede calcular la superficie equivalente de la antena S_a , y con ello determinar la carga de viento Q_v de la antena para otra presión distinta.

Determinación de los valores de carga de viento en el objeto de estudio

Las cargas de viento actuando en el objeto a analizar, se determinó aplicando la metodología expuesta anteriormente, según establece la Norma Cubana NC: 285:2003 y las consideraciones especiales para este tipo de estructuras. Se realiza el análisis para las velocidades medias correspondientes a las categorías de huracanes de gran intensidad o sea: Categoría 3,4 y 5 según escala de Saffir-Simpson.

Los coeficientes C_t , C_s , C_r , C_f y el área neta calculada para cada tramo serán los mismos para cada caso que se analice. La presión del viento actuando en el elemento se obtiene de forma puntual y se distribuye en el fuste dividiendo a la misma entre cada tramo analizado, en este caso es 6m.

- El coeficiente de sitio (C_s) se tomará para un sitio expuesto ya que la torre analizada se encuentra en la cima de una colina por lo tanto $C_s=1,10$.
- El coeficiente de altura se determina según la expresión 2.3.

Como altura sobre el nivel de terreno local de la torre es de $Z=240$ m y la colina tiene 330 m de altura (H) y la mitad de su ancho es $L_H=500$ m, entonces:

$H/L_H=0,66$ pero se asume como 0,5 [22]

Para Colinas tridimensionales axial simétricas (colina aislada), $a=4$ y $\Delta S_{z,max}=1,6$
 $H/L_H=1,6*0,5=0,8$; y como $X=0$ entonces $k_{red}=1,5$; por lo tanto la ecuación queda de la siguiente manera:

$$C_{h,mod} = Ch \left[1 + \Delta S_{z,max} \left(e^{-\left(\frac{az}{L_H}\right)} \right) \right]^2$$

$$C_{h,mod} = Ch \left[1 + 0.8 \left(e^{-\left(\frac{4*240}{500}\right)} \right) \right]^2$$

$$C_{h,mod} = Ch * 1.25$$

- El coeficiente de ráfaga C_r se determina para cada tramo de altura .(Ver tablas 2.5)
- El coeficiente de reducción por área expuesta $C_{ra} = 1$ porque la reducción sólo se usará cuando la mayor dimensión señalada sea igual o mayor que 15 m.
- Para torres de celosía el coeficiente de forma C_f se obtiene según la expresión 2.5 que corresponde al caso 4 NC: 285 :2003. Los resultados del cálculo se reflejan a continuación.

El coeficiente de forma C_{fE} se calcula empleando la expresión 2.5:

$$C_{fE} = C_f (1 + N)*0,9$$

$$C_f = 2.1$$

- **Carga de viento en fuste.**

Determinación de la carga de viento en fuste para categoría 3 (V= 178 Km/h).

A continuación se muestran los resultados obtenidos de presión básica del viento actuando para una velocidad de 178 Km/h y en las direcciones de viento 0° , 60° y 90° . En las tablas 2.5 se relacionan los valores obtenidos.

Con el procedimiento aplicado anteriormente se obtienen las cargas de viento para cada categoría de huracán que genera vientos extremos (3,4 y 5), los resultados se tabulan a continuación.

Tabla 2.5 Carga de viento para las categorías 3,4 y 5 ($V = 178 \text{ km/h}$, 210 km/h y 250 km/h)

Tramos de altura		$q_{10}=0.9 \text{ kN/m}^2$	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
		$q(\text{kN})$	$q(\text{kN})$	$q(\text{kN})$	$q(\text{kN})$
1	000-006	4.91	8.35	11.62	16.43
2	006-012	5.89	10.02	13.95	19.71
3	012-018	6.68	11.36	15.81	22.34
4	18-24	7.27	12.36	17.20	24.31
5	24-30	7.85	13.35	18.59	26.26
6	30-36	8.24	14.01	19.50	27.56
7	36-42	8.71	14.81	20.62	29.14
8	42-48	8.94	15.20	21.16	29.90
9	48-54	9.21	15.66	21.81	30.82
10	54-60	9.54	16.22	22.59	31.92
11	60-66	9.77	16.60	23.11	32.66
12	66-72	10.06	17.10	23.81	33.64
13	72-78	10.26	17.44	24.27	34.30
14	78-84	10.44	17.75	24.70	34.91
15	84-90	10.66	18.13	25.23	35.66
16	90-96	10.89	18.51	25.76	36.41
17	96-102	11.11	18.89	26.29	37.16
18	102-108	11.20	19.04	26.51	37.46
19	108-114	11.28	19.18	26.70	37.73
20	114-120	11.47	19.50	27.15	38.37
21	120-126	11.55	19.63	27.33	38.62
22	126-132	11.73	19.93	27.75	39.22

Los valores de carga por metro lineal obtenidos de la división de la presión básica del viento entre 6m de tramo de análisis se muestran en el anexo 2 tablas 1 y 2 y en la tabla 2.6 del epígrafe.

Los coeficientes de incidencia del viento k_{θ} obtenidos para direcciones de vientos de 60° y 90° son los siguientes:

Para ángulos de 60 grados, $k\theta=0.915$

Para ángulos de 90 grados, $k\theta=0.96$

Tabla 2.6 Carga de viento distribuida por dirección de viento 0°, 60° y 90° ($V = 178$ km/h, 210 km/h y 250 km/h).

Tramos de altura	Categoría 3			Categoría 4			Categoría 5		
	0°	60°	90°	0°	60°	90°	0°	60°	90°
1	1.39	1.27	1.34	1.94	1.77	1.86	2.74	2.50	2.63
2	1.67	1.53	1.60	2.32	2.13	2.23	3.29	3.01	3.15
3	1.89	1.73	1.82	2.63	2.41	2.53	3.72	3.41	3.57
4	2.06	1.88	1.98	2.87	2.62	2.75	4.05	3.71	3.89
5	2.23	2.04	2.14	3.10	2.83	2.97	4.38	4.01	4.20
6	2.33	2.14	2.24	3.25	2.97	3.12	4.59	4.20	4.41
7	2.47	2.26	2.37	3.44	3.14	3.30	4.86	4.44	4.66
8	2.53	2.32	2.43	3.53	3.23	3.39	4.98	4.56	4.78
9	2.61	2.39	2.51	3.63	3.33	3.49	5.14	4.70	4.93
10	2.70	2.47	2.60	3.76	3.44	3.61	5.32	4.87	5.11
11	2.77	2.53	2.66	3.85	3.52	3.70	5.44	4.98	5.23
12	2.85	2.61	2.74	3.97	3.63	3.81	5.61	5.13	5.38
13	2.91	2.66	2.79	4.05	3.70	3.88	5.72	5.23	5.49
14	2.96	2.71	2.84	4.12	3.77	3.95	5.82	5.32	5.59
15	3.02	2.76	2.90	4.21	3.85	4.04	5.94	5.44	5.71
16	3.08	2.82	2.96	4.29	3.93	4.12	6.07	5.55	5.83
17	3.15	2.88	3.02	4.38	4.01	4.21	6.19	5.67	5.95
18	3.17	2.90	3.05	4.42	4.04	4.24	6.24	5.71	5.99
19	3.20	2.93	3.07	4.45	4.07	4.27	6.29	5.75	6.04
20	3.25	2.97	3.12	4.52	4.14	4.34	6.39	5.85	6.14
21	3.27	2.99	3.14	4.55	4.17	4.37	6.44	5.89	6.18
22	3.32	3.04	3.19	4.63	4.23	4.44	6.54	5.98	6.27

- **Carga de viento en los cables.**

La carga de viento actuando en los cables se determina según las expresiones 2.6 y 2.7, para cada cable según su ubicación. Los resultados se exponen en las tablas 2.7, 2.8 y 2.9.

Tabla 2.7 Carga de viento en los cables en la cara norte.

Carga de viento en los cables en la cara norte				
Nivel de cable	q10=0.9 kN/m2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
	q(kN/m)	q(kN/m)	q(kN/m)	q(kN)
1	0.0012	0.0020	0.0028	0.0039
2	0.0099	0.0168	0.0234	0.0330
3	0.0140	0.0238	0.0331	0.0467
4	0.0213	0.0361	0.0503	0.0711
5	0.0206	0.0349	0.0487	0.0688
6	0.0380	0.0646	0.0899	0.1270

Tabla 2.8 Carga de viento en los cables en la cara sureste.

