 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	--



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS

PRESENTADO POR:

ANDRÉS FERNANDO ARIAS CANTOR
NICOLÁS ANDRÉS GONZÁLEZ ROMERO

CÓDIGO: 505778
CÓDIGO: 506146

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
2019**

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
--	---	--



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS

PRESENTADO POR:


ANDRÉS FERNANDO ARIAS CANTOR
NICOLÁS ANDRÉS GONZÁLEZ ROMERO

CÓDIGO: 505778
CÓDIGO: 506146

DIRECTOR:

ING. INGRID MARYLIN SILVA ROJAS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D. C.
2019

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
 Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de: 

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).




No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.


 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

CONTENIDO


INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES	13
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	13
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
2. ESTADO DEL ARTE	21
2.1 HISTORIA	21
2.2 APLICACIÓN AL MEDIO COLOMBIANO	23
2.3 CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES	24
2.3.1 Geometría en torres.....	24
2.3.2 Análisis estructural.....	25
2.4 CONSIDERACIONES SÍSMICAS	26
2.5 CONSIDERACIONES DE VIENTO	27
3. ALCANCE Y LIMITACIONES	28
4. OBJETIVOS	29
4.1 GENERAL	29
4.2 ESPECÍFICOS	29
5. METODOLOGÍA.....	30
6. MARCO DE REFERENCIA	32
6.1 MARCO NORMATIVO	32
6.2 MARCO LEGAL	32
7. MARCO TEÓRICO.....	33
7.1 TIPOS DE TORRES.....	33
7.1.1 Torres atirantadas.....	33
7.1.2 Torres monopolo.....	34
7.1.3 Torres autosoportadas.....	34
7.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ACERO.....	37
7.2.1 Ventajas.....	37
7.2.2 Desventajas.....	38
7.3 CRITERIOS DE DISEÑO	38
7.3.1 Tipos de acero estructural	38

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.3.2	Secciones comerciales y ejes principales.....	40
7.3.3	Clasificación de las estructuras	41
7.4	CARGAS	42
7.4.1	Carga muerta.....	42
7.4.2	Carga viva	43
7.4.3	Carga de granizo	43
7.4.4	Carga de viento	43
7.4.5	Carga de sismo.....	55
7.5	COMBINACIONES DE CARGA	60
7.5.1	Combinaciones mayoradas	61
7.5.2	Combinaciones de servicio	61
7.6	DISEÑO DE MIEMBROS A TENSIÓN.....	61
7.7	DISEÑO DE MIEMBROS A COMPRESIÓN	65
7.8	DISEÑO DE CONEXIONES.....	67
7.8.1	Tipo de juntas	67
7.8.2	Tipo de conexiones pernadas.....	69
7.9	REQUISITOS EN CONDICIÓN DE SERVICIO.....	73
8.	RESULTADOS	74
8.1	CÁLCULO DE CARGAS	74
8.1.1	Carga muerta (D).....	74
8.1.2	Fuerza de viento (W)	75
8.1.3	Sismo (E).....	77
8.2	SOFTWARE SAP2000.....	78
8.2.1	Análisis estructural.....	79
8.2.2	Diseño estructural.....	81
8.3	CONEXIONES	82
8.3.1	Conexión entre montantes.....	83
8.3.2	Conexión para diagonales	84
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	86
9.1	VERIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL VIENTO SOBRE LAS TORRES, EN COMPARACIÓN CON LOS EFECTOS SÍSMICOS.....	86
9.2	EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TORRES MEDIANTE LAS CARGAS APLICADAS.	89

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

9.3	CÁLCULOS MANUALES DE DISEÑO EN ELEMENTOS Y CONEXIONES.....	92
9.3.1	Montante principal T20m (SAP2000).....	92
9.3.2	Conexión entre tramos, empalme T20m (IDEA STATICA).....	95
9.3.3	Conexión en diagonales, Cartela T20m (RAM CONNECTION)	98
9.4	REALIZACIÓN GUÍA DE DISEÑO.....	101
9.4.1	Cimentación.....	103
9.4.2	Cantidades y presupuesto	105
9.4.3	Planos estructurales	108
10.	ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN	109
11.	CONCLUSIONES.....	110
12.	RECOMENDACIONES	111
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	112
14.	RELACIÓN DE ANEXOS	115

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

ÍNDICE DE TABLAS	Pág.
Tabla 1. Estadísticas mensuales de tormentas tropicales y huracanes	18
Tabla 2. Marco legal.....	32
Tabla 3 Aceros estructurales permitidos por la NSR-10.....	39
Tabla 4. Algunas secciones y ubicación de ejes.	40
Tabla 5. Clasificación de la estructura.....	41
Tabla 6. Factores de importancia	41
Tabla 7. Factor de importancia (cargas de viento) NSR-10.	42
Tabla 8. Coeficientes de la categoría de exposición	45
Tabla 9. Factor de direccionalidad TIA-222-G.....	45
Tabla 10. Factores de direccionalidad NSR-10.....	46
Tabla 11. Categoría topográfica	47
Tabla 12. Factores de dirección del viento.....	49
Tabla 13. Accesorios.....	51
Tabla 14. Coeficiente de fuerza para accesorios.	53
Tabla 15. Coeficiente de fuerza de viento para antena microondas típica con cubierta cilíndrica.	54
Tabla 16. Factores de sitio A_a y A_V	56
Tabla 17. Coeficiente de periodos cortos, F_a TIA-222-G	57
Tabla 18. Coeficiente de periodos cortos, F_a NSR-10	57
Tabla 19. Coeficiente de periodos intermedios, F_v	57
Tabla 20. Coeficiente de periodos intermedios, F_v NSR-10	58
Tabla 21. Clasificación de los perfiles de suelo.....	58
Tabla 22. Coeficiente de disipación de energía.....	60
Tabla 23. Factores por Rezago de Cortante para conexiones en miembros a tensión.....	64
Tabla 24 valores aproximados del factor de la longitud efectiva de K	66
Tabla 25. Resistencia nominal para pernos y piezas roscadas, MPa.	69
Tabla 26. Diámetros y áreas de pernos.	69



