

**PARÁMETROS DE ESTUDIO, FUENTES Y NORMATIVA PARA EL
ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO SOBRE UNA TORRE DE
TELECOMUNICACIONES**

Ing. SERGIO ANDRÉS TORRES PARADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA

2016

**PARÁMETROS DE ESTUDIO, FUENTES Y NORMATIVA PARA EL
ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO SOBRE UNA TORRE DE
TELECOMUNICACIONES**

Ing. SERGIO ANDRÉS TORRES PARADA

MONOGRAFÍA PARA OPTAR AL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
ESTRUCTURAS

Director:

Dr. Ing. ANDRÉS FERNANDO GUZMÁN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTADA DE INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
ESPECIALIZACIÓN EN ESTRUCTURAS
BUCARAMANGA

2016

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
1. ESPECIFICACIONES TECNICAS DE LAS TORRES DE TELECOMUNICACIONES	14
1.1. ESTRUCTURACIÓN	14
1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES AUTOSOPORTADAS DE CELOSÍA .	16
1.2.1. Torres autosoportadas cuadradas	16
1.2.2. Torres autosoportadas triangulares	18
1.3. ACEROS ESTRUCTURALES PRECALIFICADOS PARA LA FABRICACIÓN DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES	19
1.3.1. Disposiciones generales	19
1.3.2. Fabricación	19
1.3.3. Control de corrosión.....	20
1.3.4. Sujetadores y accesorios	20
1.3.5. Reparaciones.....	20
1.3.6. Propiedades mecánicas de aceros estructurales al carbón	20
2. CARGAS	22
2.1. DISPOSICIONES GENERALES	22
2.2. VELOCIDAD BÁSICA DEL VIENTO	24
2.2.1. Estimación de las velocidades básicas del viento de diseño a partir de datos meteorológicos regionales.....	24
2.2.1.1. Regiones especiales para viento	24

2.2.1.2.	Estimación de la velocidad básica del viento a partir de información climatológica regional	25
2.3.	CATEGORÍAS DE EXPOSICIÓN.....	27
2.4.	COEFICIENTE DE PRESIÓN DINÁMICA.....	28
2.5.	EFFECTOS TOPOGRÁFICOS.....	28
2.5.1.	Velocidad del viento sobre colinas, cuchillas y escarpas	28
2.5.2.	Categorías topográficas	29
2.5.3.	Estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras	32
2.5.4.	Factor topográfico	32
2.6.	FACTOR DE RÁFAGA (Gh).....	33
2.6.1.	Estructuras de celosía autosoportadas o acarteladas	33
2.7.	CARGA DE VIENTO DE DISEÑO.....	34
2.7.1.	Fuerza de viento de diseño sobre la estructura (Fst).....	35
2.7.1.1.	Área proyectada efectiva de la estructura de celosía	35
2.7.2.	Presión dinámica	37
2.8.	CARGAS SÍSMICAS	37
2.8.1.	Procedimiento de análisis modal equivalente (método 2)	37
2.8.1.1.	Calculo de la frecuencia fundamental de la estructura autosoportada de celosía	37
2.8.1.2.	Determinación de las fuerzas sísmicas para cada nivel de la estructura..	38
2.8.1.2.1.	Aceleración de respuesta espectral de diseño para periodos cortos (SDs)	39
2.8.1.2.2.	Aceleración de respuesta espectral de diseño para 1 segundo (SD1)..	39

2.8.1.3.	Análisis de la estructura estáticamente usando las fuerzas sísmicas como cargas externas.....	41
2.9.	COMBINACIONES DE CARGA PARA ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA	41
3.	MODELAMIENTO DE CARGAS EN PLS-CADD TOWER	43
3.1.	CARGAS NORMA ANSI/TIA 222-G	44
3.1.1.	Provisiones para terremotos	44
3.2.	DATOS DE CARGA PARA ANSI/TIA 222-G.....	45
4.	MODELAMIENTO EN TOWER DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADA DE 60m	47
4.1.	DATOS GENERALES DEL MODELO.....	47
4.2.	MATERIALES DE LA ESTRUCTURA.....	49
4.3.	PERFILES ESTRUCTURALES.....	50
4.4.	ELEMENTOS DE CONEXIÓN PARA LOS PERFILES ESTRUCTURALES.....	50
4.5.	LISTADO DE EQUIPOS.....	51
4.6.	COMBINACIÓN DE CARGAS.....	51
4.7.	DATOS DE ENTRADA DEL ANÁLISIS.....	53
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO A VIENTO DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADA DE 60m.....	54
5.1.	USO MÁXIMO DE LOS ELEMENTOS.....	54
5.2.	DESPLAZAMIENTOS Y ROTACIONES DE LOS ELEMENTOS	55
6.	CONCLUSIONES.....	57
	BIBLIOGRAFIA	59

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. Tipos de torres para sistemas de comunicaciones	14
Figura 2. Clasificación de torres cuadradas autosoportadas	17
Figura 3. Clasificación de las torres con sección triangular	19
Figura 4. Zonas de amenaza eólica	26
Figura 5. Categoría topográfica 1.....	29
Figura 6. Categoría topográfica 2.....	30
Figura 7. Efecto acelerador del viento.....	30
Figura 8. Categoría topográfica 3.....	31
Figura 9. Efecto acelerador del viento para la categoría topográfica 3-4	31
Figura 10. Categoría topográfica 4.....	32
Figura 11. Cargas ANSI/TIA 222-G.....	45
Figura 12. Datos generales del proyecto	47
Figura 13. Opciones EIA	48
Figura 14. Opciones de optimización	48
Figura 15. Opciones de salida.....	49
Figura 16. Materiales de la estructura.....	49
Figura 17. Perfiles estructurales y propiedades	50
Figura 18. Elementos de conexión para los perfiles estructurales	50
Figura 19. Listado de equipos instalados.....	51
Figura 20. Ubicación de equipos en la estructura	51
Figura 21. Combinaciones de carga TIA-222-G.....	52
Figura 22. Modelo geométrico torre 60m.	52
Figura 36. Uso máximo de los elementos para cada caso de carga.....	54
Figura 24. Máxima compresión en los elementos para cada caso de carga.....	55
Figura 25. Desplazamiento de los elementos para cada caso de carga	56

ÍNDICE DE TABLAS

TABLAS

Tabla 1. Aceros estructurales precalificados.....	21
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros estructurales al carbón.....	21
Tabla 3. Clasificación de las estructuras.....	23
Tabla 4. Factor de probabilidad de la dirección del viento	23
Tabla 5. Factores de importancia.....	23
Tabla 6. Coeficientes según la categoría de exposición	28
Tabla 7. Coeficientes de categoría topográfica	33
Tabla 8. Factores de dirección del viento.....	36
Tabla 9. Definición de la clase de un predio	40
Tabla 10. Coeficiente del predio dependiente de la aceleración, F_a	40
Tabla 11. Coeficiente del predio dependiente de la velocidad, F_v	41
Tabla 12. Parámetros de la estructura	52

RESUMEN

TITULO:

PARÁMETROS DE ESTUDIO, FUENTES Y NORMATIVA PARA EL ANÁLISIS DE FUERZAS DE VIENTO SOBRE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES*

AUTOR:

SERGIO ANDRES TORRES PARADA**

PALABRAS CLAVES:

Parámetros de estudio, normativa, fuerza de viento, torre de telecomunicaciones.

DESCRIPCION

Las torres de telecomunicaciones cumplen un fin muy importante en el desarrollo de las comunidades, que es el de brindar soporte para los equipos que transmiten la señal microondas para que los equipos tecnológicos funcionen y estén conectados a la red tanto de voz como de datos a nivel mundial. Para esto, se pretende hacer un estudio de los parámetros, fuentes y normativas que actualmente están vigentes en Colombia para hacer un análisis de las fuerzas de viento que puedan afectar el debido comportamiento de una torre de telecomunicaciones. Es de vital importancia que estas estructuras se mantengan en óptimas condiciones luego de que sean sometidas a eventos extremos como ráfagas de viento a grandes velocidades o sismos; esto para que ante la eventualidad de posibles estados de emergencia, sea más fácil la comunicación entre los diferentes entes que estén interactuando en las búsquedas y rescates. Por esto se invita a que se haga un detallado análisis y diseño de las torres de telecomunicaciones, evaluando todos los parámetros que deben ser esenciales y se vean como estructuras fundamentales para el correcto y continuo desarrollo de la civilización. A través de este estudio se dieron las diferentes fuentes normativas para revisar la totalidad de los parámetros que se tienen que aplicar para un correcto análisis y diseño de una torre de telecomunicaciones.

*Monografía

**Facultada de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Especialización en Estructuras. Director Álvaro Viviescas.

ABSTRACT

TITLE:

PARAMETERS OF STUDY, SOURCES AND NORMATIVE FOR THE ANALYSIS OF STRENGTHS OF WIND ON A TOWER OF TELECOMMUNICATIONS*

AUTHOR:

SERGIO ANDRES TORRES PARADA**

KEY WORDS:

Parameters of study, normative, strength of wind, tower of telecommunications.

DESCRIPTION

Telecommunication towers play a very important purpose in the development of communities, which is to provide support for computers that transmit microwave signal for technological equipment functions and are connected to the network both voice and data at the level worldwide. For this, it is intended to make a study of the parameters, sources and regulations currently in force in Colombia for analysis of wind forces that may affect the proper behavior of a telecommunications tower. It is vital that these structures remain in good condition after being subjected to extreme events such as gusts of wind at high speeds or earthquakes; this so that in the event of possible states of emergency, easier communication between the different entities that are interacting searches and rescues. For this is invited to a detailed analysis and design of telecommunication towers is done by evaluating all parameters that must be seen as essential and fundamental structures for the proper and continuous development of civilization. Through this study the different normative sources were given to review all of the parameters that must be applied for proper analysis and design of a telecommunications tower.

* Monograph

**Faculty of Mechanical Engineering Physics. School of Civil Engineering. Specialization in Structures. Director Alvaro Viviescas.

INTRODUCCIÓN

Con el fin de dar a conocer otros campos de acción en la ingeniería civil y con un enfoque en el campo de las telecomunicaciones, donde es de vital importancia el análisis de las torres de celosía que soportan los equipos que suministran el servicio de voz y datos en nuestro país, se emprenderá un análisis del comportamiento a viento para estas torres, ya que es el factor que rige los diseños y optimización de los sus materiales.

No obstante, en la constante evolución de la tecnología, la expansión que hoy por hoy se está presentando en este campo es considerable, lo que conlleva aumentar el recurso humano de ejecución e investigación.

La infraestructura de telecomunicaciones, al igual que cualquier otra estructura que preste un servicio, debe cumplir con rigurosos factores normativos y garantizar su estabilidad ante cualquier evento sísmico o en nuestro caso, para algunas velocidades máximas de ráfaga de vientos.

El presente documento, tendrá como fin el analizar y comparar algunos de los estudios realizados a las torres de telecomunicaciones y de este modo concluir cómo es el comportamiento de estas ante la presencia del viento y de qué factores depende su exposición.

La tecnología móvil, es un camino muy importante para alcanzar el desarrollo, por lo que debemos garantizar el mejor funcionamiento de la infraestructura que va a soportar las cargas de los equipos de transmisión.

Un dato no menos relevante para enfocarnos en el análisis de la infraestructura de telecomunicaciones, es ante el caso de un evento natural extremo, llámese viento o sismo, se debe garantizar la idoneidad y estabilidad de las torres para dar a las brigadas de rescate y búsqueda mayor facilidad para realizar sus labores, siendo así la infraestructura de telecomunicaciones vital para el correcto desarrollo de la sociedad.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Estudiar los parámetros, fuentes de información disponibles y normativas para evaluar el comportamiento a viento de una torre de telecomunicaciones.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las principales fuentes de información (bases de datos) para la determinación de velocidades de viento y otras características climatológicas para zonas específicas a nivel mundial.
- Identificar las diferentes especificaciones técnicas de las torres de telecomunicaciones.
- Estudiar la implementación de la normativa EIA/TIA-222-G para el comportamiento a viento de una torre de telecomunicaciones.
- Definir y analizar los tipos de factores influyentes en la evaluación de la carga viento en una torre de telecomunicaciones a partir de las especificaciones de análisis disponibles.
- Analizar las diferencias del comportamiento de una torre de telecomunicaciones variando las distintas velocidades de viento y características topográficas, descritas en la norma EIA/TIA-222-G.

1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LAS TORRES DE TELECOMUNICACIONES

1.1. ESTRUCTURACIÓN

Se entiende por estructuración la configuración lógica y ordenada de varios elementos que constituirán un solo conjunto, para cumplir funciones y características determinadas. La estructuración que comúnmente se utiliza para la instalación de antenas de telecomunicaciones son las torres de celosía, las que pueden estar arriostradas (atirantadas) y ser autoportadas, sin embargo, también se utilizan monopolos (estructuras tubulares de acero que vencen grandes alturas). En la Figura 1 se indican esquemáticamente los diferentes tipos de estructuración de torres utilizadas para la instalación de las antenas en los sistemas de comunicación; de izquierda a derecha se muestran una torre de celosía arriostrada, un monopolo y una torre de celosía autoportada (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010).