Carga de viento en los cables en la cara sureste				
Nivel de cable	q10=0.9 kN/m2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
	q(kN/m)	q(kN/m)	q(kN/m)	q(kN)
1	0.0007	0.0011	0.0015	0.0022
2	0.0080	0.0136	0.0190	0.0268
3	0.0091	0.0155	0.0215	0.0304
4	0.0158	0.0268	0.0373	0.0527
5	0.0147	0.0250	0.0348	0.0492
6	0.0303	0.0516	0.0718	0.1014

Tabla 2.9 Carga de viento en los cables en la cara suroeste.

Carga de viento en los cables en la cara suroeste				
Nivel de cable	q10=0.9 kN/m2	Categoría 3	Categoría 4	Categoría 5
	q(kN/m)	q(kN/m)	q(kN/m)	q(kN)
1	0.0007	0.0011	0.0015	0.0022

2	0.0080	0.0136	0.0190	0.0268
3	0.0091	0.0155	0.0215	0.0304
4	0.0158	0.0268	0.0373	0.0527
5	0.0147	0.0250	0.0348	0.0492
6	0.0303	0.0516	0.0718	0.1014

- **Carga de viento en las antenas.**

En las tablas 2.10, 2.11 y 2.12 se muestran los valores de la carga de viento calculada para las antenas parabólicas de la torre, según la expresión 2.9.

Tabla 2.10 Cálculo de viento en las antenas para categoría 3

Tipología de Antenas	CATEGORIA 3 (V = 178 Km/h)		
	q ₁₀ (kN/m ²)	Área (m ²)	Carga (kN)
Parábola de 2.5mts (22.12-23.7) R	1,53	4,91	7,51
Parábola Rx de 0.5mts (6.32-7.9) R	1,53	0,20	0,30
Parábola Rx de 0.4mts del Telecentro (9.48-11.06)I	1,53	0,13	0,19
Parábola de 1.5 del RE (Cacocum) (26.86-28.44)R	1,53	1,77	2,70

Tabla 2.11 Cálculo de viento en las antenas para categoría 4

Tipología de Antenas	CATEGORIA 4 (V = 210 Km/h)		
	q ₁₀ (kN/m ²)	Área (m ²)	Carga (kN)
Parábola de 2.5mts (22.12-23.7) R	2,13	4,91	10,46
Parábola Rx de 0.5mts (6.32-7.9) R	2,13	0,20	0,42
Parábola Rx de 0.4mts del Telecentro (9.48-11.06)I	2,13	0,13	0,27
Parábola de 1.5 del RE (Cacocum) (26.86-28.44)R	2,13	1,77	3,76

Tabla 2.12 Cálculo de viento en las antenas para categoría 5

Tipología de Antenas	CATEGORIA 4 (V = 250 Km/h)		
	q ₁₀ (kN/m ²)	Área (m ²)	Carga (kN)
Parábola de 2.5mts (22.12-23.7)R	3,01	4,91	14,78
Parábola Rx de 0.5mts (6.32-7.9)R	3,01	0,20	0,59
Parábola Rx de 0.4mts del Telecentro (9.48-11.06)I	3,01	0,13	0,38
Parábola de 1.5 del RE (Cacocum) (26.86-28.44)R	3,01	1,77	5,32

2.2.2 Análisis dinámico mediante el método de efecto de ráfagas: Método de análisis simplificado “Patch Load”.

El análisis dinámico para las torres atirantadas es más complicado que el estático debido a la naturaleza aleatoria de las cargas de viento, las cuales varían con el tiempo.

Las fuerzas de viento que producen acciones dinámicas en la estructura son de diferentes tipos: fuerzas debido a las turbulencias, fuerzas de resonancia y de desprendimiento de vórtices.

Para analizar el comportamiento dinámico de una estructura, primeramente se conocer el valor del período fundamental de vibración de la estructura T. Este valor debe obtenerse a partir de las propiedades del sistema estructural de resistencia sísmica del mismo en la dirección de análisis de acuerdo a los principios de la dinámica estructural, suponiendo que el sistema está empotrado en la base y con un comportamiento linealmente elástico de la estructura. El valor de T no puede ser mayor de 1.2T_a donde T_a es el período fundamental de vibración aproximado el cual se determina por la siguiente fórmula:

Para estructuras Tipo I (Pórticos de Acero simétricamente arriostrados)

$$T_a = 0.085hn^{3/4} \quad (2.9)$$

Donde:

h_n : altura de la estructura medida desde el nivel de base, hasta el último nivel significativo, en metros.

Si el T es mayor que T_a entonces se considera una estructura rígida de lo contrario es una estructura flexible. Para este último caso se debe realizar la comprobación de la estructura por métodos dinámicos.

Para el análisis dinámico se pueden utilizar los métodos completamente dinámicos como el espectro de frecuencia o dominio del tiempo; o métodos estáticos equivalentes como el del factor de ráfaga o el de carga por tramos (Patch load). La aplicación de uno u otro dependerá de la sensibilidad dinámica y de la importancia del posible fallo de la estructura. La complejidad de los métodos dinámicos ha llevado a que se utilicen con mayor frecuencia los estáticos equivalentes, sin embargo estos asumen un grupo de simplificaciones que deben tenerse en cuenta[31].

El método del factor de ráfaga sólo es válido para torres de alturas menores a 150 m; por esta razón se recomienda emplear el “Patch load”, aplicable a torres de cualquier altura, pero debe cumplirse además debe cumplirse algunas consideraciones, las mismas se exponen a continuación.

- **Método de Patch Load**

El método del Patch Load desarrollado específicamente para torres atirantadas por Davenport y Gestorf[20] y perfeccionado posteriormente por Sparling [19] brinda una buena aproximación con relación a la aplicación de los métodos dinámicos puros.

El método de carga por tramos (Patch load) utiliza una serie de patrones de carga estática para aproximar los efectos de la turbulencia del viento. El análisis comprende dos estados, el que considera los efectos de la componente media de la carga de viento (efectos estáticos) y el que toma en cuenta los efectos fluctuantes de la carga (efectos dinámicos).

Para la aplicación del método deben cumplirse tres criterios:

a) La altura del mástil debe ser menor que la mitad de la distancia entre los dos últimos niveles de cables.

b) La relación entre la rigidez a flexión del fuste y la rigidez lateral de los cables, definida como el parámetro de rigidez β debe ser menor que 1.0. El parámetro β s está definido por la ecuación:

$$\beta = \frac{4E_m I_m / h_s^2}{\left(N_i \sum_{i=1}^{N_i} K_{Gi} H_{Gi} \right)} \quad (2.10)$$

Donde:

N_i : es el número de niveles de cables;

$K_{Gi} = 0.5 N_i A_{Gi} E_{Gi} \cos^2 \alpha_{Gi} / l_{Gi}$

A_{Gi} : área de la sección transversal del cable del nivel i;

E_{Gi} : módulo de elasticidad del cable en el nivel i;

l_{Gi} : longitud del cable en el nivel i;

N_i : número de cables del nivel i;

H_{Gi} : es la distancia desde la base del fuste hasta el nivel i de cable correspondiente;

α_{Gi} : ángulo de la inclinación del cable con relación a la horizontal en el nivel i;

E_m : módulo de elasticidad del fuste;

I_m : inercia del fuste;

h_s : distancia promedio entre niveles de cable.

c) El parámetro de resistencia inercial Q, que tiene en cuenta la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de amortiguamiento en el fuste, también debe ser menor que 1. Se calcula por la ecuación:

$$Q = \frac{1}{30} \sqrt[3]{\frac{HVh}{bav}} \sqrt{\frac{mav}{H \sum R w}} \quad (2.11)$$

Donde:

mav : masa promedio por unidad de longitud del fuste incluyendo los elementos accesorios (en kg/m);

bav: ancho promedio del fuste (en m);

V H: velocidad media del viento para intervalos de una hora en la cima del fuste (en m/s)

$\sum R W$: valor promedio de las áreas netas y los coeficientes de forma para el fuste y sus accesorios (en m²/m);

H: altura del fuste incluyendo el mástil (en m).

El principio de este método plantea: que las solicitaciones totales de la torre atirantada bajo la acción de la carga de viento se determinan por la ecuación:

$$r = \bar{r} \pm \hat{r}pl \quad (2.12)$$

Donde:

r : valor de la solicitación total.

–

\bar{r} : valor de la solicitación que corresponde a la componente media de la carga de viento.

rPL: valor de la solicitación que corresponde a la componente fluctuante de la carga de viento.