 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Tabla 27. Dimensiones Nominales de perforaciones.	71
Tabla 28. Distancias mínimas al borde.	72
Tabla 29. Elementos a soportar por las torres.....	74
Tabla 30. Escalera de acceso	74
Tabla 31. Cables de alimentación	75
Tabla 32. Malla plataforma superior	75
Tabla 33. Fuerza de viento Torre 20m	76
Tabla 34. Fuerza de viento Torre 30m	76
Tabla 35. Fuerza de viento Torre 40m	77
Tabla 36. Desplazamientos Torre 20m	79
Tabla 37. Desplazamientos Torre 30m	79
Tabla 38. Desplazamientos Torre 40m	79
Tabla 39. Reacciones Torre 20m	80
Tabla 40. Reacciones Torre 30m	80
Tabla 41. Reacciones Torre 40m	80
Tabla 42. Modos de vibración Torre 20m.....	80
Tabla 43. Modos de vibración Torre 30m.....	81
Tabla 44. Modos de vibración Torre 40m.....	81
Tabla 45. Diseño montantes Torre 20m	81
Tabla 46. Diseño montantes Torre 30m	82
Tabla 47. Diseño montantes Torre 40m	82
Tabla 48. Verificación de desplazamientos	89
Tabla 49. Comparación modos de vibración	90
Tabla 50. Cantidades Torre 20m.....	105
Tabla 51. Presupuesto Torre 20m.....	105
Tabla 52. Cantidades Torre 30m.....	106
Tabla 53. Presupuesto Torre 30m.....	106
Tabla 54. Cantidades Torre 40m.....	107
Tabla 55. Presupuesto Torre 40m.....	107

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

ÍNDICE DE FIGURAS	Pág.
Figura 1. Celosía simple y doble.	12
Figura 2. Zonas de amenaza eólica.	14
Figura 3. Amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño.....	15
Figura 4. Torres existentes de telecomunicación	16
Figura 5. Torre colapsada, Arecibo Puerto Rico.....	17
Figura 6. Torre colapsada, Barranquilla	19
Figura 7. Torre colapsada, Bogotá D.C.....	20
Figura 8. Gannat Francia, Viaducto de Neuvial.....	21
Figura 9. Construcción torre Eiffel	22
Figura 10. Partes de una torre.....	24
Figura 11. Patrones típicos de arrojamiento.....	25
Figura 12. Diagrama de flujo metodología.	31
Figura 13. Torre atirantada, Ibagué Tolima.	33
Figura 14. Torre monopolo, Bogotá D.C	34
Figura 15. Torre autosoportada, Bogotá D.C	35
Figura 16. Torres de estudio	36
Figura 17. Relación esfuerzo deformación del acero.	39
Figura 18. Espectro de diseño.....	55
Figura 19. Elemento sometido a tensión.	62
Figura 20. Perforaciones discontinuas.	62
Figura 21. Junta traslapada.....	68
Figura 22. Junta a tope (cortante doble).	68
Figura 23. Dirección del viento	75
Figura 24. Espectro de diseño Torres 20,30,40m	77
Figura 25. Modelo matemático de elementos finitos	78
Figura 26. Identificación de conexiones	82
Figura 27. Empalme Torre 20m.....	83
Figura 28. Empalme Torre 30m.....	83



 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Figura 29. Empalme Torre 40m.....	84
Figura 30. Cartela Torre 20m	84
Figura 31. Cartela Torre 30m	85
Figura 32. Cartela Torre 40m	85
Figura 33. Fuerza axial viento vs sismo Torre 20m.....	86
Figura 34. Fuerza axial viento vs sismo Torre 30m.....	87
Figura 35. Fuerza axial viento vs sismo Torre 40m.....	88
Figura 36. Comparación de desplazamientos	89
Figura 37. Elementos transversales.	90
Figura 38. Comparación periodos de vibración	91
Figura 39. Guía de diseño (SAP2000)	101
Figura 40. Guía de diseño (Idea Statica).....	102
Figura 41. Guía de diseño (Ram Connection).....	102
Figura 42. Esquema cimentación	103
Figura 43. Planos estructurales.....	108

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la civilización, el ser humano se ha visto en la necesidad de comunicarse con los demás. Dicha necesidad lo ha llevado a desarrollar innumerables técnicas de comunicación, partiendo de los métodos más rudimentarios, como la inclusión de jeroglíficos (3000 a. C.) y las señales de humo (150 a. C.), hasta evolucionar con la invención del telégrafo (1836), el teléfono (1860) y la radio (1907).

Considerando actualmente la influencia de la globalización y las necesidades crecientes de la humanidad por establecer normas de comunicación estable, global que permitan acceder con facilidad a una comunicación más rápida, clara, confiable, se puede mencionar la importancia del fenómeno de las telecomunicaciones. Como ejemplo relevante, el internet y los teléfonos celulares, los cuales basan su funcionamiento en antenas de transmisión de datos y señales de manera inalámbrica.