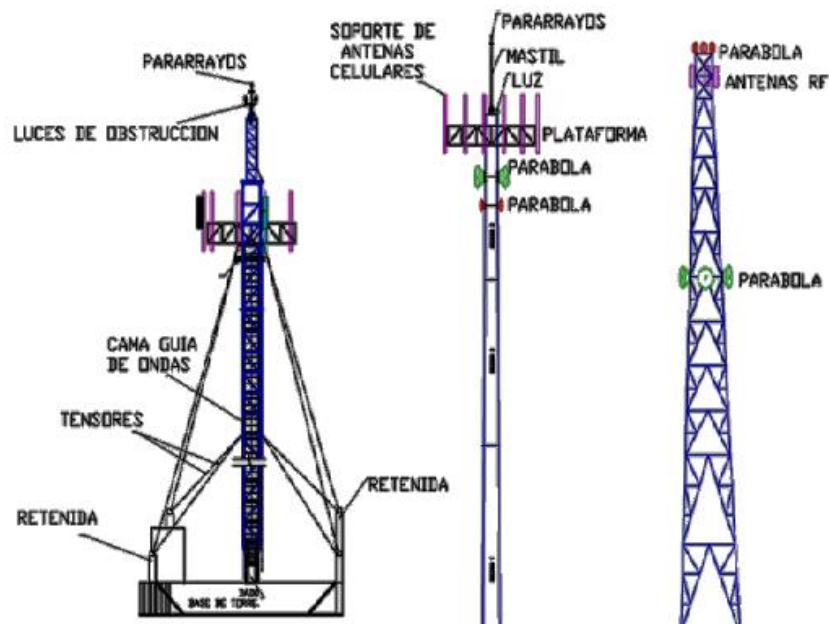


Figura 1. Tipos de torres para sistemas de comunicaciones¹

¹ (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010)

Las torres de celosía arriostradas o atirantadas están apoyadas en forma articulada en un solo punto; son torres con una relación altura-ancho relativamente alta, requieren de tensores para mantener su estabilidad. Los tensores (cables) están anclados en bloques de concreto (Díaz Salambay, 2015).

Los monopolos están estructurados con perfiles tubulares y se instalan regularmente en lugares donde se requiere conservar la estética, ya que de los tres tipos de estructuras antes definidas, los monopolos son los que ocupan menos espacio y en ocasiones los monopolos se pintan o mimetizan para armonizar con la zona en donde han sido instalados (Díaz Salambay, 2015).

Las torres de celosía autosoportadas se instalan fundamentalmente cuando existe un limitado espacio para la implementación y/o cuando la cantidad de antenas a instalarse es tal que se hace necesario su colocación en este tipo de torres (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010).

En la revista Dinero para su publicación web *¿Qué pasa con las antenas de telecomunicaciones en Colombia?* Recuperado el 2 de Junio de 2015, de <http://www.dinero.com/edicion-impres/negocios/articulo/antenas-para-telefonía-movil-4g-colombia/205415>, indica que *“según datos de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), en el país hay entre 12.000 y 15.000 antenas o sitios de comunicación instalados para atender todo tipo de servicios de comunicación inalámbrica. Sin embargo, se necesitan entre 4.000 y 7.000 sitios o torres más para satisfacer la creciente demanda de los usuarios”*.

Los grandes operadores de voz y datos en Colombia como lo son Telefónica, Claro, Tigo y Avantel, cuentan con infraestructura propia y en gran mayoría para la integración de sus equipos en sitios arrendados.

American Tower Company (ATC) y en total acuerdo con lo que nos explica la revista Dinero *“ATC es un jugador importante en la construcción de antenas de telecomunicaciones”*, siendo una empresa consolidada en los Estados Unidos de América y que por la saturación de su mercado, ha decidido incursionar en

mercados alternos como lo es Colombia y de esta manera a llegado dando un gran salto comprando más de 2.000 unidades de torres a Colombia Móvil S.A. E.S.P. (Tigo). ATC es hoy día el mayor administrador de torres de telecomunicaciones en Colombia, brindando el servicio de arrendamiento a operadores de voz y datos para que instalen sus equipos y puedan cumplir con las metas de cobertura exigidas por el ministerio colombiano de telecomunicaciones.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LAS TORRES AUTOSOPORTADAS DE CELOSÍA

Las torres de telecomunicaciones comúnmente construidas en Colombia son del tipo autosoportadas, siendo estas las que permiten satisfacer la mayoría de los requerimientos de las empresas prestadoras de servicios de telecomunicaciones porque cuentan con una gran capacidad de carga y fácil acceso para la optimización de la señal. Estas torres están formadas por marcos de celosía con perfiles estructurales de acero y se apoyan en tres o cuatro patas (piernas) que forman el sistema estructural principal.

1.2.1. Torres autosoportadas cuadradas

Las torres clasificadas como tipo T1 son de sección transversal cuadrada que varía con la altura (Figura 2 (a)). Sus piernas están formadas por perfiles circulares huecos (OC), las cuerdas horizontales y las diagonales son perfiles de lados iguales (LI). La forma de la celosía es en zigzag doble con elementos horizontales, es decir, en cada extremo de las diagonales se ubica una cuerda horizontal. Esta configuración se mantiene en todo lo alto de la torre (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010).

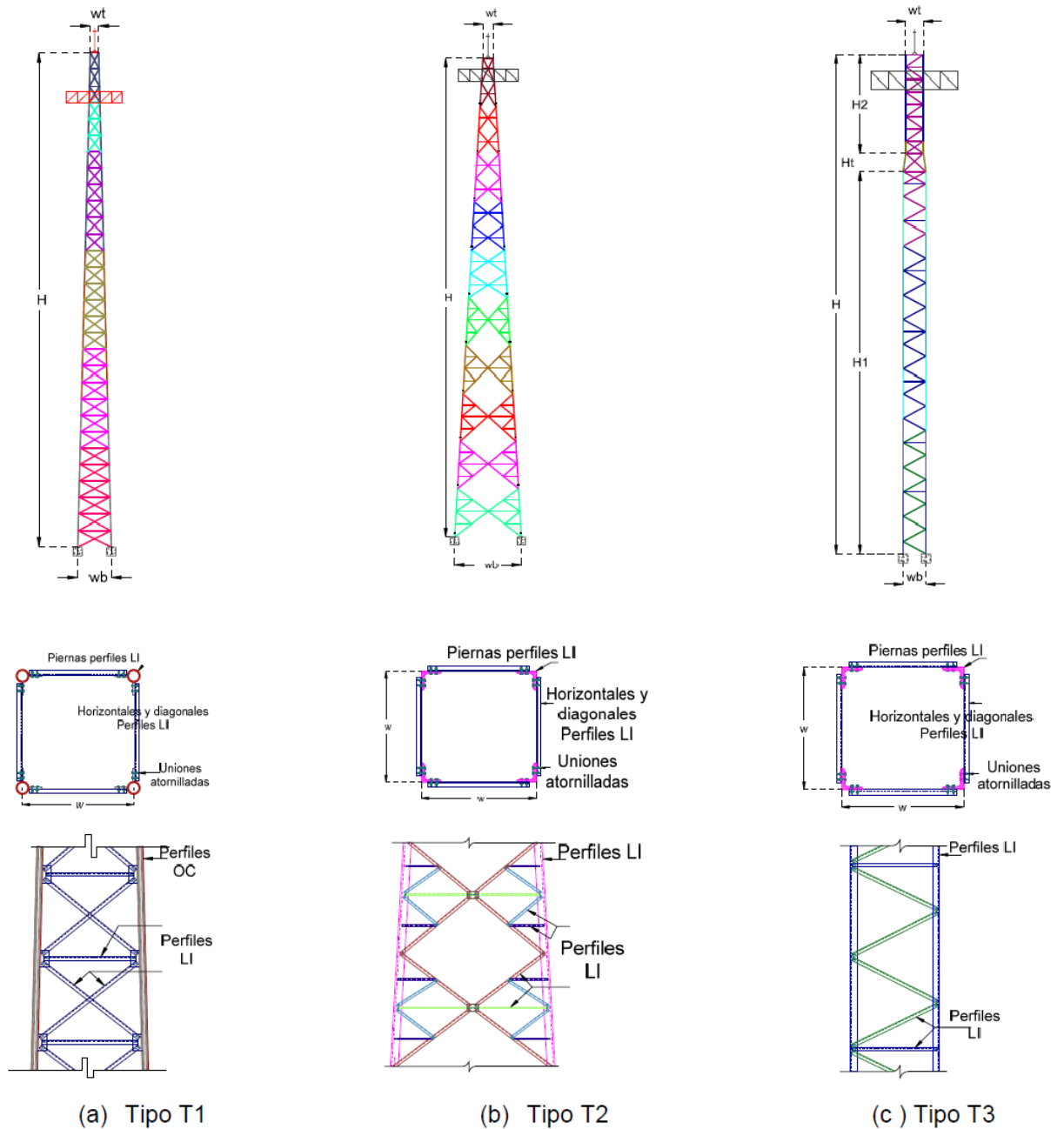


Figura 2. Clasificación de torres cuadradas autoportadas²

Las torres clasificadas como T2 (Figura 2 (b)) son torres con sección cuadrada con piernas formadas por ángulos de lados iguales (LI) y cuya sección varía con la altura, la celosía en forma de rombo y está integrada por una celosía principal

² (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010)

y una celosía secundaria (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010).

Las torres tipo T3 (Figura 2 (c)) tienen sección transversal cuadrada constante que varía en tres tramos. A partir de la base a una altura H1, la sección transversal cambia de tamaño mediante un tramo de transición con altura Ht; la sección restante tiene altura H2. Los elementos que forman las piernas de la torre, las cuerdas horizontales y diagonales son ángulos de lados iguales (LI). La celosía es en forma de zigzag sencillo (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010).

1.2.2. Torres autoportadas triangulares

Una buena forma para identificar las torres autoportadas triangulares, es según lo describe (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010), *“Las torres tipo T4 Figura 3 (a) cuentan con una altura que oscila entre 19 m a 50 m. Estas torres tienen sección transversal triangular constante con la altura, con elementos estructurales OC en las piernas y en las cuerdas horizontales y diagonales perfiles LI. La forma de la celosía es en zigzag doble. Por lo general las torres T4 tienen ubicadas en su parte superior plataformas de trabajo y las antenas tipo RF³ y MW⁴; además cuentan con una cama guía y líneas de conducción de cables, que van de la parte baja de la torre (caseta) hasta la parte superior”*.

Igualmente (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010), nos explica que *“Las torres tipo T5 tienen una altura que van de 22 m hasta 60 m. Las piernas están formadas por elementos estructurales (OC) y las cuerdas horizontales y diagonales con perfiles (LI) Figura 3 (b). Se caracterizan por tener dos zonas con diferente altura, la primera con una altura H1 con sección transversal variable con celosía en forma de cruz y la segunda con sección transversal constante con altura H2”*.

³ RF: Antena de radio frecuencia

⁴ MW: Antena microondas (MicroWave)

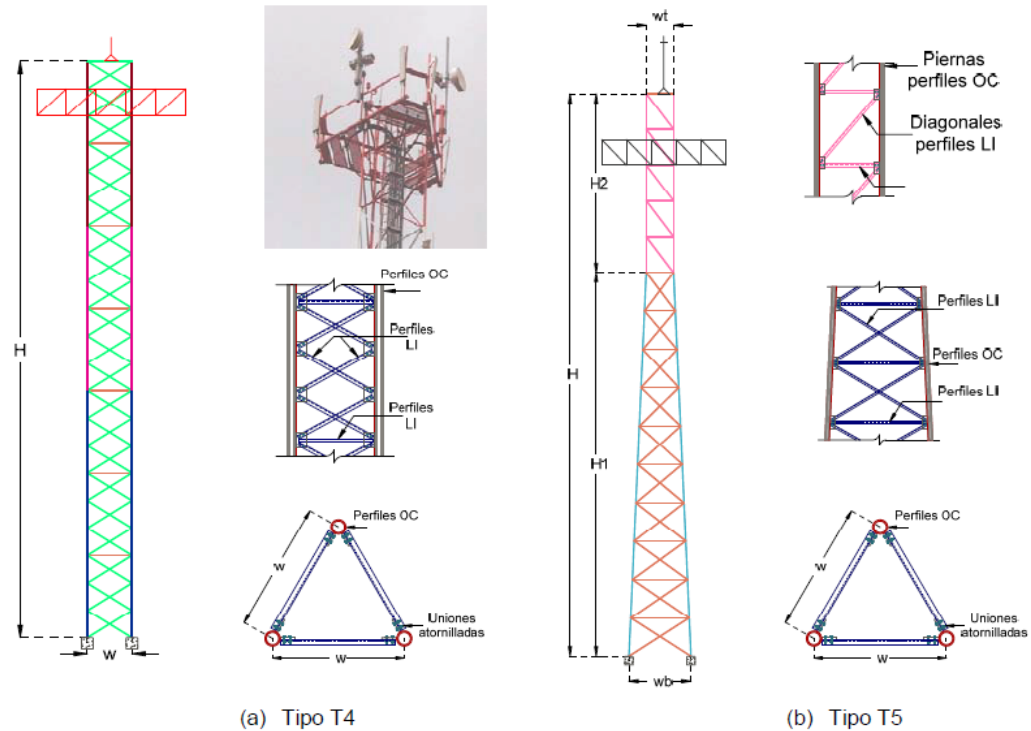


Figura 3. Clasificación de las torres con sección triangular⁵

1.3. ACEROS ESTRUCTURALES PRECALIFICADOS PARA LA FABRICACIÓN DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES

1.3.1. Disposiciones generales

Los aceros estructurales⁶ que se utilicen para analizar o diseñar una torre de telecomunicaciones deberán satisfacer una de las normas para acero precalificadas listadas en la Tabla 1. (TIA, 2012).

1.3.2. Fabricación

La fabricación se deberá realizar de acuerdo con la norma ASTM A6-14 (TIA, 2012).

⁵ (Hernandez Barrios, Rangel Toral, & López López, 2010)

⁶ Aceros estructurales: Aceros usados para todos los elementos y componentes estructurales excepto riendas, sujetadores y accesorios

1.3.3. Control de corrosión

En este aspecto tan importante como lo es el control de corrosión de los elementos de acero estructural y según lo dice Daniel Crabtree, presidente del comité G01 de la ASTM “La corrosión es una parte de la vida y siempre va a estar aquí”, la norma (TIA, 2012) indica que “Los elementos de acero estructural se deberán galvanizar por inmersión en caliente de acuerdo con la norma ASTM A123/A123M-15 (Para elementos estructurales de tamaños medianos y grandes) y ASTM A153/A153M-16 (Para elementos pequeños)”.