Cargas de viento por el método simplificado “Patch load” (carga parche)

- **Componente Media**

Para el cálculo de la componente media del Patch se utiliza la expresión:

$$Q_{media} = q^D_{10} * C_t * C_s * C_h * C_f * A_{neta} \quad (2.13)$$

Donde:

q^D_{10} : Presión básica del viento correspondiente a un intervalo de promediación de la velocidad del viento para una hora, y es función del tipo de terreno en la cual va a estar situada la obra.[kN] Ver tabla 13 de NC-285:2003.

C_t, C_s, C_h, C_f : Los valores son los correspondientes a lo planteado en la NC-285:2003, de la misma forma que se determinan para análisis estático.

El análisis para este estado de carga será no lineal, incluyendo como estado inicial a la tensión inicial de los cables, más el peso propio de los elementos.

Para el cálculo de la carga de viento sobre los cables con el método del Patch solo se considera la componente media.

- **Componente fluctuante**

La componente fluctuante de la carga de viento $r^{\wedge} PL$ se obtiene según una serie de análisis estáticos para diferentes tramos de cargas, Ver Fig. 2.7. Los resultados individuales de cada tramo de carga asignado se combinan y luego se afectan por varios coeficientes.

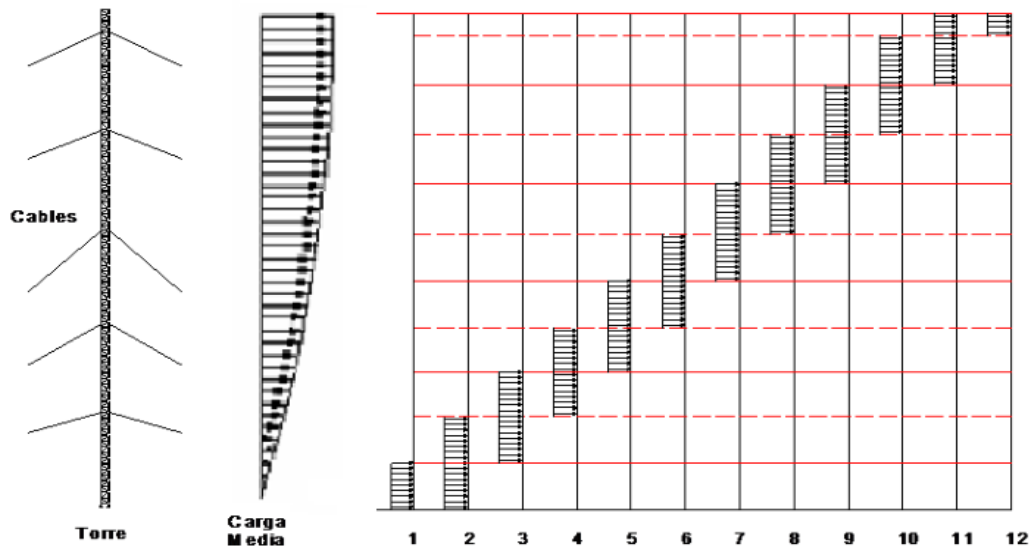


Figura 2.7 Tramos de cargas asignados a una torre por el método Patch load.

Fuente: Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones bajo la acción del viento.

Vivian E. Parnás. 2012

A continuación se describe por pasos la metodología a seguir para implementar este método.

a) Los tramos de carga estática son aplicados al fuste sucesivamente, la posición y extensión de cada patrón individual se realiza de la forma siguiente:

- en cada espacio del fuste entre los niveles de cables adyacentes, así como en el espacio entre la base del fuste y el primer nivel de cables;
- sobre del mástil ;

- de mitad a mitad de cada espacio adyacente. Si el fuste presenta en su cima un mástil, el tramo de carga (Patch load) del último tramo en esta categoría debe extenderse desde la mitad del espacio inferior donde está el último nivel de cables hasta el tope del mástil.

b) Los valores de la carga para cada tramo se calculan por la ecuación:

$$q_{plj} = Ct * Cs * Cf * Aneta * \rho_A * i_0 * V_{10}^2 * Ch_{10} * Ch_{(z)} \quad (2.14)$$

Donde:

q_{plj} : Valor de la carga para cada tramo j.

Ct, Cs, Cf: valores según NC-285:2003.

ρ_A : Densidad del aire

i_0 : Intensidad de turbulencia

V_{10} : Velocidad del aire medida a 10 m de altura.

Ch_{10} : Coeficiente de altura para 10 m (tomar valor según NC-285:2003 21).

Ch_z : Coeficiente de altura según la altura (z) del tramo analizado (tomar valor según la NC-285:2003).

Aneta : Área del tramo analizado (m^2)

La carga total para cada tramo se divide entre tres para colocarlo de forma distribuida sobre cada columna de la torre. El análisis para este estado de carga será lineal, reconociendo como estado inicial al correspondiente estado de equilibrio alcanzado para la componente media de la carga de viento. [31]

c) Combinar las solicitaciones producto a los tramos de carga (r_{PL})

Para simular la falta de correlación en las cargas fluctuantes de viento, la respuesta debida a los tramos individuales de cargas son combinados como la raíz de la suma de los cuadrados, como se muestra en la ecuación:

$$r_{pl} = \sqrt{\sum_{j=1}^N r_{plj}^2} \quad (2.15)$$

Donde:

r_{plj} : Solicitación producto de la carga de cada tramo j.

N: Número total de tramos de carga.

d) Cálculo de las solicitaciones totales producto a los tramos de carga (r_{PL})

La respuesta total que corresponde a la componente fluctuante de la carga de viento r_{PL} se determina de la ecuación:

$$\hat{r}_{PL} = r_{pl} * \lambda_B * \lambda_R * \lambda_{TL} * g \quad (2.16)$$

Donde:

λ_B : es un factor de reducción para tener en cuenta la sobrestimación del valor de la respuesta dinámica.

λ_R : es el factor de mayoración que tiene en cuenta la resonancia (Función de la forma, masa y rigidez del fuste).

λ_{TL} : es el factor que toma en cuenta la turbulencia.

g : es el factor estadístico de pico tomado entre 3,5 y 4,0.

Usando valores conservadores de los factores de escala ($\lambda_B = 0.75$, $\lambda_R = 1.2$, $\lambda_{TL} = 1.05$) y $g = 4$ la ecuación puede ser simplificada como:

$$r_{PL} = 3.78 * r_{pl} \quad (2.17)$$

Determinación de las cargas para la aplicación del método estático equivalente

El análisis dinámico con la aplicación del método estático equivalente Método de Patch load, se realiza para la categoría 3.

- **Cálculo de la componente media (Q_{media}) y componente fluctuante (q_{plj})**

Según la expresión 2.13 y 2.14 y se determina la componente media y fluctuante respectivamente, cuyos resultados se muestran en las tablas 3 y 4 del anexo 2.

2.3 Especificaciones sobre la modelación de la torre objeto de estudio en el Programa SAP 2000 V-15.

Para la modelación de la torre se utilizó el programa SAP 2000 versión 15.0, basado en el método de los elementos finitos. El chequeo de la estructura se realizó mediante el código AISC-LRFD del año 1993.

2.3.1 Modelación de la geometría.

La torre fue modelada como una armadura espacial reproduciendo de forma detallada cada miembro. Los elementos de la armadura fueron modelados como barras, elementos lineales con dos nudos extremos.

Se consideró como empotramiento la unión entre las columnas pues estas se encuentran unidas con doble plancha y seis pernos en el sentido longitudinal. La unión entre los tranques y las columnas, se consideró articulada de la misma manera que entre las diagonales y las columnas, ya que en todos los casos se realiza mediante un perno.

Para todos los elementos que conforman la estructura se definió la dimensión de sus secciones, por lo que el programa calculó y consideró automáticamente las características geométricas de los mismos.

La modelación de los cables se realizó utilizando la formulación catenaria, la cual representa la forma adoptada bajo cargas de peso propio y fuerzas de tesado inicial. El tesado inicial del cable aplicado en el extremo del elemento unido al anclaje se consideró como el 10% de la carga de rotura del propio cable.

2.3.2 Modelación del material.

Las torres están conformadas por acero ASTM A572, Grado 50 (Tensión de fluencia=50 ksi, Tensión de rotura=65 ksi. Sus propiedades se consideraron linealmente elásticas y constantes en el tiempo. El material de los cables es acero, con carga de rotura de 120 kg/mm².

2.3.3 Modelación de las condiciones de apoyo.

Las condiciones de apoyo del fuste se consideraron articuladas ya que a pesar de que las patas tienen apoyos independientes empotrados a una base de acero, la unión entre esta base y la masa de hormigón se considera articulada debido que

para este modelo la terminación de la base es conocida como punta de diamante. Los anclajes a tierras de los cables se tomaron como articulaciones espaciales. Ver figura 1 b) anexo 1.