La evolución de las telecomunicaciones en Colombia conlleva el uso de antenas y elementos de gran dimensión y altura para su adecuado funcionamiento. Por lo tanto, ahí radica la importancia que tiene la ingeniería y la construcción civil para desarrollar torres adecuadas, que cumplan con la función de soportar estas antenas y todas las sollicitaciones de cargas a las que se someten estas estructuras.

Las torres de telecomunicaciones comúnmente son llamadas “antenas”. La configuración estructural de las torres es de tipo celosía, entendiéndose esto como una estructura de sección compuesta, es decir, columnas armadas con varios perfiles entre sí por diagonales¹ (Figura 1.). Esta forma particular, corresponde a las ventajas que tienen los elementos armados para resistir cargas, utilizando un menor peso, en comparación con los perfiles laminados simples.

Debido a la importancia de estas torres, en Estados Unidos, Canadá y los países que conforman la unión europea, existen normas dedicadas exclusivamente al diseño de este tipo de estructuras. Es el caso de la norma de la asociación de la industria de Telecomunicaciones/asociación de la industria electrónica versión G del año 2005 (TIA/EIA 222-G por sus siglas en inglés), el código canadiense S37-01 CSA-2006 y el Eurocódigo 3 (Part 3-1: Towers, masts and chimneys) respectivamente.

¹ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.111.


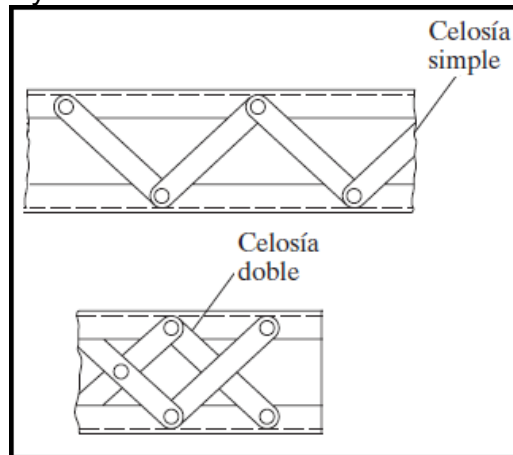
 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--


Figura 1. Celosía simple y doble.



Fuente: Diseño de Estructuras de Acero – McCormac. (Extracto) p. 184.

En Colombia aún no existe una norma especializada en torres de celosía, es por esto, que esta investigación desarrolla una guía de diseño estructural, partiendo de un análisis detallado de las estructuras, utilizando normativa internacional aplicada al medio colombiano para condiciones geográficas y climáticas representativas del territorio nacional. El proceso de diseño consiste en utilizar software especializado para determinar soluciones óptimas en acero, a fin de implementar torres cuyos rangos de alturas estén comprendidos entre 20 a 40 metros.

Por otra parte, se espera que con esta investigación se reduzcan las incertidumbres de diseño para estas estructuras, y de este modo generar un impacto relevante en la sociedad, con el fin de brindar soluciones de telecomunicaciones seguras y confiables.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Desde el siglo XIX, debido al fenómeno de la revolución industrial, las estructuras metálicas se hicieron presentes en el desarrollo de las civilizaciones, permitiendo crear infraestructuras para diferentes necesidades (puentes, viaductos, torres, etc.). Con base en esto, las torres de celosía evolucionaron con la necesidad de soportar antenas de transmisión para diferentes medios de comunicación.

“En Colombia para el siglo XIX apenas iniciaban los primeros puentes en celosía hechos en madera, esto porque el acero fue un material escaso y el costo de importarlo era muy alto”². No obstante, la ferrería pradera en 1886 fue pionera en el desarrollo del hierro en el país, de la mano del ingeniero mecánico inglés W.E. Worral, quien fue el encargado de la producción de rieles y maquinas. Esto permitió aumentar la fabricación del hierro y con ello la implementación de torres livianas para líneas eléctricas y de comunicación en el territorio nacional.

Las torres de telecomunicaciones son estructuras indispensables, que rigen el avance tecnológico y mantienen comunicado a un país. En especial con este tipo de estructuras se pretende dar soporte a la nueva tecnología que está a punto de implementarse en Colombia como lo es la red 5G, según el Ministerio de Tecnologías de la Información (*MinTIC*).

Por este motivo, se requiere de antenas de transmisión mucho más grandes que las actuales, esto implica un cálculo estructural más riguroso. Además, según información del Ministerio de las TIC (tecnologías de la información y la comunicación) y el periódico el Tiempo, “La demanda de suscriptores está siendo soportada por cerca de 15.000 antenas. Sin embargo, para cumplir con una cobertura adecuada se planea la instalación de unas 7000 a 10000 antenas más para una mejor cobertura que aporte al desarrollo del país”³.

De igual manera, es importante mencionar que el análisis y diseño de torres es relativamente complejo y que requiere de una investigación especializada, apoyada en normas de países como Estados Unidos con la norma TIA/EIA 222-G, Canadá con el código S37-01 CSA-2006 y el Eurocódigo en su Parte 3-1.