1.3.4. Sujetadores y accesorios

Los sujetadores y accesorios se deberán galvanizar de acuerdo con las normas ASTM A153-16 (galvanizado por inmersión en caliente) o ASTM B695 clase 50 (galvanizado mecánico). Los métodos alternativos deberán proveer un control de la corrosión como mínimo igual a los requisitos establecidos en ASTM A153-16 (TIA, 2012).

1.3.5. Reparaciones

Las reparaciones se deberán realizar de acuerdo con la norma ASTM A780/A780M-09(2015) o según lo requieran los proveedores de procesos de control de la corrosión alternativos (TIA, 2012).

1.3.6. Propiedades mecánicas de aceros estructurales al carbón

En el mercado nacional se pueden encontrar una gran variedad de aceros estructurales que según su uso final se pueden identificar en la Tabla 1.

Según (Apolo Sócola & Cangás Herrera, 2014) *“En los aceros de alta resistencia, las propiedades mecánicas se obtienen por medio de elementos de aleación como el níquel, manganeso, wolframio, molibdeno, cobalto, silicio, cobre, titanio, circonio, plomo, selenio, aluminio, boro y niobio.”*

B-254 (ASTM A36)	Acero estructural.
B-99 (ASTM A529)	Acero estructural con límite de fluencia mínimo de 290 MPa (2 950 kg/cm ²).
B-282 (ASTM A242)	Acero estructural de baja aleación y alta resistencia.
B-284 (ASTM A572)	Acero estructural de alta resistencia y baja aleación al manganeso-vanadio.
(ASTM A588)	Acero estructural de alta resistencia y baja aleación de hasta 100 mm de grueso, con límite de fluencia mínimo de 345 MPa (3 515 kg/cm ²).
(ASTM A913)	Perfiles de acero de alta resistencia y baja aleación, de calidad estructural, producidos por un proceso de tratamiento térmico especial.
(ASTM A992)	Acero estructural para perfiles H laminados para uso en edificios.
B-177 (ASTM A53, grado B)	Tubos de acero, con o sin costura.
B-199 (ASTM A500)	Tubos de acero al carbono para usos estructurales, formados en frío, con o sin costura, de sección circular o de otras formas.
B-200 (ASTM A501)	Tubos de acero al carbono para usos estructurales, formados en caliente, con o sin costura.

Tabla 1. Aceros estructurales precalificados⁷

Cada una de las referencias de aceros listadas en la Tabla 1, cuentan con distintas propiedades mecánicas que se indican en la Tabla 2.

Nomenclatura		F _y (3)		F _u (4)	
NMX (1)	ASTM (2)	MPa	kg/cm ²	MPa	kg/cm ²
B-254	A36	250	2 530	400 a 550	4 080 a 5 620
B-99	A529	290	2 950	414 a 585	4 220 a 5 975
B-282	A242	290	2 950	435	4 430
		320	3 235	460	4 710
		345	3 515	485	4 920
B-284	A572	290	2 950	414	4 220
		345	3 515	450	4 570
		414	4 220	515	5 270
		450	4 570	550	5 620
	A992	345	3 515	450 a 620	4 570 a 6 330
B-177	A53	240	2 460	414	4 220
B-199	A500 (5)	320	3 235	430	4 360
B-200	A501	250	2 530	400	4 080
	A588	345 (6)	3 515 (6)	483 (6)	4 920 (6)
	A913	345 a 483 (7)	3 515 a 4 920 (7)	448 a 620 (7)	4 570 a 6 330 (7)

Tabla 2. Propiedades mecánicas de los aceros estructurales al carbón⁸

⁷ (AHMSA, 2013)

⁸ (AHMSA, 2013)

2. CARGAS

2.1. DISPOSICIONES GENERALES

Las estructuras que soportan antenas tienen geometrías y características de respuesta poco habituales frente a las cargas de viento. Los requisitos de la norma STRUCTURAL STANDARD ANTENNA SUPPORTING STRUCTURES AND ANTENNAS TIA-222 Revisión G, Diciembre 20, 2012, toma en cuenta los efectos de amplificación de las cargas que provocan las ráfagas de viento, en resonancia con las vibraciones en el sentido del viento de las estructuras autosoportadas y atirantadas que soportan antenas; para eso, la norma (TIA, 2012), recomienda tener presente las siguientes indicaciones antes de empezar la evaluación o diseño de cualquier proyecto:

- Se deberán determinar la velocidad básica del viento sin hielo, V^9 , la velocidad básica del viento con hielo, V_i , y el espesor de hielo de diseño de acuerdo con el subcapítulo 2.6.4.; Para Colombia, no se tendrá en cuenta la acción del hielo por la poca probabilidad de ocurrencia de este efecto en las áreas urbanas y rurales de Colombia.
- Se deberá determinar un factor de importancia, I , de acuerdo con la Tabla 5. Factores de importancia, con base en la clasificación de la estructura listada en la Tabla 3. Clasificación de las estructuras.
- Se deberá determinar un factor de probabilidad de la dirección del viento, K_d , de acuerdo con la Tabla 4. Factor de probabilidad de la dirección del viento.
- Se deberán determinar una categoría de exposición y un coeficiente de presión dinámica, K_z , para el sitio de emplazamiento de acuerdo con el subcapítulo 2.6.5 Categorías de exposición.
- Se deberán determinar una categoría topográfica y un factor topográfico, K_{zt} , de acuerdo con subcapítulo 2.6.6 Efectos topográficos.

⁹ V: Velocidad de una ráfaga de viento de 3 segundos a una altura de 10 m sobre el nivel del terreno para una categoría de exposición C tal como se define en 2.6.5.1 para un intervalo de ocurrencia de 50 años (TIA, 2012).

- Se deberán determinar un factor de ráfaga, Gh, de acuerdo con el subcapítulo 2.6.7 Factor de ráfaga.
- La fuerza de viento de diseño se deberá determinar de acuerdo con el subcapítulo 2.6.9 Carga de viento de diseño.

Descripción de la estructura	Clase
Estructuras que, debido a su altura, uso o ubicación, en caso de falla representan un riesgo bajo en términos de seguridad de las personas y/o daños a la propiedad, y/o estructuras utilizadas para servicios opcionales y/o en las cuales una demora en el restablecimiento de los servicios sería aceptable.	I
Estructuras que, debido a su altura, uso o ubicación, en caso de falla representan un riesgo considerable en términos de seguridad de las personas y/o daños a la propiedad, y/o estructuras que se utilizan para servicios que se pueden prestar por otros medios.	II
Estructuras que, debido a su altura, uso o ubicación, en caso de falla representan un riesgo elevado en términos de seguridad de las personas y/o daños a la propiedad, y/o estructuras que se utilizan principalmente para comunicaciones esenciales.	III

Tabla 3. Clasificación de las estructuras¹⁰

Tipo de estructura	Factor de probabilidad de la dirección del viento, K_d
Estructuras de celosía con secciones transversales triangulares, cuadradas o rectangulares incluyendo los accesorios	0.85
Estructuras tubulares tipo monoposte; estructuras de celosía con secciones transversales que no sean triangulares, cuadradas ni rectangulares; diseño por resistencia de los accesorios	0.95

Tabla 4. Factor de probabilidad de la dirección del viento¹¹

Clase de la estructura	Carga de viento sin hielo	Carga de viento con hielo	Espesor de hielo	Sismo
I	0.87	N/A	N/A	N/A
II	1.00	1.00	1.00	1.00
III	1.15	1.00	1.25	1.50

Nota: Las cargas de hielo y las cargas sísmicas no se aplican a las estructuras de la Clase I

Tabla 5. Factores de importancia¹²

¹⁰ (TIA, 2012)

¹¹ (TIA, 2012)

¹² (TIA, 2012)

2.2. VELOCIDAD BÁSICA DEL VIENTO

Como lo explica claramente el texto recuperado de <http://tecno.upc.edu/wintess/manual/Calc/AccionesViento.htm> “La velocidad básica del viento, se trata de un valor estadístico y está definido por la normativa vigente en cada país (que acostumbra a ir acompañada de mapas zonificados)”. Para Colombia y según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 “La velocidad básica de viento corresponde a la velocidad de una ráfaga de 3 segundos a una altura de 10 m por encima del suelo”.

2.2.1. Estimación de las velocidades básicas del viento de diseño a partir de datos meteorológicos regionales

Como señala la norma TIA-222-G, para las regiones que no estén categorizadas dentro de sus anexos, se podrán utilizar datos climatológicos disponibles por métodos estadísticos de valores extremos que tengan en cuenta el error de muestreo, el tiempo sobre el cual se promedia, la altura del anemómetro, la calidad de los datos y la exposición del terreno.

Para Colombia, la velocidad básica, V , usada en la determinación de las cargas de viento de diseño edificios y otras estructuras se tomará de la Figura 4. Figura B.6.4-1 Zona de amenaza eólica¹³, excepto con lo especificado en las secciones B.6.5.4.1 y B.6.5.4.2. Se supondrá que el viento proviene de cualquier dirección horizontal (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

2.2.1.1. Regiones especiales para viento

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, dice que “La velocidad básica de viento se incrementa donde existan registros o la experiencia indique velocidades de viento mayores que las expresadas en la Figura B.6.4-1 Zona de amenaza eólica”. Para las regiones especiales de la

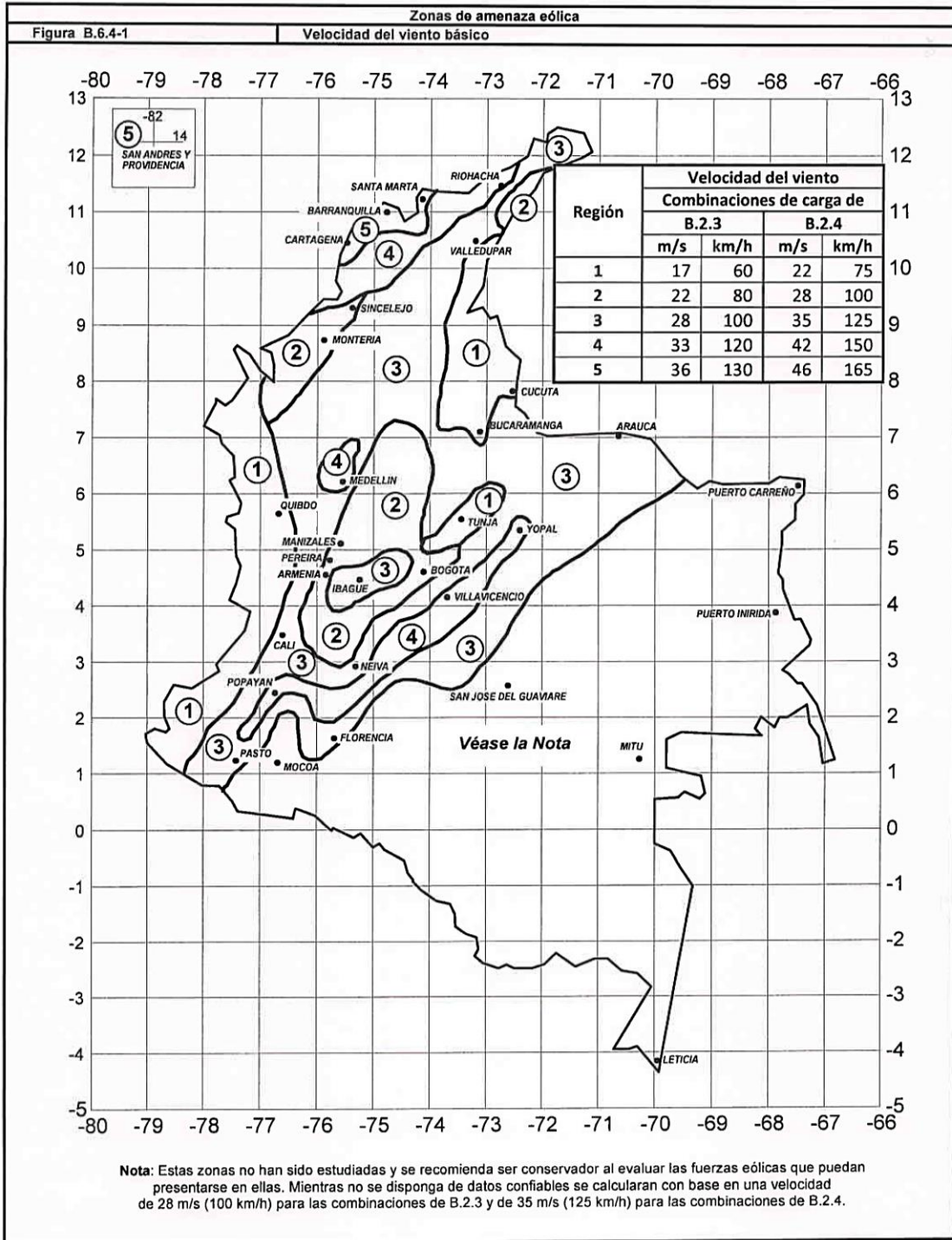
¹³ La tabla se modifica en su versión original acorde a lo descrito en el Decreto Número 0340 del 13 de febrero de 2012. (MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2012)

Figura 4, se deberán estudiar los casos particulares, para determinar si existen condiciones de viento inusuales. Por otro lado, las autoridades respectivas ajustarán los valores de la Figura 4. Zona de amenaza eólica, para reflejar velocidades de viento locales mayores. Este ajuste se debe hacer basado en información meteorológica y una estimación de la velocidad básica del viento según las especificaciones de la sección B.6.5.4.2. (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

2.2.1.2. Estimación de la velocidad básica del viento a partir de información climatológica regional

Los datos climatológicos regionales se pueden usar en lugar de la velocidad básica de viento dadas en la Figura 4. Zona de amenaza eólica, solamente cuando la autoridad competente considere que se han utilizado procedimientos estadísticos aprobados para el análisis de valores extremos en el tratamiento de los datos y se han tenido en cuenta la longitud de registros, el error de muestreo, el tiempo promedio, la altura de anemómetro, la calidad de los datos y la exposición del terreno (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Según el DECRETO NÚMERO 0340, por el cual se modifica parcialmente el Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10, “...*Mientras no se disponga de datos confiables con base en una velocidad de 28 m/s para combinaciones del método de estado límite de servicio y de 35 m/s para el método de resistencia, se recomienda ser conservadores al evaluar las fuerzas eólicas que puedan presentarse en ellas*” y se genera la Figura 4. Zonas de amenaza eólica.