2.3.4 Modelación de las cargas y combinaciones.

Las cargas estáticas de viento obtenidas de manera puntual en el capítulo anterior se colocaron de forma distribuida en una de las columnas del fuste para cada tramo de 6m. Se tuvieron en cuenta las tres direcciones (0°, 60°, 90°) fundamentales para el análisis estático. En el caso de la dirección 60°, se descompuso en los ejes "x" y "y".

Las cargas de viento en el cable se colocaron igualmente de manera distribuida, y con el viento actuando en el mismo plano del cable, tal como indica el caso que expone la NC 285:2003. Ver figura 1 y 2 del anexo 3.

En el caso de la carga de viento en las antenas esta será una carga puntual ubicada en el punto de sujeción de la antena al fuste, y en el mismo sentido del viento. Referirse a anexo 3 figura 3.

En el cálculo y diseño de estructuras y elementos estructurales es necesario definir las acciones exteriores o cargas y las combinaciones de estas que pueden actuar durante la construcción y durante la vida[38]. Las cargas que intervienen en el análisis del sistema estructural de esta investigación son las cargas permanentes y la carga ecológica.

La combinación de carga utilizada en el trabajo es la establecida por la Norma de Combinaciones de Cargas NC 450:2006.

$$1.2CP + 1.4 CV + ANT$$

Donde:

CP: carga permanente.

CV: carga de viento.

ANT: carga de antena (incluye peso propio y carga de viento)

Esta combinación es aplicada para cada una de las direcciones de acción de la carga de viento definida para las torres de sección triangular.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. PROPUESTAS DE SOLUCIONES

Introducción.

En este capítulo se analizan los datos obtenidos del estudio de la torre atirantada RG-55 ante cargas de vientos extremos. Se obtienen los valores de esfuerzos máximos momento cortante y axial en cada uno de los tramos para las direcciones de viento analizadas. Además se analiza el comportamiento según resistencia de los elementos estructurales más esforzados en cada tramo de nivel de viento, por cada dirección y para cada categoría de eventos extremos (categoría 3,4 y 5). Este análisis se realiza bajo el criterio de la relación de demanda vs capacidad, que establece el software SAP 2000 mediante del coeficiente de utilización. Bajo las mismas condiciones se analiza el comportamiento del conjunto atendiendo las deformaciones alcanzadas.

3.1 Análisis de la incidencia de la dirección del viento en el valor de carga unitaria total

Al calcular la carga estática que ejerce la presión del viento para las direcciones 0°, 60° y 90°, para cada una de las categorías analizadas, se observa que aunque los valores son bastantes cercanos se alcanzan los mayores valores cuando el viento actúa en la dirección 0°. Estos resultados se evidencian en las figuras 5, 6 y 7 del anexo 4.

3.2 Análisis de la vulnerabilidad estructural de la torre RG-55.

En el presente apartado se analiza la vulnerabilidad estructural de la torre atirantada RG-55, a partir del desempeño de los elementos que componen el fuste y los cables. Se considera para el análisis los esfuerzos por cada tramo de nivel de viento y el comportamiento deformacionales de los mismos.

3.2.1 Análisis estático.

Se analiza la respuesta estática del objeto de estudio (fuste y cables) según las máximas sollicitaciones producidas en los mismos.

- **Comportamiento de la torre para velocidad 178 (Km/h). Categoría 3**

En el modelo de torre analizado se muestra que el comportamiento de la misma varía por según el tramo y la dirección de viento. Los esfuerzos axiales a tracción obtenidos para este caso se producen en las columnas y en diagonales, ver tabla 3.1. Los esfuerzos axiales de compresión son asumidos principalmente por las columnas. En ambos casos los elementos de mayores esfuerzos axiales se encuentran en el primer tramo de nivel de viento, cercano a la base, para las combinaciones de carga 1 y 2 que corresponden a las direcciones de viento 0° y 90°.

Tabla 3.1 Mayores solicitaciones para vientos de 178 km/h (Categoría 3).

Elemento	Combinación	P	V2	M3
		KN	KN	KN-m
811	COMB2 (0°)	315.379	0.017	2.678E-17
811	COMB3 (60°)	190.517	0.017	2.678E-17
827	COMB1 (90°)	138.302	0.042	-2.949E-17
813	COMB1 (90°)	-1087.571	23.275	20.1275
16	COMB2 (0°)	-1052.143	-53.512	42.3054
16	COMB3 (60°)	-900.315	-34.724	27.4629

Al comprobar la capacidad de carga de estos elementos, a través del coeficiente de utilización, que considera la relación entre esfuerzos y capacidad de carga, se concluye que la mayoría de los elementos que componen el fuste no resisten. (Los elementos en rojo presentan un coeficiente de utilización mayor que 0,95, lo que muestra que fallan por capacidad). Se evidencia además que las combinaciones 1,2 y 2 son elevadas y críticas para la dirección 60° . Ver tabla 3.2 y figuras 8 y 9 del anexo 5.

Tabla 3.2 Valores de coeficiente de utilización. Velocidad 178 (Km/h)

No elemento	Elemento	Combinación	Coef. Utiliz.
827	Diagonal	COMB3 (60°)	Pu>Pe
811	Diagonal	COMB2 (0°)	1.371
813	Columna	COMB1 (90°)	1.93
16	Columna	COMB2 (0°)	1.372

- **Comportamiento de la torre para velocidad 210 y 250 (Km/h). Categoría 4 y 5.**

El comportamiento de la torre para esta categoría es similar al caso analizado por categoría 3. Los esfuerzos axiales a tracción obtenidos para este caso se producen en las diagonales, ver tablas 5, 6 y 7 del anexo 5. Los esfuerzos axiales de compresión son asumidos principalmente por las columnas (tabla 3.4) del anexo tal. En ambos casos los elementos de mayores esfuerzos axiales se encuentran en el primer tramo de nivel de viento, cercano a la base, para las combinaciones de carga 2 que corresponden a las direcciones de viento 0°.

3.2.2 Análisis dinámico.

- **Componente media y fluctuante.**

Se realiza la comprobación del comportamiento del objeto de estudio, donde se obtiene los resultados que se muestran a continuación en las tablas 3.3 y 3.4, donde se evidencia que para la combinación 4 para el caso de la componente fluctuante y 5 para la dinámica, resultan los mayores esfuerzos, la misma corresponde a una dirección de 0°.

Tabla 3.3 Mayores solicitaciones obtenidas por la componente media.

Número elemento	Combinación	P	V2	M3
		KN	KN	KN-m
811	COMB4	364.701	0.018	-2.082E-17
3610	COMB4	345.872	0.017	-1.735E-18
3650	COMB4	328.857	0.017	-5.204E-18

16	COMB4	-1045.725	-59.409	47.2102
3596	COMB4	-905.362	-59.176	47.0461
3636	COMB4	-806.593	-58.647	46.6532

Tabla 3.4 Mayores solicitaciones obtenidas por la componente media

Número elemento	Combinación	P	V2	M3
		KN	KN	KN-m
3	COMB5	14804.816	80.247	-63.3954
812	COMB5	12323.299	-74.372	58.7539
1	COMB5	12299.059	75.574	-59.7031
16	COMB5	-30844.173	-88.168	69.6528
820	COMB5	-24549.542	38.624	-30.5128
3596	COMB5	-19611.349	-56.713	44.8035

Los desplazamientos máximos que se obtienen de la aplicación del método estático equivalente patch load alcanzan un valor máximo en el tramo final, lo que evidencia un aumento significativo en relación con el análisis del método estático. Esto demuestra el carácter resonante de la estructura.

No. Elemento	Combinación	U1	U2	U3
		m	m	m
922	COMB4	0.778382	0.126429	-0.052211
890	COMB4	-0.270617	0.757285	-0.052018
896	COMB4	-0.270911	0.75685	-0.052914
921	COMB4	-0.268338	-0.478684	-0.056328
918	COMB4	-0.268597	-0.476077	-0.056365

Conclusiones del capítulo.