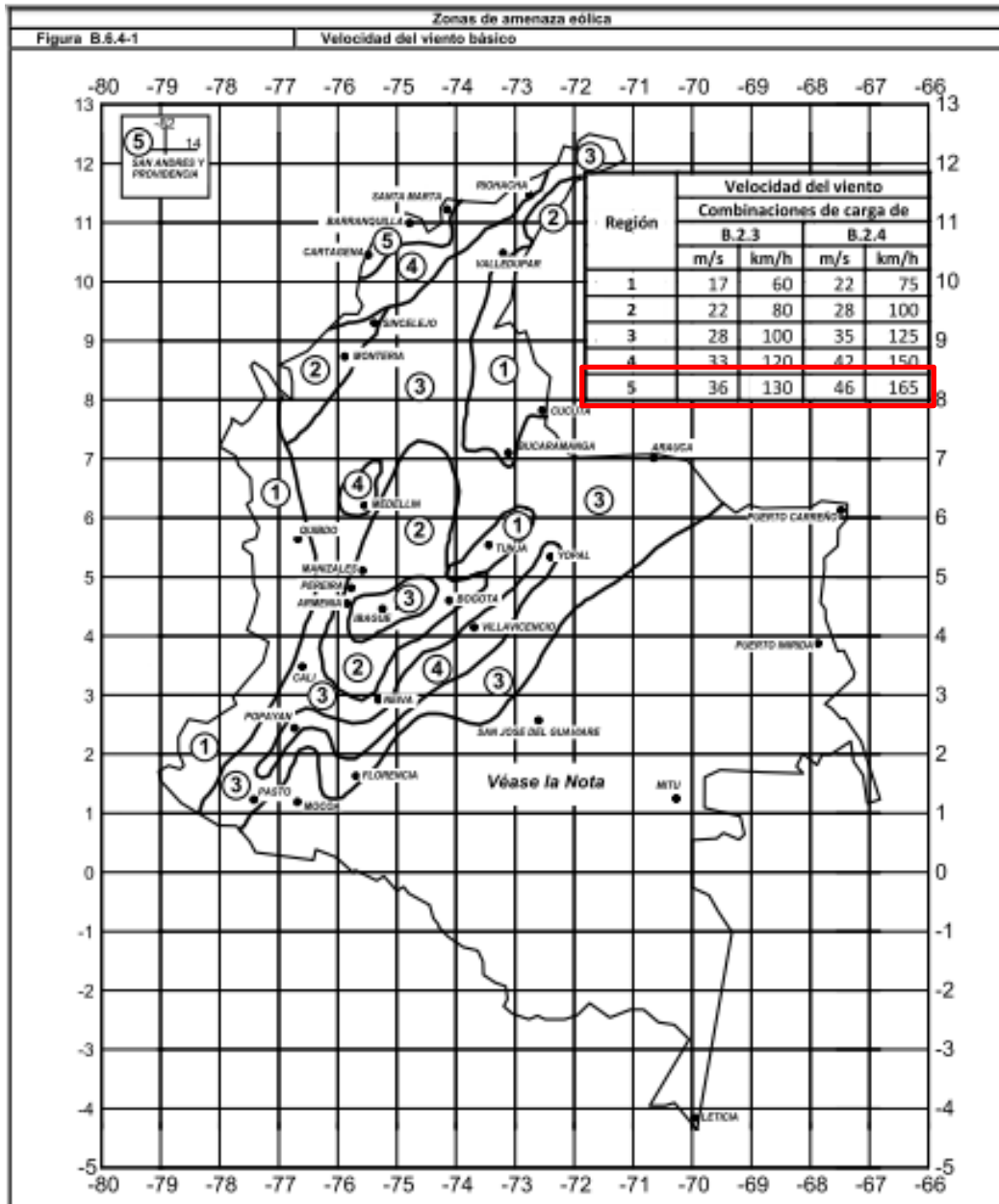
² JARAMILLO, Viviana y SIACHICA, Yeison. Guía de diseño para la construcción de cruces elevados en Colombia aplicado a poliductos. Bogotá, 2018, p. 10

³ PEÑA C., Camilo Andrés. Todo lo que usted no sabe de las antenas de telecomunicaciones. [En línea]. 2017. [Citada el: 10 de febrero de 2019.]. Disponible en internet: www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/labor-e-importancia-de-las-antenas-de-telecomunicacion-144818.



Actualmente Colombia no cuenta con una norma de diseño exclusiva para torres de celosía y esto genera que los ingenieros utilicen códigos generales y exista la posibilidad de cometer algunos errores. Es por esto, que el presente documento se genera una guía de diseño aplicada al medio colombiano, utilizando la NSR-10 (Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente), seleccionando la región de viento 5, con el propósito de evaluar las regiones eólicas más críticas del país (Figura 2).

Figura 2. Zonas de amenaza eólica.