B-39

Figura 4. Zonas de amenaza eólica¹⁴

¹⁴ (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

2.3. CATEGORÍAS DE EXPOSICIÓN

Para cada proyecto, se deberá determinar una categoría de exposición que refleje adecuadamente las características de las irregularidades superficiales del terreno en el sitio de emplazamiento. Se deberán tomar en cuenta las variaciones de la rugosidad superficial del terreno que surjan como consecuencia de la topografía natural y la vegetación, así como las construcciones existentes. Las estructuras se deberán asignar a una de las siguientes categorías de exposición, según lo indica la (TIA, 2012):

- Exposición B: Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosos obstáculos de tamaño mayor o igual al de una vivienda unifamiliar poco separados entre sí. El uso de esta exposición se deberá limitar a aquellas áreas en las cuales la estructura este rodeada en todas las direcciones por de la Exposición B en una distancia de al menos 800 m o veinte veces la altura de la estructura, cualquiera sea el valor que resulte mayor.
- Exposición C: Terreno abierto con obstáculos dispersos de altura generalmente inferior a 9.1 m. Esta categoría incluye el campo abierto, los prados y las franjas costeras en las regiones de huracanes.
- Exposición D: Franjas costeras planas y sin obstáculos expuestas a vientos provenientes de aguas abiertas (excluyendo las franjas costeras en las regiones de huracanes) en una distancia de al menos 1.61 km. Las franjas costeras de Exposición D incluyen los cursos de agua interiores, los lagos y las áreas costeras fuera de las regiones de huracanes. La Exposición D se extiende tierra adentro en una distancia de 200 m o veinte veces la altura de la estructura, cualquiera sea el valor que resulte mayor. Las marismas, las salinas y otros terrenos similares se deberán considerar como Exposición D.

2.4. COEFICIENTE DE PRESIÓN DINÁMICA

Con base en la categoría de exposición determinada en el subcapítulo 2.3 se deberá calcular un coeficiente de presión dinámica (K_z) según las ecuaciones 2.6.5.2 y 2.6.5.2 (TIA, 2012).

$$K_z = 2.01 \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad 2.6.5.2.$$

$$K_{zmin} \leq K_z \leq 2.01 \quad 2.6.5.2.$$

Donde:

z = Altura sobre el nivel del terreno en la base de la estructura.

z_g , α y K_{zmin} están tabulados en la Tabla 6.

Categoría de exposición	Z_g	α	K_{zmin}	K_e
B	1200 ft [366 m]	7.0	0.70	0.90
C	900 ft [274 m]	9.5	0.85	1.00
D	700 ft [213 m]	11.5	1.03	1.10

Tabla 6. Coeficientes según la categoría de exposición¹⁵

2.5. EFECTOS TOPOGRÁFICOS

2.5.1. Velocidad del viento sobre colinas, cuchillas y escarpas

Acorde a lo estipulado en (TIA, 2012), “El efecto del viento en las colinas, cuchillas y escarpas aisladas que representan cambios bruscos en la topografía general, cualquiera sea la categoría de exposición a la cual correspondan, se

¹⁵ (TIA, 2012)

deberá incluir el cálculo de las cargas de viento de diseño bajo las siguientes condiciones”:

- La colina, cuchilla o escarpa está aislada y no está obstruida por ninguna otra característica topográfica de altura comparable en un radio de 3.22 km medidas horizontalmente a partir del punto en el cual se determina la altura de la colina, cuchilla o escarpa.
- La colina, cuchilla o escarpa sobresale por un factor de dos o más por encima de la altura promedio de las características del terreno circundante en un radio de 3.22 km.
- La pendiente (relación vertical/horizontal) de la característica topográfica es mayor que 0.10.
- La altura de la característica topográfica es mayor o igual que 4.57 m para exposiciones C y D, y mayor o igual a 18m para exposición B.

2.5.2. Categorías topográficas

La norma TIA-222-G, plantea cuatro (4) categorías topográficas para la asignación al terreno según los siguientes parámetros:

- Categoría 1: Según la Figura 5, en esta categoría, el terreno no presenta cambio bruscos en su topografía general. La (TIA, 2012) indica que pueden ser terrenos llanos u ondulados y además no es necesario considerar el efecto acelerador del viento.

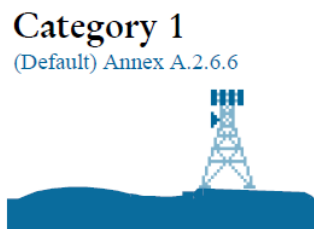


Figura 5. Categoría topográfica 1¹⁶

¹⁶ (WORLD TOWER INC, 2006)

- Categoría 2: Para esta categorización del terreno, se debe identificar claramente si la estructura será instalada en la cima de una escarpa o muy cerca de ella, como lo vemos en la Figura 6. La norma (TIA, 2012) dice que se debe considerar el efecto acelerador del viento en todas las direcciones por como se ve en la Figura 7. Otra apreciación importante que nos hace la norma (TIA, 2012) es que “Las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una escarpa u horizontalmente a una distancia mayor a 8 veces la altura de la escarpa a partir de su cresta podrán ser consideradas como pertenecientes a la categoría topográfica 1”.



Figura 6. Categoría topográfica 2¹⁷

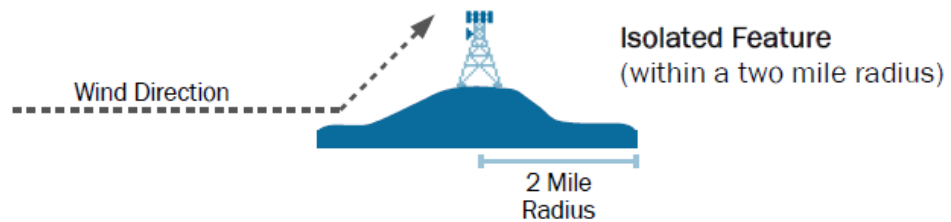


Figura 7. Efecto acelerador del viento¹⁸

- Categoría 3: En esta categoría se encuentran las estructuras que estén ubicadas en la mitad superior de una colina y para facilidad en la comprensión de lo descrito, se recrea la explicación en la Figura 8. Al igual que para la categoría 2 y por recomendación de la norma (TIA, 2012), se deberá considerar un efecto acelerador del viento en todas las direcciones por como se ve en la Figura 9. Igualmente, la norma (TIA,

¹⁷ (WORLD TOWER INC, 2006)

¹⁸ (WORLD TOWER INC, 2006)

2012) hace una exclusión para las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una colina y estas podrán ser consideradas como pertenecientes a la categoría topográfica 1.

Category 3



Figura 8. Categoría topográfica 3¹⁹

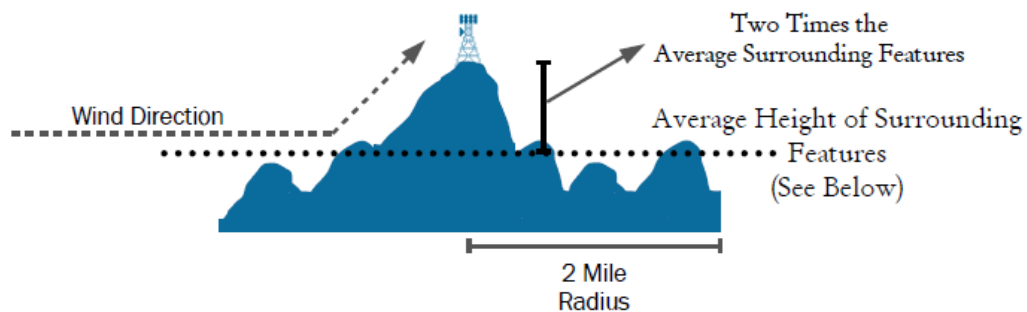


Figura 9. Efecto acelerador del viento para la categoría topográfica 3-4²⁰

- Categoría 4: Para esta última categoría topográfica y acorde a (TIA, 2012), se deberán incluir a este grupo, las estructuras que estén ubicadas en la mitad superior de una cuchilla y según se puede ver en la Figura 10. Al igual que para las categorías 2 y 3, se deberá considerar el efecto acelerador del viento. La norma (TIA, 2012), sigue dando la posibilidad de excluir de esta categoría a las estructuras que estén ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una cuchilla para incluirlas en la categoría 1.

¹⁹ (WORLD TOWER INC, 2006)

²⁰ (WORLD TOWER INC, 2006)

Category 4



Figura 10. Categoría topográfica 4²¹

2.5.3. Estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras

No se deberá usar el efecto acelerador del viento para tomar en cuenta las mayores cargas de viento requeridas debido a la altura para las estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras. La altura, z , sobre el nivel del terreno se deberá tomar con referencia al nivel de piso del edificio u otra estructura de apoyo (TIA, 2012).

2.5.4. Factor topográfico

Para el factor topográfico y según (TIA, 2012), “El efecto acelerador del viento se deberá incluir en el cálculo de las cargas de viento de diseño usando el factor K_{zt} ”:

$$K_{zt} = \left[1 + \frac{K_e K_t}{K_h} \right]^2 \quad 2.6.6.4$$

Donde:

K_h = Factor de reducción dependiente de la altura dado por la siguiente ecuación

$$= e^{\left(\frac{f \cdot z}{H}\right)};$$

e = Base de los logaritmos naturales = 2.718

K_e = Constante del terreno indicada en la Tabla 6.

K_t = Constante del terreno indicada en la Tabla 7.

²¹ (WORLD TOWER INC, 2006)

f = Factor de atenuación dependiendo de la altura indicado en la Tabla 7.

z = Altura sobre el nivel del terreno en la base de la estructura.

H = Altura de la cresta sobre el terreno circundante.

Kzt = 1.0 para la categoría topográfica 1.

Categoría topográfica	K _t	f
2	0.43	1.25
3	0.53	2.00
4	0.72	1.50

Tabla 7. Coeficientes de categoría topográfica²²

2.6. FACTOR DE RÁFAGA (Gh)

2.6.1. Estructuras de celosía autoportadas o acarteladas

Para estructuras de celosía autoportadas cuya altura sea mayor o igual que 183m el factor de ráfaga deberá ser igual a 1.00. Para estructuras cuya altura sea menor o igual a 137 m el factor de ráfaga deberá ser igual a 0.85 (TIA, 2012).

Igualmente, para las estructuras que estén entre 137 m y 187 m, el factor de ráfaga se tomará como una interpolación lineal, expresada de acuerdo a la ecuación 2.6.7.1.

$$Gh = 0.85 + 0.15 \left[\frac{h}{47.5} - 3.0 \right]; h \text{ en metros} \quad 2.6.7.1 \text{ (TIA, 2012)}$$

Donde;

h = Altura de la estructura

Nota: Para las estructuras instaladas sobre edificios u otras estructuras, la altura de la estructura (h), no deberá incluir la altura de la estructura que sirve de apoyo (TIA, 2012).

²² (TIA, 2012)

2.7. CARGA DE VIENTO DE DISEÑO

Como lo dice la TIA-222-G, “*Las cargas de viento de diseño deberán incluir la suma de las fuerzas de viento de diseño horizontales aplicadas a la estructura en dirección del viento más las fuerzas de viento de diseño sobre riendas y los accesorios*”. Se deberá asumir que todos los accesorios, incluyendo las antenas, soportes y cables, permanecerán intactos y unidos a la estructura (TIA, 2012).

El diseño por resistencia se deberá basar en la dirección del viento que provoquen las máximas respuestas. En el caso de las estructuras de celosía, para cada cara se deberá considerar todas las direcciones indicadas en la Figura 20 (TIA, 2012).

La fuerza de viento de diseño horizontal para el diseño por resistencia de los accesorios y sus uniones a las estructuras de apoyo se deberá determinar usando un factor de ráfaga de 1.0 y un factor de direccionalidad determinado de acuerdo con la Figura 16. No se deberá considerar ningún blindaje por parte de la estructura ($Ka^{23}=1.0$, ver 2.6.9.2) (TIA, 2012).

La fuerza de viento de diseño, F_w , se deberá expresar según la ecuación 2.6.9. (TIA, 2012).

$$F_w = F_{st} + F_A + F_G \quad 2.6.9.$$

Donde;

F_{st} = Fuerza de viento de diseño sobre la estructura de acuerdo con 2.6.9.1.

F_A = Fuerza de viento de diseño sobre los accesorios de acuerdo con 2.6.9.2.

F_G = Fuerza de viento de diseño sobre las riendas de acuerdo con 2.6.9.3.