- Se demuestra mediante el análisis de la carga unitaria total según dirección del viento que la dirección del viento, que se alcanza valores mayores para una dirección de viento de 0° .
- Se demuestra mediante el análisis estático de la torre atirantada RG-55 bajo los criterios de resistencia y deformación que la misma falla, es decir es vulnerable ante la acción de vientos extremos (Categoría 3,4 y 5).
- Se realiza la comprobación del comportamiento dinámico de la estructura a partir del método estático equivalente (Patch load), para el cual el mismo resulta más desfavorable que para el caso estático.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se realizó un estudio de las características de las torres de acero atirantadas según su ubicación, función, geometría y comportamiento estructural y se analizó la evolución de los métodos de análisis empleados tanto en el contexto internacional como en el nacional.
- Se realizó la modelación de la torre de acero RG-55 con la aplicación de los métodos de estáticos para condiciones extremas, mediante el software especializado (SAP 2000 v-15).
- Se determinó la vulnerabilidad estructural de la torre objeto de estudio tras la aplicación de los criterios de resistencia y deformación para cada caso de categoría analizada. Además se comprueba el comportamiento dinámico de la estructura donde se corroboran los resultados obtenidos en el análisis estático.
- Se evidencia que para velocidades de viento de 178 km/h perteneciente a huracanes de categoría 3 en la escala Saffir-Simpson, están presentes vulnerabilidades estructurales, debido al fallo de la mayoría de los elementos en los primeros tramos de la torre hasta el segundo nivel de viento, siendo las diagonales y las columnas los elementos más afectados. Por otra parte, solo se observan fallos en los tranques donde se encuentra arriostrado el último nivel de viento.
- Para categorías de huracán 4 y 5 se agudizan aún más las fallas estructurales en la torre con respecto a un huracán de categoría 3.
- Se corrobora la vulnerabilidad estructural de la torre mediante el análisis del comportamiento dinámico, a través del método estático equivalente (patch load) para un huracán de categoría 3.

RECOMENDACIONES

- 1- Profundizar el estudio del comportamiento de los anclajes en este tipo de estructura.
- 2- Analizar la pertinencia económica de las soluciones propuestas.
- 3- Analizar el comportamiento de las torres ante la falla de uno de los tirantes.
- 4- Estudiar los valores de deformación admisible según fatiga de los elementos.
- 5- Elevar la resistencia y estabilidad de la estructura aplicando algunas de las siguientes propuestas:
 - Aumentar las secciones principalmente en el primer tramo empleando perfiles de mayor diámetro que la empleada.
 - Colocar arriostres horizontales para rigidizar la estructura y disminuir los esfuerzos axiales elevados.
 - Colocar arrostros en sus diagonales a lo largo de toda su longitud, en la dirección más desfavorable del viento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Wilson, E.L., Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, ed. I. Computers and Structures. 2002, Berkeley, California, USA.
2. Rodríguez Reinoso, E. E. (2015). Análisis y diseño comparativo entre una torreautoportada triangular de 40m de altura con montantes uv y una con montantes circulares.
3. Cohen, E. and H. Perrin, Design of Multileveled Guyed Towers: Wind Loading. Journal of the Structural Division, ASCE, 1957, a Vol 83(Paper Number 1355).
4. Cohen, E. and H. Perrin, Design of Multileveled Guyed Towers: Structural Analysis. Journal of the Structural Division, ASCE, 1957, b. Vol 83(Paper Number 1355).
5. Rowe, R.S., Amplification of Stress and Displacement in Guyed Towers. Journal of the Structural Division, ASCE, 1958. 84 (Proceedings Paper 1821).
6. Goldberg, J.E. and V.J. Meyers, A Study of Guyed Towers. Journal of the Structural Division, 1965. ASCE, 91, 57-76.
7. Shears, M., Static and Dynamic Behaviour of Guyed Masts., in Structural Engineering Laboratory Report No. 68-6,167 pp. 1968, University of California,Berkeley
8. Shears, M. and R.W. Clough, Static and Dvnamic Behaviour of Guved Masts, in Report No. 68.6 1968, Department of Civil Engineering, University of California: Berkeley, USA.
9. Raman, N.V., G.V. Surya Kumar, and V.V. Sreedhara Rao, Large Displacement Analysis of Guyed Towers. Computers and Structures. , 1988. Vol. 28. (No. 1.): p. 93-104.
- 10.Kahla, N.B., Equivalent beam-column analysis of guyed towers. Computers & Structures, 1995. Vol. 55, No. 4. pp. 631-645.
- 11.Kahla, N.B., Influence of star mounts on guyed towers. Computers & Structures, 1995. Vol. 54(No. 5): p. 989-995.

12. Wahba, Y., M. Madugula, and G. Monforton, Evaluation of non-linear analysis of guyed antenna towers. *Computers and Structures* 1998. Vol 68 p. 207-212.
13. Davenport, A.G., Gust loading factors. *Journal of Structural Division*. ASCE, 1967. Vol. 93 p. 11-34.
14. Vellozzi, J. and E. Cohen, Gust response factors. *Journal of Structural Division*, ASCE, 1968. Vol 94 p. 1295-1313.
15. Simiu, E., Equivalent static wind loads for tall buildings design. *Journal of Structural Division*, ASCE, 1976. Vol 102 p. 719-737.
16. Solari, G., Analytical estimation of the alongwind response of structures. *Journal of Wind Engineering and Aerodynamic* 1983. 14: p. 467-477.
17. Solari, G., Equivalent wind spectrum technique: theory and applications. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1988. Vol 114: p. 1303-1323.
18. Holmes, J.D., Along-wind response towers III. Effective distributions of lattice load. *Engineering Structures*, 1996. Vol. 18(No. 7): p. 489-494.
19. Davenport, A.G. and B.F. Sparling, Dynamic gust response factors for guyed towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1992. Vol 41: p. 2237-2248.
20. Davenport, A.G. and P. Gerstoft A simplified method for dynamic analysis of a guyed mast. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1986. Vol 23: p. 487-499.
21. Smith, B.W., *Communication structures*. First ed, ed. A. Thomas Telford. 2007, London, Great Britain.
22. Oficina Nacional de Normalización, *Carga de viento. Método de cálculo NC 285:2003*. 2003 Ciudad de La Habana, Cuba.
23. Amiri, G.G., *Seismic sensibility of tall guyed telecommunication towers*, in Department of Civil Engineering and Applied Mechanics. 1997, McGill University: Montreal, Canada.
24. British Standards Institution, *Lattice towers and masts Part 4: Code of practice for loading of guyed mast*, BS 8100-4:1995. 1995: London, UK.
25. Pérez Vega, C. (2001). *Torres para antenas*. Departamento de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria.pag.3

26. Electronics Research, Inc. 2009. Disponible:www.eriinc.com
27. Fernández Lorenzo, I.; Paez Castillo, M.; González Haramboure, Y. (2012). Modelación computacional, utilizando el método de los elementos finitos, de anclajes tipo t para torres atirantadas de telecomunicaciones
28. Guía de trabajo seguro en torres de telecomunicaciones. Comisión Nacional de Salud Ocupacional Sector Telecomunicaciones de Colombia. Ingeniero Mario Fernando Ospina González. 2014.
29. Peña González, L. (2013). Análisis de la influencia de la variación de la carga de viento en la zona oriental en el comportamiento estructural de torres de acero.
30. Manual de usuario de SAP 2000, V15.0.
31. Parnás, Rodríguez, Carrasco, Fernández, López. (2012). Metodología de cálculo de torres atirantadas de telecomunicaciones bajo la acción del viento.
32. NC 53-41:1990. "Proyectos de construcción. Carga de viento. Método de cálculo"
33. ISO 4354: 1997 "Wind action on structures"
34. ASCE 7 – 98. "Minimum design loads for buildings and other structures"
35. López Llanusa, A.; Martín Rodríguez, P.; Parnás, V.E. (2012). Influencia de la presencia de las antenas en torres de telecomunicaciones bajo carga de viento
36. Parnás, V. E. (2008). Fallas estructurales en torres reticuladas para telecomunicaciones. Arquitectura y Urbanismo, vol. XXIX, núm. 2-3, 2008, pp. 57-63.
37. British Standards Institution, Lattice towers and masts Part 4: Code of practice for loading of guyed mast, BS 8100-4:1995. 1995: London, UK.
38. Norma de Combinaciones de Cargas NC 450:2006.

ANEXOS

Anexo 1. Torre atirantada RG 55. Ubicada en la Loma de la Cruz. Holguín



a) Mástil

b) base de cimentación

Figura 1 Torre atirantada de telecomunicación ubicada en la loma de la Cruz.

Fuente: elaboración propia

Anexo 2. Determinación de las cargas de viento. Análisis estático.