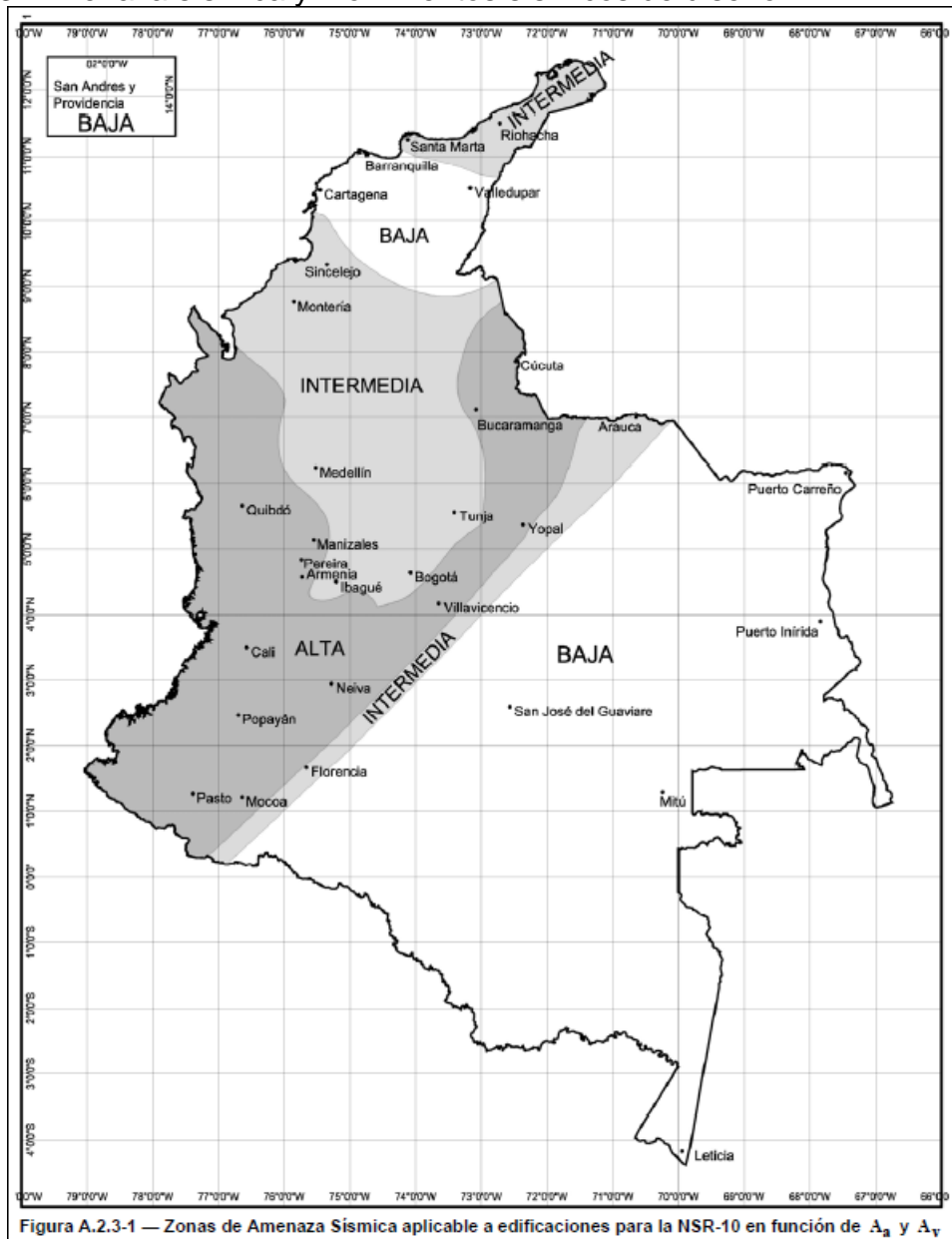


Fuente: NSR-10, título B (extracto).



Así mismo, la selección de zona de amenaza sísmica se realiza teniendo en cuenta el mayor porcentaje de población, y según el INGEOMINAS⁴, esta corresponde a la zona intermedia, ya que 435 cabeceras municipales, son equivalentes al 51% de la población (Figura 3).

Figura 3. Amenaza sísmica y movimientos sísmicos de diseño.



Fuente: NSR-10, título A (extracto).

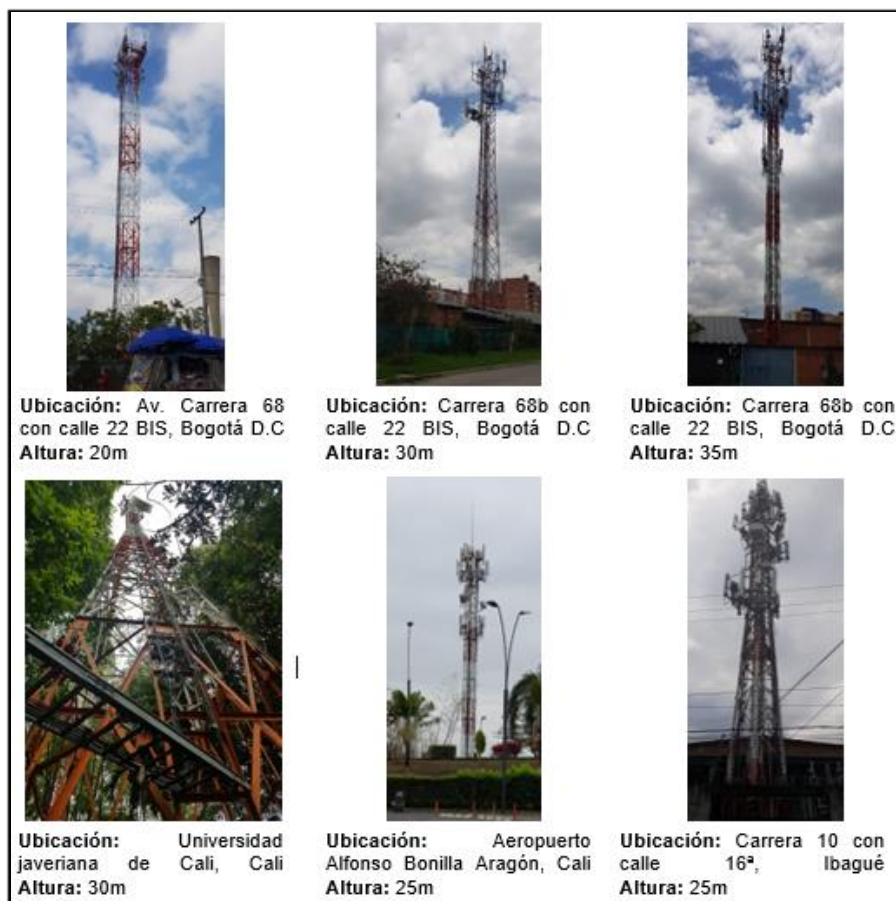
⁴ INGEOMINAS, Ministerio de minas y energía. Plano mapa zonificación sísmica y valores A_a . Bogotá, 1999, p. 1