No es necesario que las fuerzas de viento de diseño, $F_{ST} + F_A$, sean mayores que la fuerza de viento calculada para una estructura usando una relación de solidez de 1.0 (cara solida) más la carga de viento sobre los accesorios

²³ Ka: Factor de blindaje

montados externamente que estén fuera del área proyectada normal de la estructura en la dirección del viento. (TIA, 2012)

2.7.1. Fuerza de viento de diseño sobre la estructura (Fst)

Para la fuerza de viento de diseño, Fst, que será cargada en cada sección de la estructura, se tendrá que calcular según la ecuación 2.6.9.1 (TIA, 2012).

$$Fst = qz * Gh * (EPA)s \quad 2.6.9.1$$

Donde;

Fst = Fuerza de viento de diseño horizontal sobre la estructura en la dirección del viento.

qz = Presión dinámica de acuerdo con 2.6.9.6.

Gh = Factor de ráfaga de acuerdo con 2.6.7.

(EPA)s = Área proyectada efectiva de la estructura de acuerdo con 2.6.9.1.1 o 2.6.9.1.2.

2.7.1.1. Área proyectada efectiva de la estructura de celosía

Para el análisis y diseño de una torre de celosía, el área proyectada efectiva, (EPA)s, de los equipos instalados, es uno de los indicadores más representativos y simboliza el estado de carga de una estructura para telecomunicaciones, por lo que se determinará en relación a la normativa (TIA, 2012) y según la ecuación 2.6.9.1.1.

$$(EPA)s = Cf * [Df \sum Af + Dr \sum (Ar * Rr)] \quad 2.6.9.1.1.$$

Donde;

$Cf = 4.0 * \varepsilon^2 - 5.9 * \varepsilon + 4.0$ (secciones transversales cuadradas)

$Cf = 3.4 * \varepsilon^2 - 4.7 * \varepsilon + 3.4$ (secciones transversales triangulares)

$\varepsilon = \text{Relación de solidez} = (Af + Ar)/Ag$

Af = Área proyectada de los componentes estructurales circulares en una cara de la sección

Ag = Área bruta de una cara como si dicha cara fuese sólida

Df = Factor de dirección del viento para componentes estructurales circulares determinado de acuerdo con la Tabla 8.

Dr = Factor de dirección del viento para componentes estructurales circulares determinado de acuerdo con la Tabla 8.

Rr = Factor de reducción para un elemento circular = $0.36 + 0.26 * \varepsilon + 0.97 * \varepsilon^2 - 0.63 * \varepsilon^3$ cuando $C > 64$ (8.7) para condiciones sin hielo (flujo supercrítico)

Donde:

$$C = [I * Kz * Kzt]^{\frac{1}{2}} * V * D$$

I = Factor de importancia de acuerdo con la Tabla 5.

Kz = Coeficiente de presión dinámica de acuerdo con la ecuación 2.6.5.2 del presente documento.

Kzt = Factor topográfico de acuerdo con 2.6.6.4

V = Velocidad básica del viento para la condición de carga investigada.

D = Diámetro exterior del componente estructural.

Factores de dirección del viento

Sección transversal de la torre	Cuadrada		Triangular		
	Normal	45°	Normal	60°	±90°
D _f	1.0	1 + 0.75ε (1.2 máx.)	1.0	0.80	0.85
D _r	1.0	1 + 0.75ε (1.2 máx.)	1.0	1.0	1.0
Las direcciones del viento se miden respecto de una línea normal a la cara de la estructura.					

Tabla 8. Factores de dirección del viento²⁴

²⁴ (TIA, 2012)

2.7.2. Presión dinámica

Para encontrar el valor de la presión dinámica, q_z , se tendrá que evaluar a una altura z variable, siguiendo la norma (TIA, 2012) y acorde con la ecuación 2.6.9.6.

$$q_z = 0.613 * K_z * K_{zt} * K_d * V^2 * I \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad 2.6.9.6.$$

Donde;

K_z = Coeficiente de presión dinámica de acuerdo con 2.6.5.2.

K_{zt} = Factor topográfico de acuerdo con 2.6.6.4.

K_d = Factor de probabilidad de la dirección del viento de acuerdo a la Tabla 8

V = Velocidad básica del viento para la condición de carga investigada (m/s)

I = Factor de importancia de acuerdo con la Tabla 5.

2.8. CARGAS SÍSMICAS

La norma TIA-222-G, nos da un procedimiento de análisis modal equivalente (Método 2), para la evaluación sísmica, que se describe a continuación.

2.8.1. Procedimiento de análisis modal equivalente (método 2)

2.8.1.1. Cálculo de la frecuencia fundamental de la estructura autoportada de celosía

Para el cálculo de la frecuencia natural fundamental de la estructura (f_1) en la dirección considerada, la norma (TIA, 2012) dice que: “*se deberá determinar usando las propiedades estructurales y características de deformación de los elementos resistentes. En ausencia de un análisis formal, la frecuencia natural fundamental de una estructura se puede determinar según la ecuación 2.7.11.1*”:

$$f1 = \frac{Ks*(Wa)}{h^2} * \sqrt{\frac{W1}{W1+W2}} \text{ [Hertz]} \quad 2.7.11.1$$

Donde:

$$W1 = W * \left[\left(\frac{Wa}{Wo} \right)^2 + 0.15 \right]$$

Ks = 1500 para h y Wa en metros

W = Peso total de la estructura incluyendo los accesorios

W2 = Peso de la estructura y los accesorios en el 5% superior de la altura de la estructura

Wa = Ancho de cara promedio de la estructura

Wo = Ancho de cara en la base de la estructura

h = Altura de la estructura.

2.8.1.2. Determinación de las fuerzas sísmicas para cada nivel de la estructura

Para el cálculo de la fuerza sísmica lateral, Fsz, inducida en cada nivel de la estructura, z y según (TIA, 2012) “se deberá determinar de acuerdo con la ecuación 2.7.8.1”.

$$Fsz = \frac{Saz*Wz*I}{R} \quad 2.7.8.1.$$

Donde;

z = Número que designa el nivel considerado

$$Saz = \text{Coeficiente de aceleración a la altura } z = \frac{a(S_A)^2 + b(S_{DS})^2}{[(S_A)^2 + c(S_{DS})^2]^{\frac{1}{2}}}$$

Wz = Porción de la carga gravitatoria total asignada al nivel considerado

I = Factor de importancia de acuerdo con la Tabla 5

R = Coeficiente de modificación de la respuesta igual a 3.0 para estructuras autosoportadas de celosía.

a, b, c = Coeficientes de aceleración determinados con base en la Tabla 11.

$S_A = S_{D1}(f_1)$ cuando $f_1 \leq S_{Ds}/S_{D1}$, caso contrario $S_A = S_{Ds}$

f_1 = Frecuencia fundamental de la respuesta.

S_{Ds} = Aceleración de respuesta espectral de diseño para periodos cortos de acuerdo con 2.7.6.

S_{D1} = Aceleración de respuesta espectral de diseño para 1 segundo de acuerdo con 2.7.6.

2.8.1.2.1. Aceleración de respuesta espectral de diseño para periodos cortos (S_{Ds})

La aceleración de la respuesta sísmica espectral de diseño para periodos cortos (S_{Ds}), se calculará según las recomendaciones de la norma (TIA, 2012) y acorde con la ecuación 2.7.6.

$$S_{Ds} = \frac{2}{3} * Fa * Ss \quad 2.7.6.$$

Donde;

Fa = Coeficiente del predio dependiendo de la aceleración basado en la Tabla 9. Definición de la clase de un predio y la aceleración de la respuesta espectral para periodos cortos de acuerdo a la Tabla 10.

2.8.1.2.2. Aceleración de respuesta espectral de diseño para 1 segundo (S_{D1})

La aceleración de la respuesta sísmica espectral de diseño para periodos cortos (S_{D1}), se calculará con base en la normativa (TIA, 2012) y según la ecuación 2.7.6.

$$S_{D1} = \frac{2}{3} * Fv * S1 \quad 2.7.6.$$

Donde;

F_V = Coeficiente del predio dependiendo de la velocidad basado en la Tabla 9.
Definición de la clase de un predio y la aceleración de la respuesta espectral para 1 segundo de acuerdo a la Tabla 11.

Definición de la Clase de un predio

Clase de predio	Descripción de los 100 ft [30.5 m] de suelo superiores para el predio	Resistencia a la penetración normal, N Suelos sin cohesión $PI \leq 20$	Resistencia al corte no drenada, S_u Suelos cohesivos $PI > 20$
A	Roca dura con 10 ft [3 m] o menos de sobrecarga de suelo.	N/A	N/A
B	Roca competente con meteorización y fracturación moderadas con 10 ft [3 m] o menos de sobrecarga de suelo.	N/A	N/A
C	Suelo muy denso, roca blanda o roca altamente fracturada y meteorizada.	> 50	> 2 ksf [100 kPa]
D	Suelo rígido.	15 a 50	1.0 a 2.0 ksf [50 a 100 kPa]
E	Suelo débil (excluyendo la clase F).	< 15	< 1.0 ksf [50 kPa]
		Perfiles de suelo de más de 10 ft [3 m] de espesor con $PI \geq 20$, contenido de humedad $\geq 40\%$, $S_u < 0.5$ ksf [25 kPa]	
F	Suelos vulnerables a potenciales fallas o colapso bajo cargas sísmicas	Perfiles de suelo que contienen cualquiera de los siguientes elementos: turba y/o arcillas con alto contenido orgánico de más de 10 ft [3 m] de espesor, arcillas altamente plásticas ($PI > 75$) de más de 25 ft [7.6 m] de espesor, arcillas blandas/medias de más de 120 ft [36.6 m] de espesor, suelos licuables de gran espesor, arcillas rápidas y altamente sensibles, suelos colapsibles débilmente cementados.	

Tabla 9. Definición de la clase de un predio²⁵

Coeficiente del predio dependiente de la aceleración, F_a

Clase de predio	Máxima aceleración de la respuesta sísmica espectral para periodos cortos considerada, (S_s)				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.5$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1

Está permitido interpolar linealmente entre los valores indicados.

Tabla 10. Coeficiente del predio dependiente de la aceleración, F_a ²⁶

²⁵ (TIA, 2012)

²⁶ (TIA, 2012)

Coeficiente del predio dependiente de la velocidad, F_v

Clase de predio	Máxima aceleración de la respuesta sísmica espectral para 1 segundo considerada, (S_1)				
	$S_1 \leq 0.1$	$S_1 = 0.2$	$S_1 = 0.3$	$S_1 = 0.4$	$S_1 \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1

Está permitido interpolar linealmente entre los valores indicados.

Tabla 11. Coeficiente del predio dependiente de la velocidad, F_v

2.8.1.3. Análisis de la estructura estáticamente usando las fuerzas sísmicas como cargas externas.

En este último paso del método 2 para el análisis de una estructura autosoportada de celosía, se utilizará el software PLS-CADD TOWER²⁷ y se aplicará con base a la norma TIA-222-G.

2.9. COMBINACIONES DE CARGA PARA ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

Según lo indica la normativa propuesta para este tipo de diseños (TIA, 2012) “Las estructuras y fundaciones se deberán diseñar de una manera tal que su resistencia de diseño sea mayor o igual que las solicitaciones debidas a las cargas mayoradas para cada una de las siguientes combinaciones correspondientes al estado límite”:

- $1.2D + 1.0Dg + 1.6Wo$
- $0.9D + 1.0Dg + 1.6Wo$
- $1.2D + 1.0Dg + 1.0Di + 1.0Wi + 1.0Ti$
- $1.2D + 1.0Dg + 1.0E$
- $0.9D + 1.0Dg + 1.0E$

Donde;

²⁷ PLS-CADD TOWER: Es uno de los varios programas MS-WINDOWS desarrollados por Power Line Systems para el análisis y diseño de estructuras de transmisión. (Power Line Systems, Inc, 2007)

D = Carga permanente de la estructura y los accesorios, excluyendo las riendas

D_g = Carga permanente de las riendas

D_i = Peso de hielo debido al espesor de hielo mayorado

E = Carga sísmica

T_i = Solicitaciones debidas a la temperatura

W_o = Carga de viento sin hielo

W_i = Carga de viento concurrente con espesor de hielo mayorado

A continuación se describen algunas excepciones que propone la norma TIA-222-G, para las consideraciones de carga según las combinaciones anteriormente descritas:

- No es necesario considerar los efectos de la temperatura para las estructuras autoportadas
- No es necesario considerar las cargas de hielo y sísmicas para las estructuras de clase I
- No se deberá aplicar factor de carga a la tensión inicial de riendas
- Las combinaciones 2 y 5 solamente se aplican a las estructuras autoportadas

3. MODELAMIENTO DE CARGAS EN PLS-CADD TOWER

A continuación se hará referencia al manual del usuario (Power Line Systems, Inc, 2007) para describir los lineamientos esenciales del modelamiento de las cargas descritas en los capítulos anteriores y así poder hacer un modelo que sirva para identificar las distintas formas de respuesta de una torre de telecomunicaciones ante la acción del viento con sus diferentes variantes de velocidad.

Las cargas de diseño sobre las torres de transmisión incluyen cargas de cables, cargas muertas de la torre y componentes fijados permanentemente, cargas de viento sobre la torre en sí misma y posiblemente cargas de hielo sobre los miembros de la torre (Power Line Systems, Inc, 2007).

Dependiendo si TOWER es ejecutado en modo de verificación de diseño para torres de transmisión o en uno de los modos de longitud admisible o si es ejecutado para torres de comunicaciones en el modo especial EIA²⁸ de verificación de diseño, las cargas vectoriales, el formato de EIA de cargas (“*.eia*”) (Power Line Systems, Inc, 2007).

Las normas de torres de comunicaciones poseen procedimientos únicos y detallados para especificar cargas de viento sobre estructuras con secciones cuadradas y triangulares, sus accesorios y antenas. La velocidad del viento se incrementa generalmente con la altura (Power Line Systems, Inc, 2007).

Es importante que el usuario de TOWER comprenda como son automatizados algunos de los cálculos de carga, para una norma dada. Las normas de comunicaciones que contiene TOWER en la actualidad son las normas EIA, TIA/EIA 222-F y ANSI/TIA/EIA 222-G (Power Line Systems, Inc, 2007).