Tabla 1 Carga de viento según propuesto por la NC 285:2003, $q_{10}=0.9$ kn/m²

Tramos de altura	q_{10}	Ct	Cs	Ch	Cr	Cf	A neta	q(kN)
1 000-006	0.9	1.15	1.1	1	1.22	0.62	5.70	4.91
2 006-012	0.9	1.15	1.1	1.2	1.22	0.62	5.70	5.89
3 012-018	0.9	1.15	1.1	1.41	1.18	0.62	5.70	6.68
4 18-24	0.9	1.15	1.1	1.58	1.14	0.62	5.70	7.27
5 24-30	0.9	1.15	1.1	1.71	1.14	0.62	5.70	7.85
6 30-36	0.9	1.15	1.1	1.83	1.12	0.62	5.70	8.24
7 36-42	0.9	1.15	1.1	1.93	1.12	0.62	5.70	8.71
8 42-48	0.9	1.15	1.1	2.02	1.1	0.62	5.70	8.94
9 48-54	0.9	1.15	1.1	2.1	1.09	0.62	5.70	9.21
10 54-60	0.9	1.15	1.1	2.2	1.09	0.62	5.70	9.54
11 60-66	0.9	1.15	1.1	2.25	1.08	0.62	5.70	9.77

12	66-72	0.9	1.15	1.1	2.31	1.08	0.62	5.70	10.06
13	72-78	0.9	1.15	1.1	2.38	1.07	0.62	5.70	10.26
14	78-84	0.9	1.15	1.1	2.45	1.06	0.62	5.70	10.44
15	84-90	0.9	1.15	1.1	2.50	1.06	0.62	5.70	10.66
16	90-96	0.9	1.15	1.1	2.55	1.06	0.62	5.70	10.89
17	96-102	0.9	1.15	1.1	2.60	1.06	0.62	5.70	11.11
18	102-108	0.9	1.15	1.1	2.65	1.05	0.62	5.70	11.20
19	108-114	0.9	1.15	1.1	2.70	1.04	0.62	5.70	11.28
20	114-120	0.9	1.15	1.1	2.74	1.04	0.62	5.70	11.47
21	120-126	0.9	1.15	1.1	2.79	1.03	0.62	5.70	11.55
22	126-132	0.9	1.15	1.1	2.83	1.03	0.62	5.70	11.73

Tabla 2 Carga de viento distribuida en tramos de 6m ($V = 178$ km/h, 210 km/h y 250 km/h).

Distribución de cargas en tramos de 6m			
q10 (kn/m)	Cat 3 (kn/m)	Cat 4 (kn/m)	Cat 5 (kn/m)
0.82	1.39	1.94	2.74
0.98	1.67	2.32	3.29
1.11	1.89	2.63	3.72
1.21	2.06	2.87	4.05
1.31	2.23	3.10	4.38
1.37	2.33	3.25	4.59
1.45	2.47	3.44	4.86
1.49	2.53	3.53	4.98
1.54	2.61	3.63	5.14
1.59	2.70	3.76	5.32
1.63	2.77	3.85	5.44
1.68	2.85	3.97	5.61
1.71	2.91	4.05	5.72
1.74	2.96	4.12	5.82
1.78	3.02	4.21	5.94
1.81	3.08	4.29	6.07
1.85	3.15	4.38	6.19
1.87	3.17	4.42	6.24
1.88	3.20	4.45	6.29
1.91	3.25	4.52	6.39
1.92	3.27	4.55	6.44
1.95	3.32	4.63	6.54

Tabla 3. Cálculo de la componente media. (Categoría 3. V = 178 km/h)

Tramos de altura		q ^{D10}	C _t	C _s	C _h	C _f	A neta	Q _{media} (kN)
1	000-006	0.45	1.15	1.1	1.00	0.62	5.7	2.01
2	006-012	0.45	1.15	1.1	1.20	0.62	5.7	2.41
3	012-018	0.45	1.15	1.1	1.41	0.62	5.7	2.83
4	18-24	0.45	1.15	1.1	1.58	0.62	5.7	3.19
5	24-30	0.45	1.15	1.1	1.71	0.62	5.7	3.44
6	30-36	0.45	1.15	1.1	1.83	0.62	5.7	3.68
7	36-42	0.45	1.15	1.1	1.93	0.62	5.7	3.89
8	42-48	0.45	1.15	1.1	2.02	0.62	5.7	4.06
9	48-54	0.45	1.15	1.1	2.10	0.62	5.7	4.22
10	54-60	0.45	1.15	1.1	2.18	0.62	5.7	4.38
11	60-66	0.45	1.15	1.1	2.25	0.62	5.7	4.52
12	66-72	0.45	1.15	1.1	2.31	0.62	5.7	4.65
13	72-78	0.45	1.15	1.1	2.38	0.62	5.7	4.79
14	78-84	0.45	1.15	1.1	2.45	0.62	5.7	4.92
15	84-90	0.45	1.15	1.1	2.50	0.62	5.7	5.03
16	90-96	0.45	1.15	1.1	2.55	0.62	5.7	5.13
17	96-102	0.45	1.15	1.1	2.60	0.62	5.7	5.24
18	102-108	0.45	1.15	1.1	2.65	0.62	5.7	5.33
19	108-114	0.45	1.15	1.1	2.70	0.62	5.7	5.42
20	114-120	0.45	1.15	1.1	2.74	0.62	5.7	5.51
21	120-126	0.45	1.15	1.1	2.79	0.62	5.7	5.60
22	126-132	0.45	1.15	1.1	2.83	0.62	5.7	5.69

Tabla 4. Cálculo de la componente fluctuante. (Categoría 3. $V = 178 \text{ km/h}$)

Tramos de altura	Ct	Cs	Cf	Aneta	Pa	i_0	$(V_{10})^2$	Ch_{10}	Ch_z	qplj (kn)
1 0-10,5	1,15	1,1	0,85	4,99	0,0118	0,349	2444,75	1	1,0625	57,39589
2 0-21	1,15	1,1	0,85	9,98	0,0118	0,349	2444,75	1	1,25	135,0492
3 10,5-33	1,15	1,1	0,85	10,695	0,0118	0,349	2444,75	1	1,5625	180,9057
4 21-45	1,15	1,1	0,85	11,405	0,0118	0,349	2444,75	1	1,8275	225,6337
5 33-58,5	1,15	1,1	0,85	12,12	0,0118	0,349	2444,75	1	2,029063	266,2253
6 45-72	1,15	1,1	0,85	12,83	0,0118	0,349	2444,75	1	2,19375	304,6949
7 58,5-78	1,15	1,1	0,85	13,9	0,0118	0,349	2444,75	1	2,3	346,0939
8 72-84	1,15	1,1	0,85	5,705	0,0118	0,349	2444,75	1	2,415	149,1503
9 78-93	1,15	1,1	0,85	7,13	0,0118	0,349	2444,75	1	2,485625	191,8565
10 84-102	1,15	1,1	0,85	8,555	0,0118	0,349	2444,75	1	2,55125	236,2786
11 93-117	1,15	1,1	0,85	11,405	0,0118	0,349	2444,75	1	2,65	327,1843
12 102-132	1,15	1,1	0,85	14,26	0,0118	0,349	2444,75	1	2,74	422,9816
13 117-143	1,15	1,1	0,85	12,355	0,0118	0,349	2444,75	1	2,835	379,1815
14 132-143	1,15	1,1	0,85	5,23	0,0118	0,349	2444,75	1	2,8875	163,4839

Anexo 3. Esquema de carga de viento para las diferentes direcciones de velocidad.

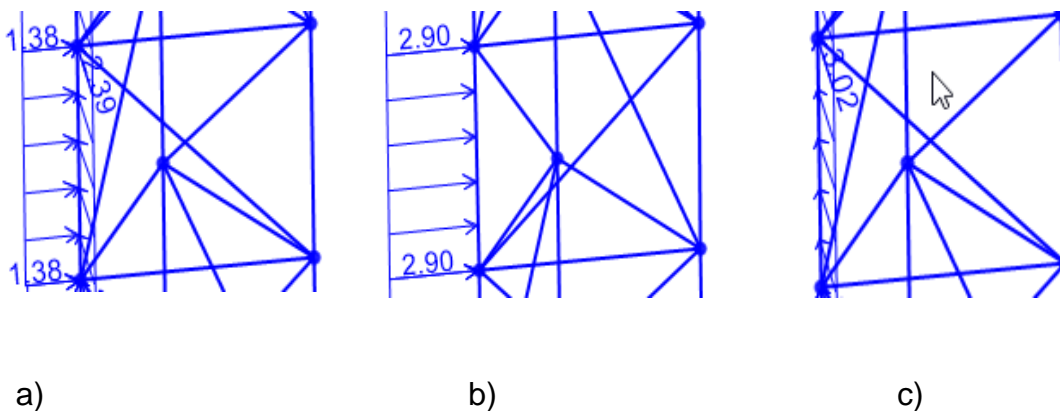


Fig. 2 Cargas de viento en el fuste. a) a 0° . b) a 90° . c) a 60° .