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--


Como información adicional, es pertinente mencionar que Colombia no es ajena al problema de colapsos de torres, ya sea por eventos naturales extremos o por error humano en el diseño estructural, de cimentación o en la supervisión y montaje de las estructuras. Estas torres comúnmente presentan el tipo de falla súbita, que corresponde a la falla repentina de los elementos que componen el armazón, ya sea por condiciones internas o externas que impiden su funcionamiento y provocan su colapso. Con base en lo anterior, se genera la necesidad de crear una guía de diseño estructural para torres de telecomunicaciones (autosoportadas).

Para la realización del presente proyecto de investigación, se realizó un trayecto de reconocimiento en varias ciudades del país (Bogotá, Ibagué y Cali), con el propósito de identificar la altura y elementos de las torres más representativas. Estas alturas oscilan entre los 20m y 40m, por lo que se adoptan estas características con base en los recorridos visuales realizados por el casco urbano de cada ciudad y cuyo registro fotográfico se evidencia en la Figura 4.

Figura 4. Torres existentes de telecomunicación



Fuente: Archivo propio.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

“Las torres de telecomunicaciones son estructuras delgadas, con características estructurales de bajo amortiguamiento y flexibles, lo que las hace realmente sensibles y vulnerables a las acciones dinámicas como el viento y el sismo”⁵. Uno de los problemas principales de las torres radica en los colapsos que se presentan debido a un análisis estructural que subestima las cargas producidas por las eventualidades mencionadas, o por el error humano al momento de calcularlas.

A nivel mundial se han evidenciado varios colapsos relacionados con estructuras de celosía, como por ejemplo en Cuba, donde la ingeniera Vivian Parnas⁶ vio la necesidad de realizar un estudio como respuesta a los numerosos incidentes en torres, provocados por huracanes entre los años 1996 y 2006. Así mismo, Puerto Rico actualmente sufre esta problemática y se evidencia en el artículo de ALVARADO⁷, donde se habla acerca de 300 torres colapsadas por el paso del huracán María (Figura 5), el cual alcanzo una velocidad de viento de 280km/h y las comunidades plantean la necesidad de tener un reglamento exclusivo para la construcción de este tipo de estructuras.

Figura 5. Torre colapsada, Arecibo Puerto Rico




Fuente: ALVARADO, Gerardo E. Frente comunitario propone nuevas guías para torres de comunicación. [En línea]. 2018. [Citada: 14 marzo 2019]. Disponible en internet: <https://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/frentecomunitarioproponenuevasguiasparatorresdecomunicacion-2397734/>

⁵ RODRÍGUEZ, Patricia M. Evaluación de la vulnerabilidad estructural de torres autoportadas de telecomunicaciones bajo cargas de viento y sismo. La Habana, 2012, p. Resumen

⁶ PARNÁS, Vivian Elena. Fallas estructurales en torres reticuladas para telecomunicaciones. En: Arquitectura y urbanismo. Junio, 2008, vol. XXIX, no. 2-3. ISSN 0258-591X

⁷ ALVARADO, Gerardo E. Frente comunitario propone nuevas guías para torres de comunicación. [En línea]. 2018. [Citada: 14 marzo 2019]. Disponible en internet: <https://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/frentecomunitarioproponenuevasguiasparatorresdecomunicacion-2397734/>

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Los colapsos en torres de telecomunicaciones se hacen más susceptibles en épocas de tormentas tropicales y huracanes, repitiendo esta tendencia año tras año. De acuerdo a las estadísticas (Tabla1), “las tormentas tropicales que ocurren en toda la cuenca océano Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México solo el 15% cubre el área de estudio y de 34 casos de huracanes, solo pasan por el caribe el 9%, por ello, la probabilidad de afectación en el Caribe colombiano es baja, inferior al 10%, de acuerdo con los estudios de Tang y Neelin (2004)”⁸. Sin embargo, resulta pertinente tener en cuenta este porcentaje, y aunque sea bajo considerarlo en el estudio y diseño de torres.

Tabla 1. Estadísticas mensuales de tormentas tropicales y huracanes

Tabla 2. Estadística mensual de tormentas tropicales y huracanes entre 1851 y 2005, en el Mar Caribe.

Mes	Total Absoluto Tormentas Tropicales	Total Relativo Tormentas Tropicales	Promedio Tormentas Tropicales	Total Absoluto Huracanes	Total Relativo Huracanes	Promedio Huracanes
Enero-Abril	0	0	0.00	1	1	0.01
Mayo	6	3	0.04	2	1	0.01
Junio	7	3	0.05	0	0	0.00
Julio	14	6	0.09	12	6	0.08
Agosto	51	23	0.33	50	26	0.32
Septiembre	67	30	0.43	81	42	0.52
Octubre	57	25	0.37	39	20	0.25
Noviembre	19	8	0.12	8	4	0.05
Diciembre	4	2	0.03	0	0	0.00
Anual	225	100	1.45	193	100.0	1.25


Fuente: CICLONES TROPICALES EN COLOMBIA Y TENDENCIAS DE LA FRECUENCIA DURANTE EL ÚLTIMO SIGLO. IDEAM. p. 5.