²⁸ EIA: Electronic Industries Alliance (TIA, 2012)

3.1. CARGAS NORMA ANSI/TIA 222-G

Según (Power Line Systems, Inc, 2007) *“La revisión G de la norma EIA (ANSI/TIA, 2005) es una reescritura completa de las ediciones previas de la norma. Se debe entender que TOWER implementa la mayoría de los cálculos requeridos por la norma, pero no todos ellos. Por lo tanto, no es una caja negra y el usuario debe estar completamente familiarizado con la norma EIA antes de intentar el uso de TOWER. Debe revisar cuidadosamente los datos de salida detallados del programa y compararlos con los valores calculados manualmente, para asegurarse que ha entendido y considerado todas las suposiciones, aproximaciones y factores involucrados en el modelo”*.

El cálculo de la carga del viento sobre la torre en sí y el de las cargas de antenas es mayormente automatizado. Los patrones de cargas de viento son implementados al crear los diferentes casos de cargas en la que la ráfaga de viento es aplicada sobre toda la torre, excepto por un rango de cotas en donde es aplicado el viento promedio (Power Line Systems, Inc, 2007).

3.1.1. Provisiones para terremotos

El software PLS-TOWER implementa solamente un método de cargas de sismos para cada tipo de estructuras. Según (Power Line Systems, Inc, 2007), se utiliza el Método 2 (ANSI/TIA 222-G sección 2.7.8) para torres autosoportadas. Este método según el manual del usuario, se basa en que los efectos producidos sobre una torre de telecomunicaciones por un sismo con periodos cortos, pueden ser ignorados para lugares donde el parámetro de la aceleración de la respuesta espectral (S_s), considerado como una fracción de la aceleración de la gravedad, es menor que 1g. El parámetro (S_s), se puede obtener dependiendo de la localización de la estructura, usando la aplicación USGS disponible en <http://geohazards.usgs.gov/designmaps/ww/>. Las fuerzas sísmicas calculadas son aplicadas en la dirección del viento. La frecuencia natural de la torre está basada en la sección 2.7.11.1 de la norma ANSI/TIA 222-G para torres autosoportadas (Power Line Systems, Inc, 2007).

3.2. DATOS DE CARGA PARA ANSI/TIA 222-G

La tabla en el dialogo de casos de carga EIA REV. G de la Figura 11. Cargas ANSI/TIA 222-G, aparece cuando se abre un archivo “.eia” en la ventana de dialogo, si usted ha seleccionado “ANSI/TIA/222-G” como tipo de carga en la ventana de dialogo de Datos Generales (Power Line Systems, Inc, 2007).

Los datos de la parte superior de la ventana de dialogo de la Figura 11 son: Clase de estructura, categoría de exposición, categoría topográfica, factor topográfico, altura de la cresta, respuesta espectral de diseño en periodos cortos y respuesta espectral de diseño en 1 segundo. Parámetros definidos en la norma ANSI/TIA 222-G (Power Line Systems, Inc, 2007).

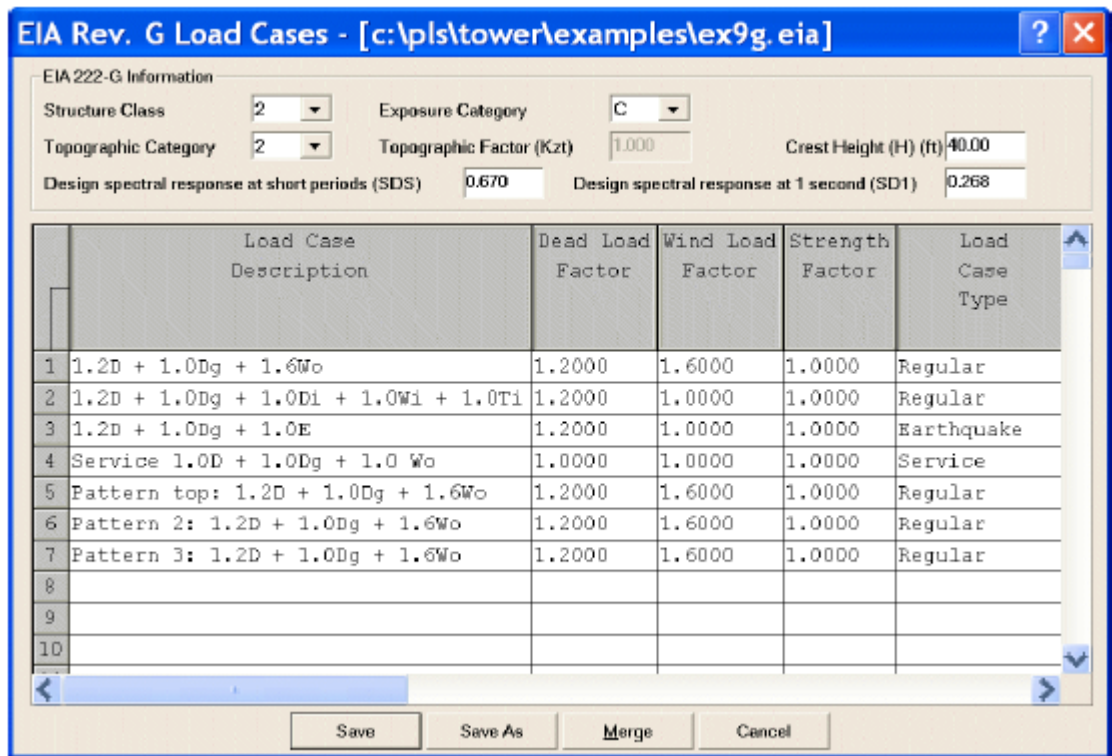


Figura 11. Cargas ANSI/TIA 222-G²⁹

²⁹ (Power Line Systems, Inc, 2007)

Luego para cada caso de carga, usted necesita ingresar: Descripción del caso de carga, factor de carga muerta, factor de carga de viento, factor de resistencia, velocidad básica del viento (debe ser un valor de ráfaga de 3 segundos), dirección del viento, espesor del hielo, densidad del hielo, temperatura, algunas cargas puntuales y algunos desplazamientos nodales (Power Line Systems, Inc, 2007).

Además, los tipos de casos de carga serán: Regular si no son las de servicio o terremoto, servicio si el caso de carga es usado para verificar algunos límites de deflexión y terremoto si el caso de carga incluye terremotos (Power Line Systems, Inc, 2007).

4. MODELAMIENTO EN TOWER DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADA DE 60m

El software TOWER permite modelar cualquier tipo de torre de telecomunicaciones aplicando la norma TIA-222-G por lo que este estudio se enfocará en el análisis de estas estructuras, presentando los pasos para hacer el debido ingreso de los datos y análisis de los mismos.

4.1. DATOS GENERALES DEL MODELO

En la Figura 12 se muestran los datos generales del proyecto donde se designa el título, notas, norma a utilizar, las opciones de análisis y el tipo de análisis (No lineal).

The screenshot shows the 'Datos generales' dialog box with the following settings:

- Titulo proyecto: EIA 60 METROS TORRE DE TELECOMUNICACIONES
- Notas proyecto: LEGS MODELED WITH BEAM ELEMENTS
- Habilita la revision automática del proyecto durante cada Guardar:
- Design Checks:
 - Tower Strength: ANSI/TIA 222-G-1
 - Connection Rupture: ANSI/TIA 222-G-1
 - Crossing Diagonal Unbraced Length Method: ANSI/TIA 222-G-1
 - Required % of compression force in the tension (supporting) brace (user defined check only): 20
 - Alternate unsupported unbraced length ratio RLOUT: 1
- Tipo de carga: ANSI/TIA 222-G (
- Z of ground for wind height adjust and PLS-CADD centerline (m):
- Structure shape (used for drag coef. selection): Rectangular
- Allow separate face for each section (restricts face membership to members in sections):
- Parámetros de convergencia no lineal: Standard
- Opciones de análisis:
 - Verificar diseño para simples estructuras
 - Vanos permisibles básicos
 - Crear metodo 1 para PLS-CADD
 - Diagramas de interacción de vanos permisible:
 - Crear metodo 2 para PLS-CADD
- Tipo de análisis:
 - Lineal
 - No lineal

Buttons: OK, Cancelar

Figura 12. Datos generales del proyecto

Igualmente, se determina una elevación a la que se encuentra la estructura que para este análisis se define como se ve en la Figura 13.

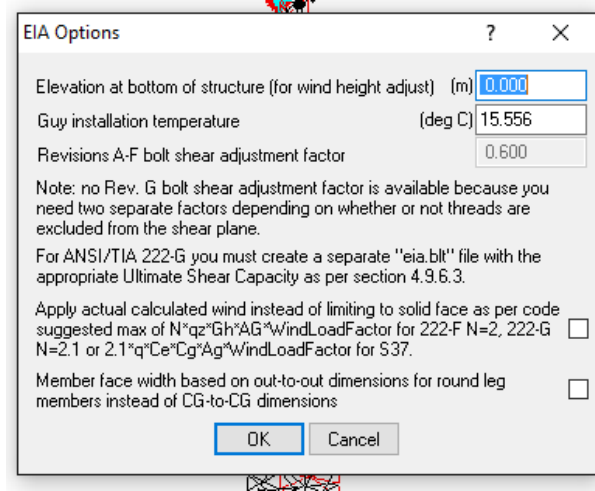


Figura 13. Opciones EIA

Algunas otras opciones de optimización y de salida se dan acorde a la Figura 14 y Figura 15 respectivamente.

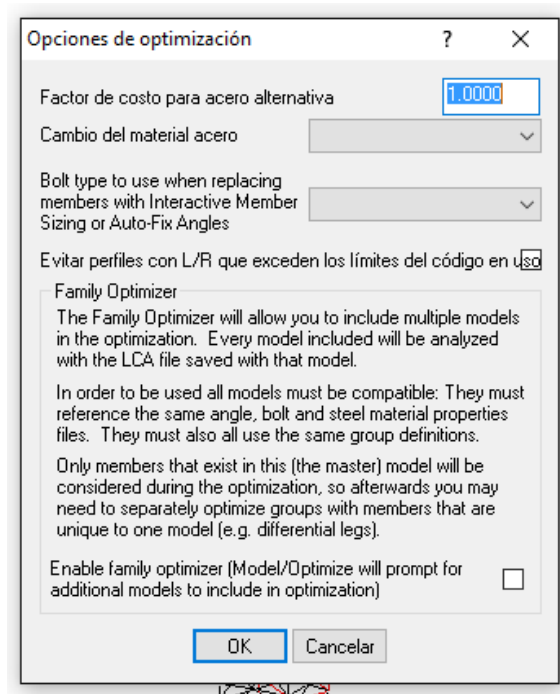


Figura 14. Opciones de optimización

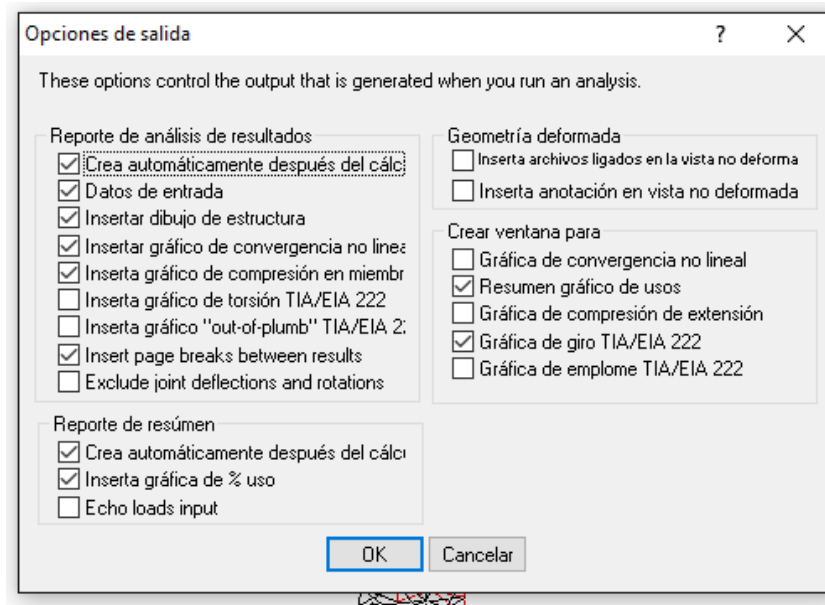


Figura 15. Opciones de salida

4.2. MATERIALES DE LA ESTRUCTURA

Los materiales normativos para cualquier estructura metálica de telecomunicaciones deben regirse como lo indica la norma TIA-222-G y que fueron definidos en la Figura 16.

	Etiqueta del Acero	Mód. de Elast. (MPa)	Esfzo Fluen. Fy (MPa)	Esfzo Ruptura Fu (MPa)	Todos los Elem Esfzo Hyp. 1 (MPa)	Todos los Elem Esfzo Hyp. 2 (MPa)	Elemto Rupt. Hyp. 1 (MPa)	Elemto Rupt. Hyp. 2 (MPa)	Elemto flex Hyp. 1 (MPa)	Elemto flex bearing Hyp. 2 (MPa)
1	A 36	199948	248.211	399.895	0	0	0	0	0	0
2	A529-50	199948	344.737	482.632	0	0	0	0	0	0
3	A572-50	199948	344.737	448.158	0	0	0	0	0	0
4										

Figura 16. Materiales de la estructura

4.3. PERFILES ESTRUCTURALES

Los perfiles que componen la estructura de análisis y sus propiedades están definidos en la Figura 17.