Fuente: elaboración propia

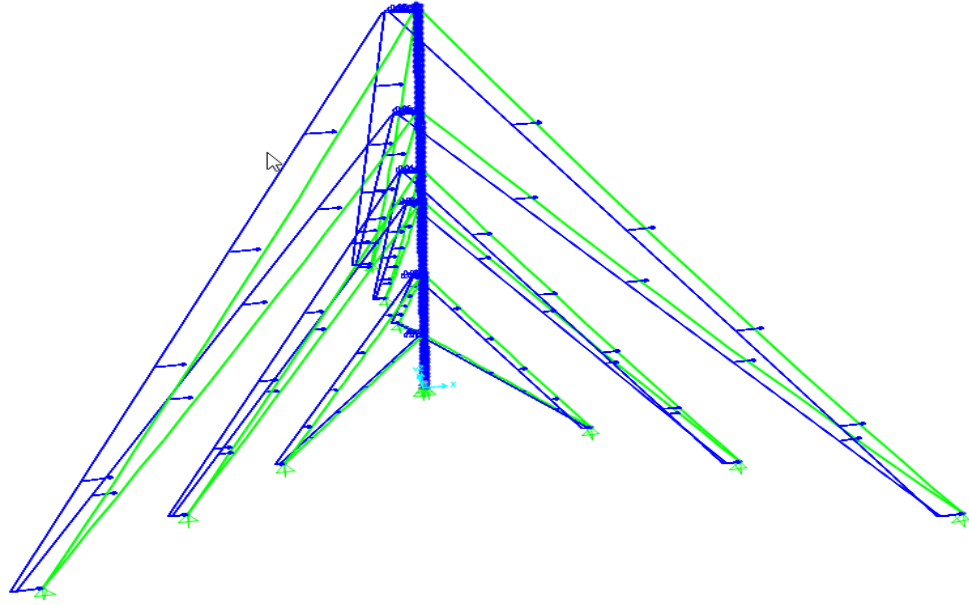


Fig. 3 Cargas de viento en los cables.

Fuente: elaboración propia

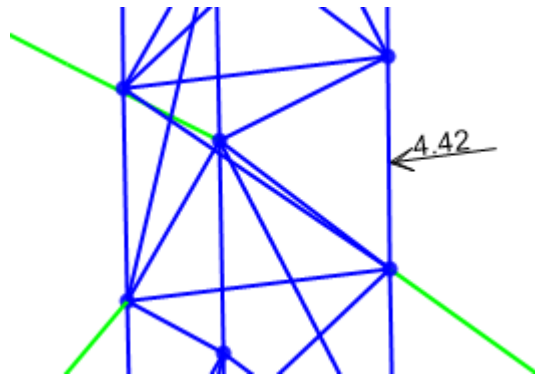


Fig. 4 Carga de viento en la antena.

Fuente: elaboración propia

Anexo 4. Incidencia de la dirección del viento en la carga total .

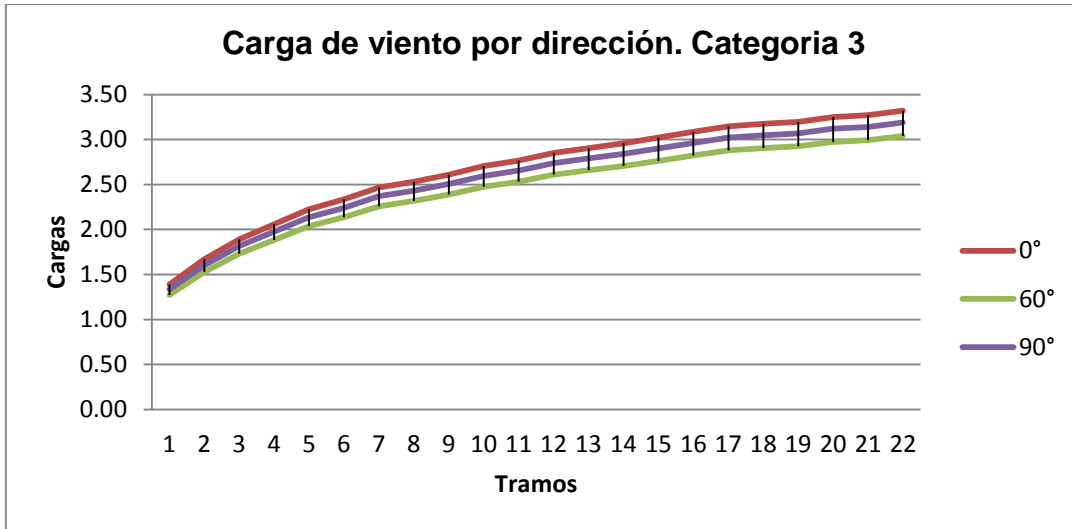


Figura 5 Comparación de la carga unitaria total según dirección del viento. Categoría 3
Fuente: elaboración propia

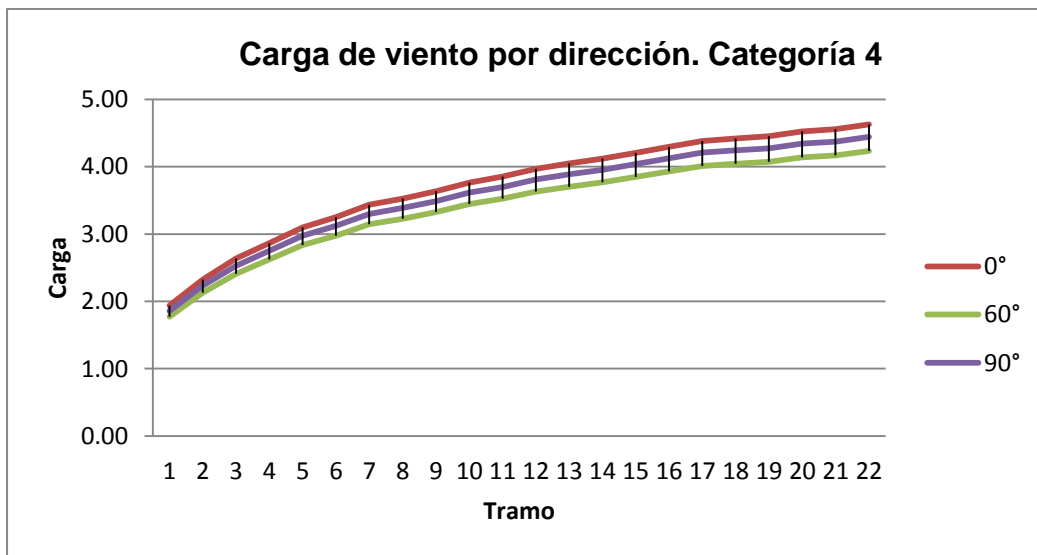


Figura 6 Comparación de la carga unitaria total según dirección del viento. Categoría 4
Fuente: elaboración propia

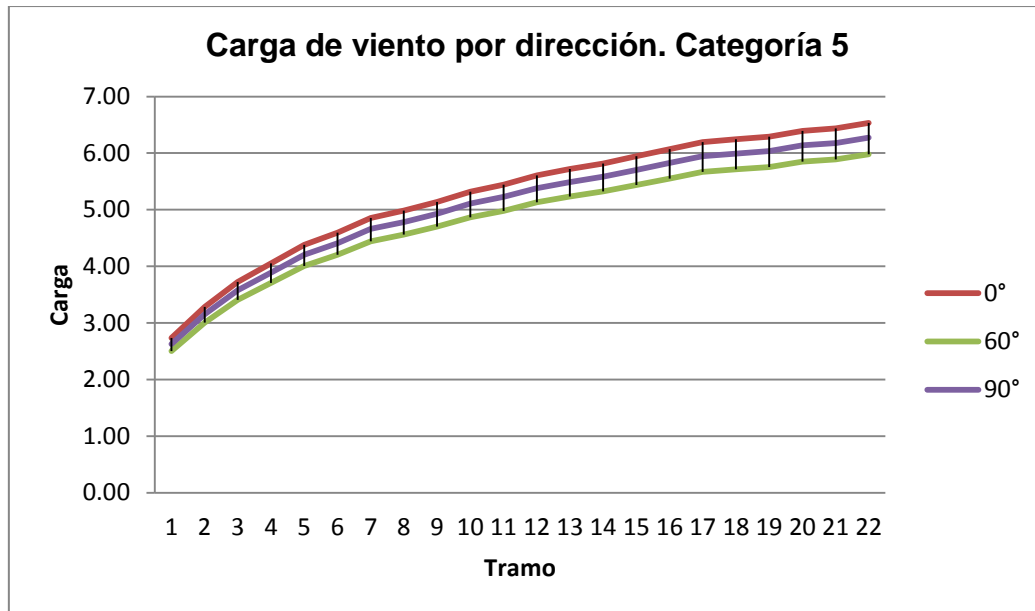


Figura 7 Comparación de la carga unitaria total según dirección del viento. Categoría 5
Fuente: elaboración propia

Anexo 5. Resultados obtenidos para velocidades de viento en categoría 4 y 5

Tabla 5 Mayores solicitaciones para vientos de 210 km/h (Categoría 4).