En Colombia la problemática de colapsos no es menor, ya que existen antecedentes de colapsos en diferentes zonas del país. Es el caso de la ciudad de Cali en el 2014, donde el periódico el tiempo afirma: “En medio del ventarrón se produjo un estruendo en el centro de esta ciudad cuando se desplomó una antena de comunicaciones en la calle 13 con carrera 4, en el centro urbano de la ciudad”⁹. Así mismo, en la ciudad de Barranquilla en el año 2017, el periódico zona cero titula: “Torre de comunicaciones cae sobre taxi por las fuertes brisas en el norte de Barranquilla”¹⁰ (Figura 6). De igual manera en la Ciudad de Bogotá año 2016, el

⁸ LEÓN A., Gloria Esperanza. CICLONES TROPICALES EN COLOMBIA Y TENDENCIAS DE LA FRECUENCIA DURANTE EL ÚLTIMO SIGLO. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá, D. C., Diciembre 2017. p. 5

⁹ CALI. Ventarrón tumbó torre de comunicaciones en Cali. [En línea]. 2014. [Citada: 14 marzo 2019]. Disponible en internet: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14010029>

¹⁰ ZONA CERO. Torre de comunicaciones cae sobre taxi por las fuertes brisas en el norte de Barranquilla. [En línea]. 2016. [Citada el: 12 enero 2019.]. Disponible en internet:

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

periódico el tiempo relata: “De acuerdo con la información del IDGER (Instituto Distrital para la Gestión del Riesgo) y del Cuerpo de Bomberos de Bogotá, los obreros estaban en la parte superior de la torre de telecomunicaciones, pero al parecer la estructura no soportó el peso de los dos trabajadores y eso habría generado su colapso¹¹” (Figura 7).

Esta problemática sumada a la falta de una normatividad exclusiva para torres, deja en evidencia el cuidado y la responsabilidad que se debe tener al momento de diseñar y construir este tipo de estructuras. De este modo, el problema se aborda mediante la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo realizar una guía de diseño de torres de telecomunicación para reducir colapsos, de acuerdo a la norma ANSI/TIA, considerando los efectos ambientales más representativos del medio colombiano?. Esta pregunta genera la necesidad de investigar para brindar soluciones definitivas, que aporten al desarrollo del país.

Figura 6. Torre colapsada, Barranquilla



Fuente: ZONA CERO. Torre de comunicaciones cae sobre taxi por las fuertes brisas en el norte de Barranquilla. [En línea]. 2016. [Citada el: 12 enero 2019.]. Disponible en internet: <http://zonacero.com/?q=generales/torre-de-comunicaciones-cae-sobre-taxi-por-las-fuertes-brisas-en-el-norte-de-barranquilla>

<http://zonacero.com/?q=generales/torre-de-comunicaciones-cae-sobre-taxi-por-las-fuertes-brisas-en-el-norte-de-barranquilla>

¹¹ REDACCIÓN BOGOTÁ. Dos obreros muertos dejó el colapso de dos antenas en Bogotá. [En línea]. 2016. [Citada el: 12 de enero de 2019]. Disponible en internet: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16562859>


 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Figura 7. Torre colapsada, Bogotá D.C



Fuente: REDACCIÓN BOGOTÁ. Dos obreros muertos dejó el colapso de dos antenas en Bogotá. [En línea]. 2016. [Citada el: 12 de enero de 2019]. Disponible en internet: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16562859>.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 HISTORIA

La revolución industrial del siglo XIX fue un hecho que marco relevancia para la ingeniería civil por el nacimiento del ferrocarril y los procesos metalúrgicos. El desarrollo de las torres de celosía desde esta época está marcado por construcciones famosas, también consideradas hitos de la ingeniería. El ingeniero francés Alexander Gustave Eiffel, fue el máximo exponente de las estructuras metálicas en este periodo y uno de los primeros en diseñar y construir torres de hierro fundido en proyectos como el viaducto de Neuvial, y la torre Eiffel de París.


Para el año 1867, con la construcción del viaducto de Neuvial (Figura 8), se utilizaron torres de celosía como pilares, según Bonet¹², el diseño de estos pilares empleo una técnica nueva en Francia con tubos de hierro fundido en las piezas maestras, lo que le permitió a Eiffel mejorar el mecanismo de unión entre tubos y tirantes.

Figura 8. Gannat Francia, Viaducto de Neuvial



Fuente: BONET, Llorenç. Gustave Alexandre Eiffel. Londres: TeNeues, 2003. p. 24

¹² BONET, Llorenç. Gustave Alexandre Eiffel. Londres: TeNeues, 2003. p. 23

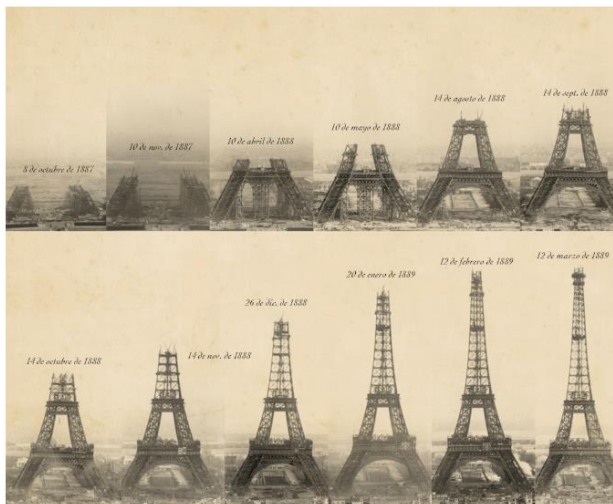
 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

En el transcurso de esta época, el hierro empezó a tener un importante auge, a tal punto que se consideró como el nuevo material estructural. Es así como en el año 1887, Con la necesidad de crear estructuras majestuosas de alturas considerables, se inician obras de la torre Eiffel (Figura 9), la cual consistía en la construcción de una torre en celosía de más de 300 metros de altura.