	Angle Type	Angle Size	Long Leg (cm)	Short Leg (cm)	Thick. (cm)	Unit Weight (N/m)	Gross Area (cm ²)	w/t Ratio	Radius of Gyration Rx (cm)	Radius of Gyration Ry (cm)	Radius of Gyration Rz (cm)	Number of Angles	Wind Width (cm)
14	SAE	6X6X0.5	15.24	15.24	1.27	286.04	37.0967	10	4.7244	4.7244	2.9972	1	15.24
15	SAE	6X6X0.4375	15.24	15.24	1.11125	251.015	32.6451	11.57	4.7498	4.7498	3.0226	1	15.24
16	SAE	6X6X0.375	15.24	15.24	0.9525	217.449	28.129	13.67	4.7752	4.7752	3.0226	1	15.24
17	SAE	5X5X0.3125	12.7	12.7	0.79375	150.317	19.5483	13.4	3.9878	3.9878	2.52476	1	12.7
18	SAE	4X4X0.5	10.16	10.16	1.27	186.802	24.1935	6.25	3.0988	3.0988	1.98628	1	10.16
19	SAE	4X4X0.3125	10.16	10.16	0.79375	119.67	15.4838	10.6	3.1496	3.1496	2.00914	1	10.16
20	SAE	4X4X0.25	10.16	10.16	0.635	96.3197	12.5161	13.5	3.175	3.175	2.0193	1	10.16
21	SAE	3.5X3.5X0.25	8.89	8.89	0.635	84.6446	10.9032	11.5	2.7686	2.7686	1.76276	1	8.89
22	SAE	3X3X0.25	7.62	7.62	0.635	71.5101	9.2903	9.75	2.3622	2.3622	1.50368	1	7.62
23	SAE	3X3X0.1875	7.62	7.62	0.47625	54.1434	7.03224	13.33	2.38506	2.38506	1.51384	1	7.62
24	SAE	2.5X2.5X0.1875	6.35	6.35	0.47625	44.8033	5.81934	10.67	1.97612	1.97612	1.2573	1	6.35
25	SAE	2X2X0.1875	5.08	5.08	0.47625	35.6091	4.58064	8	1.56718	1.56718	1.00076	1	5.08
26	SAE	1.75X1.75X0.1875	4.445	4.445	0.47625	30.9391	3.99999	6	1.36398	1.36398	0.87122	1	4.445
27	SAU	5X3.5X0.3125	12.7	8.89	0.79375	126.967	16.5161	13.4	4.0894	2.6162	1.94564	1	12.7
28	SAU	5X3X0.3125	12.7	7.62	0.79375	119.67	15.4838	13.4	4.0894	2.16662	1.67132	1	12.7
29	SAU	4X3.5X0.25	10.16	8.89	0.635	90.4822	11.6774	13.25	3.2258	2.7178	1.86436	1	10.16
30	SAU	4X3X0.375	10.16	7.62	0.9525	124.048	16	8.5	3.2004	2.23266	1.63576	1	10.16

Figura 17. Perfiles estructurales y propiedades

4.4. ELEMENTOS DE CONEXIÓN PARA LOS PERFILES ESTRUCTURALES

Los elementos de conexión para los perfiles estructurales son pernos de diferentes tipos de material y diámetro como se ve en la Figura 18.

	Etqta Tornillo	Diám. (cm)	Barreno (cm)	Cap al Corte (kN)	Dist. al Paño (cm)	Esp. entre Torn. (cm)	Cap. Corte Hyp. 1 (kN)	Cap. Corte Hyp. 2 (kN)
1	5/8 A394 TYPE0 X	1.5875	1.905	62.7199	2.8575	3.81	0	0
2	5/8 A394 TYPE0 N	1.5875	1.905	49.5977	2.8575	3.81	0	0
3	3/4 A394 TYPE0 X	1.905	2.2225	90.0765	3.429	4.572	0	0
4	3/4 A394 TYPE0 N	1.905	2.2225	74.0629	3.429	4.572	0	0
5	7/8 A394 TYPE0 X	2.2225	2.54	122.771	4.0005	5.334	0	0
6	7/8 A394 TYPE0 N	2.2225	2.54	102.976	4.0005	5.334	0	0
7	1 A394 TYPE0 X	2.54	2.8575	160.358	4.572	6.096	0	0
8	1 A394 TYPE0 N	2.54	2.8575	135.226	4.572	6.096	0	0
9	5/8 A394	1.5875	1.905	40.4788	2.8575	3.81	0	0
10	3/4 A394	1.905	2.2225	60.4958	3.429	4.572	0	0
11	7/8 A394	2.2225	2.54	83.849	4.0005	5.334	0	0
12	1 A394	2.54	2.8575	110.316	4.572	6.096	0	0

Figura 18. Elementos de conexión para los perfiles estructurales

4.5. LISTADO DE EQUIPOS

Los equipos que va a soportar la estructura de telecomunicaciones son elementos de radio frecuencia tales como antenas RF, MW y RRU, los cuales se definen como se muestran en la Figura 19 y Figura 20.

	Equipment Property Label	Stock Number	Weight (N)	Wind Area (m ²)	Ice Area (m ²)	Shape or EIA Antenna Type	Drag Coef.	Diameter (m)	Height (m)
1	T1000		44482.2	4.64515	0		1	0	0
2	T2000		88964.4	9.2903	0		1	0	0
3	Microwave Antenna		444.822	0.464515	0.185806	EIA Microwave Radome	NA	0.762	0.762

Figura 19. Listado de equipos instalados

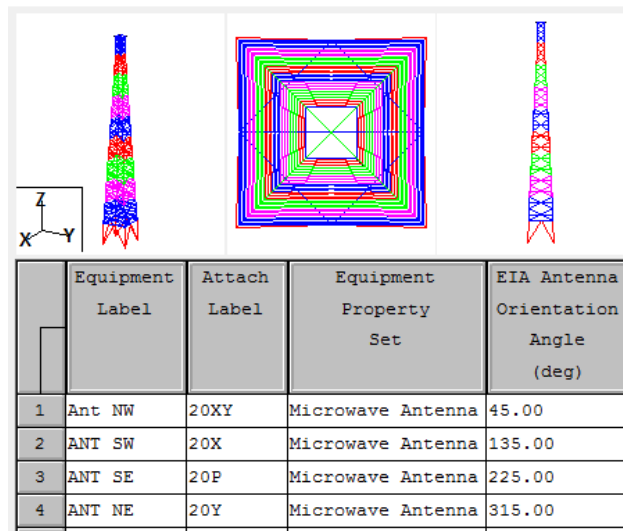


Figura 20. Ubicación de equipos en la estructura

4.6. COMBINACIÓN DE CARGAS

Una vez se tenga definido el modelo, se generan las combinaciones de carga acorde a la norma TIA-222-G como se definen en la Figura 11. Cargas ANSI/TIA 222-G.

Los parámetros definidos para la estructura autoportada de 60 m, son los indicados en la Tabla 12.

EIA 222-G Information						
Structure Class	Exposure Category	Topographic Category	Topographic Factor (Kzt)	Crest Height (ft)	Seismic Site Class	Wind Speed (mph)
2	B	2	1	1400	D	60

Tabla 12. Parámetros de la estructura

Como resultado de los datos de entrada se tiene:

EIA 222-G Information														
Structure Class		2	Exposure Category		B	Topographic Category		2	Topographic Factor (Kzt)		1.000	Crest Height (H)(m)		1400.00
Design spectral response at short periods (SDS)						0.670		Design spectral response at 1 second (SD1)					0.268	
	Load Case Description	Dead Load Factor	Wind Load Factor	Strength Factor	Load Case Type	Basic Wind Speed (m/s)	Wind Dir. (Deg)	Mean Wind Start Elevation (m)	Mean Wind Stop Elevation (m)	Ice Thick. (cm)	Ice Density (N/m ³)	Temperature (deg C)		
1	1: 1.2D + 1.0Dg + 1.6Wo	1.2000	1.6000	1.0000	Regular	40.234	0	0.00	0.00	0.0000	0.0000	15.6		
2	2: 0.9D + 1.0Dg + 1.6Wo	0.9000	1.6000	1.0000	Regular	40.234	0	0.00	0.00	0.0000	0.0000	15.6		
3	3: 1.2D + 1.0Dg + 1.0Di + 1.0Wi + 1.0Ti	1.2000	1.0000	1.0000	Regular	26.822	0	0.00	0.00	2.5400	8796.8957	-12.2		
4	4: 1.2D + 1.0Dg + 1.0E	1.2000	1.0000	1.0000	Earthquake	0.000	0	0.00	0.00	0.0000	0.0000	15.6		
5	5: 0.9D + 1.0Dg + 1.0E	0.9000	1.0000	1.0000	Earthquake	0.000	0	0.00	0.00	0.0000	0.0000	15.6		
6	6: Service 1.0D + 1.0Dg + 1.0 Wo	1.0000	1.0000	1.0000	Service	26.822	0	0.00	0.00	0.0000	0.0000	15.6		

Figura 21. Combinaciones de carga TIA-222-G

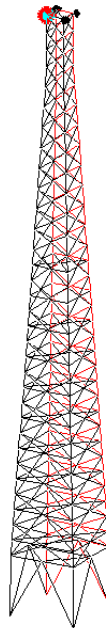


Figura 22. Modelo geométrico torre 60m.

4.7. DATOS DE ENTRADA DEL ANÁLISIS

Para cada caso de carga y según los elementos o equipos instalados en la estructura, se generan las fuerzas de viento que se calculan automáticamente siguiendo los parámetros anteriormente analizados en base a la norma TIA-222-G, acorde a lo anterior se tienen los siguientes casos de carga:

• Equipment Load Case Information for "2: 0.9D + 1.0Dg + 1.6Wo":															
Equipment Label	Equipment Property Set	Elevation Above Ground (m)	qzGh (Pa)	Ice Thick. (cm)	Total Wind Area (m ²)	Wind Incidence Angle (deg)	222-G CA	222-G CS	222-G CM	Antenna Axial Load FAM (N)	Antenna Side Load FSM (N)	Antenna Moment MM (N-m)	Long. Load (N)	Trans. Load (N)	Vert. Load (N)
Ant NW Microwave Antenna		60.00	2872.27	0.00	0.46	45.00	0.60550	0.50980	-0.06230	807.87	680.18	-63.34	1052.21	90.29	400.34
ANT SW Microwave Antenna		60.00	2872.27	0.00	0.46	135.00	-0.35160	0.31250	0.11505	-469.11	416.94	116.97	626.53	-36.89	400.34
ANT SE Microwave Antenna		60.00	2872.27	0.00	0.46	225.00	-0.35160	-0.31250	-0.11505	-469.11	-416.94	-116.97	626.53	36.89	400.34
ANT NE Microwave Antenna		60.00	2872.27	0.00	0.46	315.00	0.60550	-0.50980	0.06230	807.87	-680.18	63.34	1052.21	-90.29	400.34

• Equipment Load Case Information for "3: 1.2D + 1.0Dg + 1.0Di + 1.0Wi + 1.0Ti":															
Equipment Label	Equipment Property Set	Elevation Above Ground (m)	qzGh (Pa)	Ice Thick. (cm)	Total Wind Area (m ²)	Wind Incidence Angle (deg)	222-G CA	222-G CS	222-G CM	Antenna Axial Load FAM (N)	Antenna Side Load FSM (N)	Antenna Moment MM (N-m)	Long. Load (N)	Trans. Load (N)	Vert. Load (N)
Ant NW Microwave Antenna		60.00	797.81	7.56	0.66	45.00	0.60550	0.50980	-0.06230	320.47	269.82	-25.13	417.40	35.82	657.33
ANT SW Microwave Antenna		60.00	797.81	7.56	0.66	135.00	-0.35160	0.31250	0.11505	-186.09	165.40	46.40	248.54	-14.63	657.33
ANT SE Microwave Antenna		60.00	797.81	7.56	0.66	225.00	-0.35160	-0.31250	-0.11505	-186.09	-165.40	-46.40	248.54	14.63	657.33
ANT NE Microwave Antenna		60.00	797.81	7.56	0.66	315.00	0.60550	-0.50980	0.06230	320.47	-269.82	25.13	417.40	-35.82	657.33

• Equipment Load Case Information for "4: 1.2D + 1.0Dg + 1.0E":															
Equipment Label	Equipment Property Set	Elevation Above Ground (m)	qzGh (Pa)	Ice Thick. (cm)	Total Wind Area (m ²)	Wind Incidence Angle (deg)	222-G CA	222-G CS	222-G CM	Antenna Axial Load FAM (N)	Antenna Side Load FSM (N)	Antenna Moment MM (N-m)	Long. Load (N)	Trans. Load (N)	Vert. Load (N)
Ant NW Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	45.00	0.60550	0.50980	-0.06230				0.00	0.00	533.79
ANT SW Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	135.00	-0.35160	0.31250	0.11505				0.00	0.00	533.79
ANT SE Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	225.00	-0.35160	-0.31250	-0.11505				0.00	0.00	533.79
ANT NE Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	315.00	0.60550	-0.50980	0.06230				0.00	0.00	533.79

• Equipment Load Case Information for "5: 0.9D + 1.0Dg + 1.0E":															
Equipment Label	Equipment Property Set	Elevation Above Ground (m)	qzGh (Pa)	Ice Thick. (cm)	Total Wind Area (m ²)	Wind Incidence Angle (deg)	222-G CA	222-G CS	222-G CM	Antenna Axial Load FAM (N)	Antenna Side Load FSM (N)	Antenna Moment MM (N-m)	Long. Load (N)	Trans. Load (N)	Vert. Load (N)
Ant NW Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	45.00	0.60550	0.50980	-0.06230				0.00	0.00	400.34
ANT SW Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	135.00	-0.35160	0.31250	0.11505				0.00	0.00	400.34
ANT SE Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	225.00	-0.35160	-0.31250	-0.11505				0.00	0.00	400.34
ANT NE Microwave Antenna		60.00	0.00	0.00	0.46	315.00	0.60550	-0.50980	0.06230				0.00	0.00	400.34

• Equipment Load Case Information for "6: Service 1.0D + 1.0Dg + 1.0 Wo":															
Equipment Label	Equipment Property Set	Elevation Above Ground (m)	qzGh (Pa)	Ice Thick. (cm)	Total Wind Area (m ²)	Wind Incidence Angle (deg)	222-G CA	222-G CS	222-G CM	Antenna Axial Load FAM (N)	Antenna Side Load FSM (N)	Antenna Moment MM (N-m)	Long. Load (N)	Trans. Load (N)	Vert. Load (N)
Ant NW Microwave Antenna		60.00	713.83	0.00	0.46	45.00	0.60550	0.50980	-0.06230	200.78	169.04	-15.74	261.50	22.44	444.82
ANT SW Microwave Antenna		60.00	713.83	0.00	0.46	135.00	-0.35160	0.31250	0.11505	-116.59	103.62	29.07	155.71	-9.17	444.82
ANT SE Microwave Antenna		60.00	713.83	0.00	0.46	225.00	-0.35160	-0.31250	-0.11505	-116.59	-103.62	-29.07	155.71	9.17	444.82
ANT NE Microwave Antenna		60.00	713.83	0.00	0.46	315.00	0.60550	-0.50980	0.06230	200.78	-169.04	15.74	261.50	-22.44	444.82

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO A VIENTO DE UNA TORRE DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADA DE 60 m

Para el análisis del comportamiento de los elementos que componen una torre de telecomunicación debido a la acción del viento, se debe centrar en el análisis del porcentaje de uso de los elementos haciendo una comparación entre sus capacidades mecánicas contra las fuerzas actuantes. Acorde a los datos de entrada y la geometría propuesta para la estructura, se analizan los resultados obtenidos.