No elemento	Combinación	P	V2	M3
		KN	KN	KN-m
811	COMB2 (0°)	615.826	0.017	9.107E-18
3610	COMB2 (0°)	589.955	0.015	7.806E-18
16	COMB2 (0°)	-1440.489	-2.714	0.011
3596	COMB2 (0°)	-1301.646	-6.002	4.488

Tabla 6 Mayores coeficientes de utilización para vientos de 210 km/h (Categoría 4)

No elemento	Elemento	Combinación	Coef. Utiliz.
811	diagonal	COMB1 (90°)	Pu>Pe
16	columna	COMB2 (0°)	1.94

3610	diagonal	COMB1 (90°)	Pu>Pe
3596	columna	COMB2 (0°)	1.785

Tabla 7 Mayores coeficientes de utilización para vientos de 210 km/h (Categoría 5)

No elemento	Combinación	Combinación	P	V2	M3
			KN	KN	KN-m
811	2.21637	COMB2 (0°)	871.359	0.017	2.743E-17
3610	2.21637	COMB2 (0°)	838.285	0.015	3.209E-17
16	1.58	COMB2 (0°)	-1806.512	-2.988	0.0196
3596	1.58	COMB2 (0°)	-1614.562	-6.294	4.5258

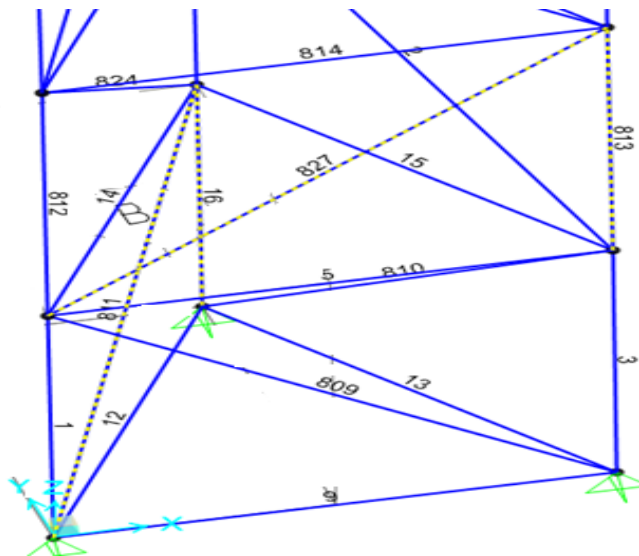


Figura 8 Elementos de mayores esfuerzos

Fuente: elaboración propia

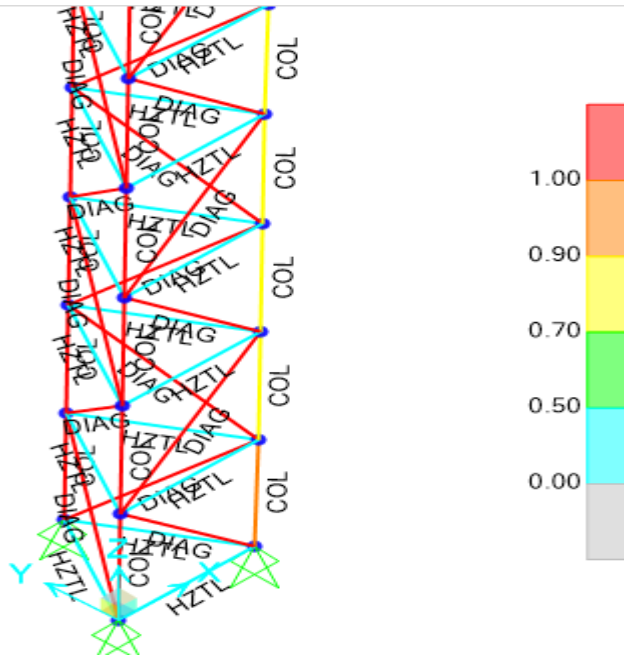


Figura 9 Análisis de capacidad resistente de los elementos que componen el fuste

Fuente: elaboración propia

Anexo 6. Comportamiento deformacional de la torre atirantada RG 55.

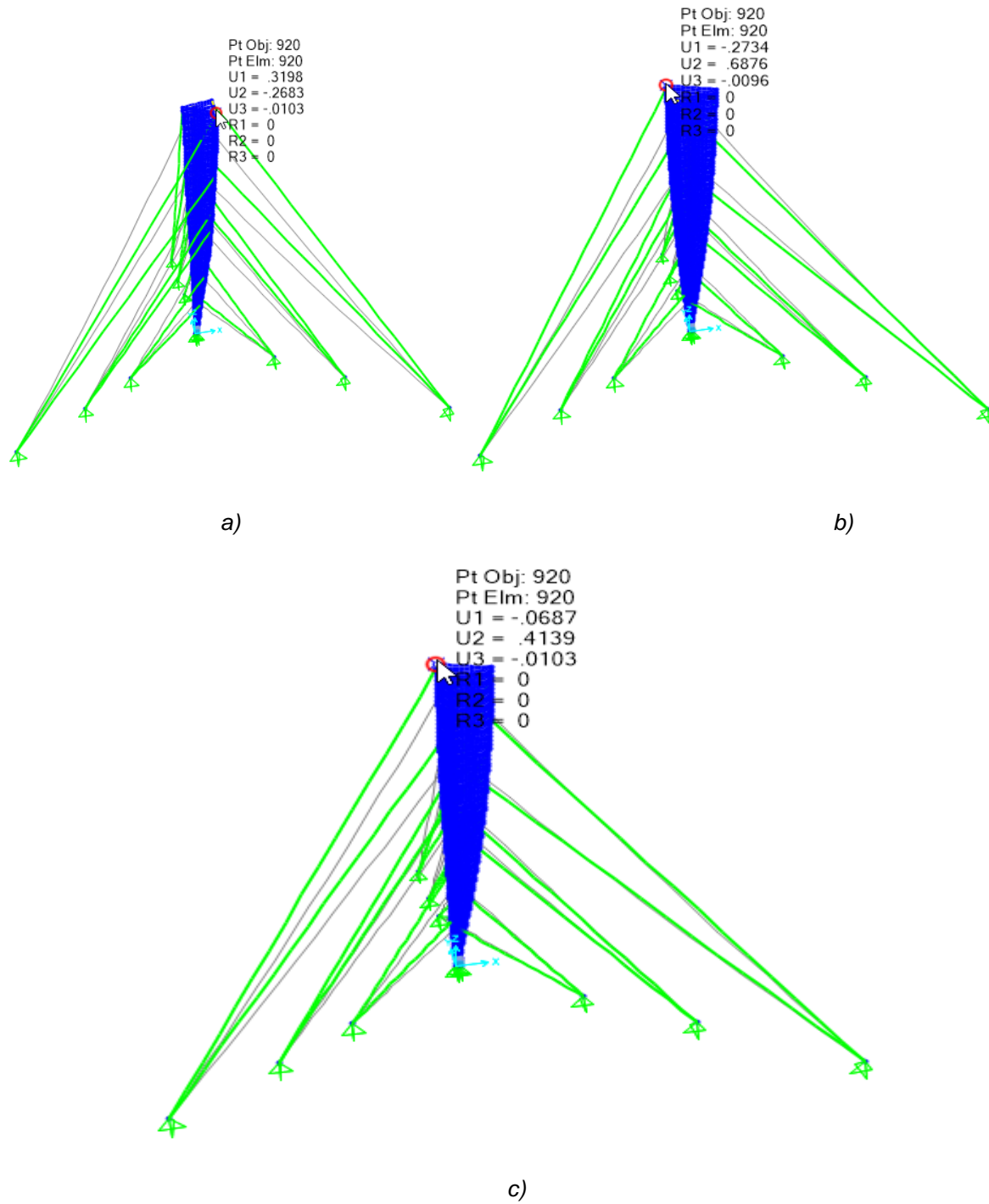


Fig.10 Deformaciones obtenidas categoria 3. a) a 0°. b) a 90°. c) a 60°.