5.1. USO MÁXIMO DE LOS ELEMENTOS

El uso máximo de un elemento implica las consideraciones de capacidad de carga ya sea a compresión o a tensión de un elemento comparado con el estado de carga actuante sobre él. En este caso se tiene que los elementos con el mayor porcentaje de uso son los siguientes:

El uso máximo del elemento es: 47.74% for Angle "37X" in load case "1: 1.2D + 1.0Dg + 1.6Wo"

Angle Forces For All Load Cases:
Positive for tension - negative for compression

Group Label	Angle Label	Max. Usage For All LC %	Max. Tens. For All LC (kN)	Max. Comp. For All LC (kN)	LC 1 (kN)	LC 2 (kN)	LC 3 (kN)	LC 4 (kN)	LC 5 (kN)	LC 6 (kN)
D2	37X	47.74	0.000	-45.37	-45.37	-45.37	-25.83	-2.68	-2.68	-12.65

La Figura 23 muestra la variación del uso máximo de los elementos para cada caso de carga propuesto en los datos de entrada.

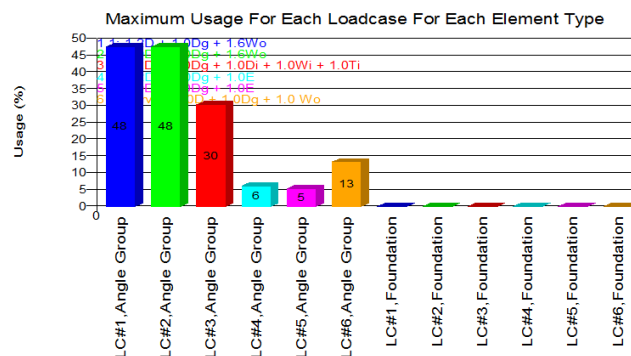


Figura 23. Uso máximo de los elementos para cada caso de carga

En resumen, los usos máximos de carga para cada elemento están resumidos de la siguiente manera:

Summary of Maximum Usages by Load Case:

Load Case	Maximum Usage %	Element Label	Element Type
1: 1.2D + 1.0Dg + 1.6Wo	47.74	37X	Angle
2: 0.9D + 1.0Dg + 1.6Wo	47.74	37X	Angle
3: 1.2D + 1.0Dg + 1.0Di + 1.0Wi + 1.0Ti	30.39	6X	Angle
4: 1.2D + 1.0Dg + 1.0E	6.13	6X	Angle
5: 0.9D + 1.0Dg + 1.0E	5.34	6X	Angle
6: Service 1.0D + 1.0Dg + 1.0 Wo	13.28	37P	Angle

La Figura 24 muestra la máxima compresión en los elementos para cada caso de carga, donde si hubiese alguna sobrecarga, se pueden ver fácilmente.

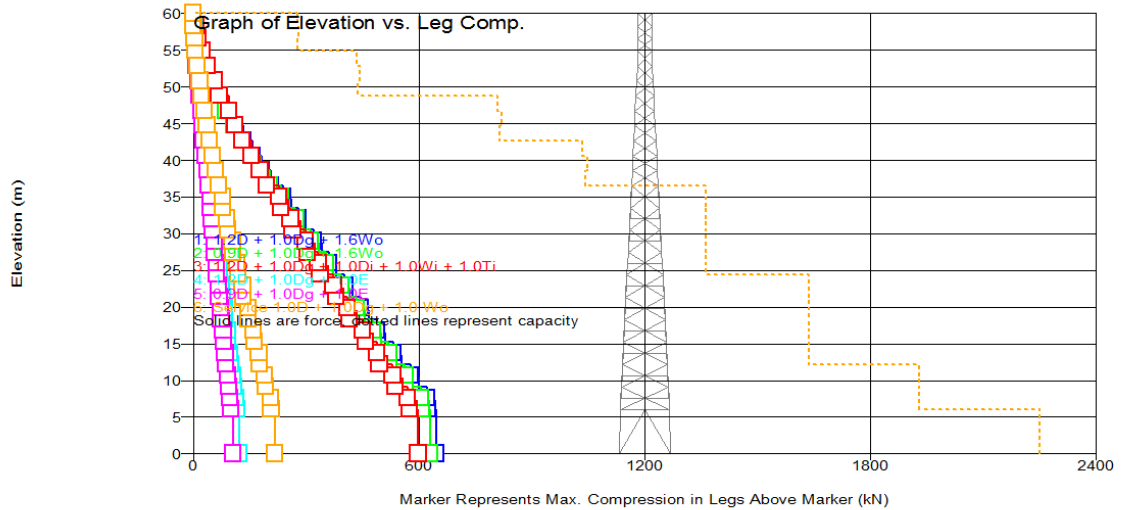


Figura 24. Máxima compresión en los elementos para cada caso de carga

5.2. DESPLAZAMIENTOS Y ROTACIONES DE LOS ELEMENTOS

Las normas recomiendan analizar y controlar los desplazamientos y rotación de los elementos, validando que no superen los valores máximos permitidos por los códigos. De acuerdo a la Figura 25 se puede apreciar que la estructura no supera los desplazamientos del 3% del valor de la altura, descritos en el

subcapítulo 2.8.2 de la normativa (TIA, 2012), por lo que se puede concluir que se está comportando adecuadamente.

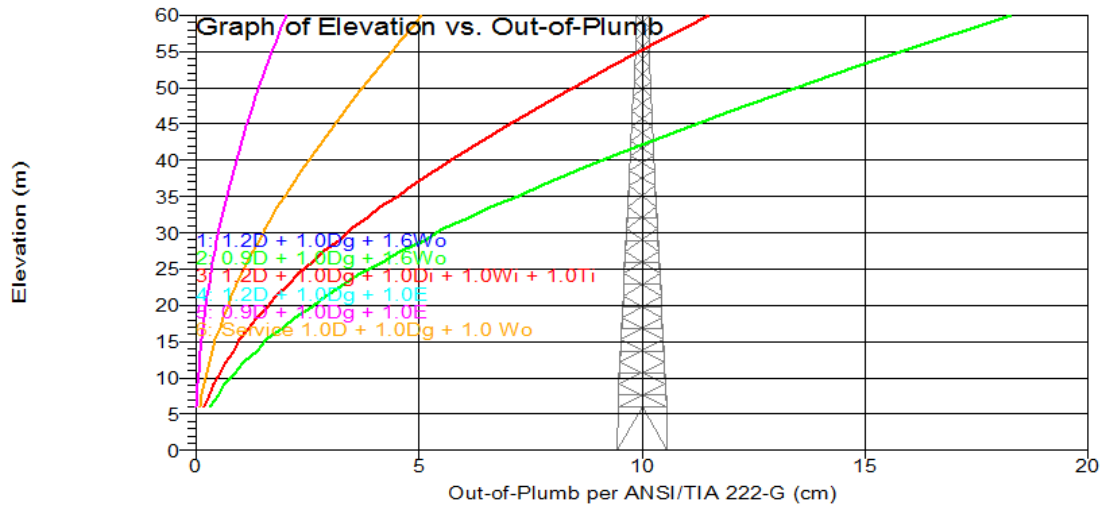


Figura 25. Desplazamiento de los elementos para cada caso de carga

6. CONCLUSIONES

1. Las torres de telecomunicaciones son estructuras esbeltas, con uniones articuladas, flexibles y ligeras. La carga lateral inducida por un sismo equivale aproximadamente a un 25% de la fuerza ejercida por la presión y la velocidad de viento; la carga sísmica depende de la masa de la estructura y estos elementos de torres en celosía y monopolos se caracterizan en no ser masivos; por esa razón, la carga en mención no se considera importante en el análisis.
2. Como resultado del estudio de las normativas que usualmente se utilizan para el análisis y diseño de infraestructura para telecomunicaciones, se evidencia que el NSR-10 en el subcapítulo A.1.2.4.1. indica que la norma no es aplicable a *“El diseño y construcción de estructuras especiales tales como puentes, torres de transmisión, torres y equipos industriales, muelles, estructuras hidráulicas y todas aquellas construcciones diferentes de edificaciones”*, por lo que este estudio se centra en una normativa reconocida mundialmente para el análisis y diseño especialmente de torres de telecomunicaciones como lo es la TIA-222 en su revisión G.
3. Por otro lado, al ser la normativa TIA-222-G, una norma creada en EE.UU, todos los parámetros ambientales están con base en su país de origen, por esto y tomando como única excepción para este tipo de factores y datos ambientales como lo es la velocidad básica de viento, estos se toman del NSR-10, haciendo la aclaración que son datos estadísticos que la norma los recopila en base a mediciones del IDEAM.
4. La infraestructura de telecomunicaciones es de vital importancia para la sociedad ya que con la expansión en su cobertura a nivel nacional, ayuda a generar desarrollo y permite seguir avanzado en materia de educación en

lugares donde la tecnología aun no es muy común y esto nos lleva a ser un país cada vez más sostenible.

5. Después de haber estudiado los distintos aspectos que influyen para analizar o diseñar cualquier tipo de infraestructura que soporte equipos de telecomunicaciones, básicamente estos son dependientes del lugar donde se requiera instalar porque los parámetros cambian de acuerdo al sitio de disposición final de la estructura.
6. Cada vez que los operadores de telefonía móvil necesitan hacer una optimización en sus equipos de transmisión, se ven obligados a reubicar elementos alrededor de la infraestructura de soporte; para esto, es indispensable hacer un análisis de carga para revisar su condición de uso final; por eso, este documento ha tenido como finalidad, dar los parámetros y fuentes necesarias para realizar un correcto estudio de las torres de telecomunicaciones.
7. Como se pudo observar, en el estudio de las estructuras de soporte para equipos de telecomunicaciones, los aspectos más relevantes son los relacionados a los parámetros topográficos; a medida que se categoriza la torre en un factor topográfico y de exposición mayor, las fuerzas de viento actuantes son mayores; por esto, en la medida que estos factores sean más críticos, las estructuras deberán ser reforzadas en mayor proporción que las que estén actuando ante parámetros cada vez más bajos; entendiendo que los parámetros de exposición varían desde la categoría B hasta la D y los factores topográficos desde el 1 hasta el 4.
8. El análisis del comportamiento a viento de una torre de telecomunicaciones es otro de los tantos campos de acción que tiene la ingeniería civil por lo que es muy motivante y agradable su estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- AHMSA. (2013). *MANUAL DE DISEÑO PARA LA CONSTRUCCIÓN CON ACERO*. Monterrey: AHMSA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS . (2014). *ASTM A6/A6M-14 Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes and Sheet Piling*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2015). *ASTM A123/A123M-15 Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2015). *ASTM A780 / A780M - 09(2015) Standard Practice for Repair of Damaged and Uncoated Areas of Hot-Dip Galvanized Coatings*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. (2016). *ASTM A153 / A153M - 16 Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Apolo Sócola, C. G., & Cangás Herrera, W. O. (2014). Análisis estructural de las torres de telecomunicación para antenas de última tecnología. *Escuela Politécnica Nacional*.
- Díaz Salambay, A. R. (13 de 04 de 2015). Diseño de una torre de telecomunicaciones autosoportada de 42m de altura y su chequeo en el rango inelástico del comportamiento. Ambato, Ecuador.
- Hernandez Barrios, H., Rangel Toral, A., & López López, A. (2010). Respuesta dinámica de torres de telecomunicación ante cargas eólicas en México. *Sociedad mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (26 de 03 de 2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. *NSR-10*. Bogota D.C., COLOMBIA: Imprenta Nacional de Colombia.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. (13 de 02 de 2012). DECRETO NÚMERO 0340. *Por el cual se modifica parcialmente el Reglamento de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Bogota D.C., COLOMBIA.
- Power Line Systems, Inc. (2007). *TOWER. Version 8 User's Manual*. Madison.
- TIA. (2012). *Structural standard for antenna supporting structures and antennas* (Vols. TIA-222-G). Arlington: TELECOMMUNICATION INDSTRY ASSOCIATION.
- WORLD TOWER INC. (2006). Classification Overview. *Structure Classification* . Mayfield.