La construcción de la torre suponía retos y consideraciones estructurales especiales. El autor afirma en su texto lo siguiente: “La primera preocupación de los ingenieros era impedir que la torre volcara, lo que se logró mediante el trazado campaniforme de sus cuatro pilares, que le proporcionan la estabilidad suficiente. Las 7.341 toneladas de peso de la torre quedaron así firmemente asentadas. La segunda preocupación era evitar que la torre se deformara (o balanceara) en exceso a causa de la acción del viento, por lo que debía ser una estructura de elevada rigidez. Esto se consiguió mediante dos recursos: la conexión de los cuatro grandes pilares de la torre mediante una gran viga de celosía a la altura de la primera planta y el sistema de la triangulación”¹³.


De esta manera, en el año 1889 se logró erigir la que sería la torre más alta del mundo hasta 1930. En principio, el ejército francés la utilizó como torre de comunicación, lo que la convierte en una de las primeras torres en tener esta función, y que representaría un modelo a seguir en futuros proyectos. Actualmente su uso se limita en ser, emisora de radio y atractivo turístico.

Figura 9. Construcción torre Eiffel



Fuente: LÓPEZ, Isaac. La torre Eiffel: la construcción de un coloso. [En línea]. 2017. [Citada: 14 marzo 2019]. Disponible en internet: https://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/torre-eiffel-construccion-coloso_11345/22

¹³ LÓPEZ, Isaac. La torre Eiffel: la construcción de un coloso. [En línea]. 2017. [Citada: 14 marzo 2019]. Disponible en internet: https://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/torre-eiffel-construccion-coloso_11345/22

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

En el contexto colombiano, resulta difícil precisar la década inicial del uso de torres, sin embargo, en 1950 se crea la empresa nacional de telecomunicaciones, por lo que surgió la necesidad de implementar infraestructura de gran altura para lograr una mayor cobertura y generar los primeros circuitos inalámbricos de comunicación. Posteriormente, en el año 1970 se inaugura la estación terrena de comunicaciones en Chocontá, esta estación estaba compuesta por antenas satelitales soportadas en estructuras de acero en celosía, lo que sumado a el desarrollo de líneas de transmisión eléctrica y a las estaciones de telecomunicaciones, impulso la realización de torres metálicas en el país.

2.2 APLICACIÓN AL MEDIO COLOMBIANO


El reglamento colombiano de construcción sismo resistente se fundamenta en la Ley 400 de 1997, la cual expide en el año 1998 la denominada “Norma sismo resistente NSR-98” y posteriormente en el año 2010, la hoy vigente NSR-10. Esta normativa en el numeral A.1.2.3, establece en su alcance los requerimientos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones. Sin embargo, el diseño de torres en celosía no está contemplado en este documento y queda evidenciado en el numeral A.1.2.4, correspondiente a las excepciones, las cuales se transcriben a continuación:

“A.1.2.4 — EXCEPCIONES — El presente Reglamento de Construcciones Sismo Resistentes, NSR-10, es aplicable a edificaciones (construcciones cuyo uso primordial es la habitación u ocupación por seres humanos) y no se aplica a:

A.1.2.4.1 — 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.”

Con base en lo anterior, es evidente que existe una incertidumbre con relación al diseño de estas estructuras en Colombia. Sin embargo, con ayuda de la norma TIA/EIA-222-G de 2005 (Structural standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures), se realiza una investigación con el fin de establecer relaciones que permitan aplicar estos requerimientos al medio colombiano a través de una guía de diseño, tal como lo realizó BETANCOURTH¹⁴ para Guatemala.

¹⁴ APLICACIÓN NORMA TIA/EIA 222G PARA TORRES AUTOSOPORTADAS TIPO CELOSÍA DE TELECOMUNICACIONES EN GUATEMALA Y COMPARACIÓN CON NORMA TIA/EIA 222F. . Guatemala : s.n., 2013

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

2.3 CONSIDERACIONES ESTRUCTURALES

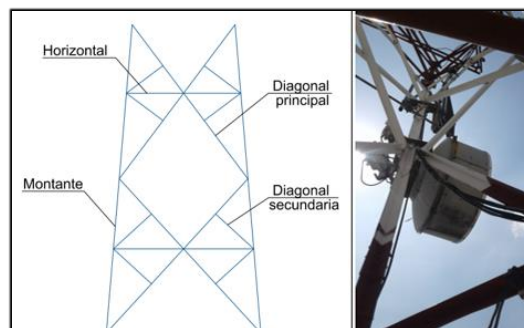
Diferentes estudios e investigaciones desarrolladas alrededor del mundo, han estado enfocadas a determinar las condiciones geométricas y estructurales para la correcta modelación de las torres en celosía. Por ende, es importante mencionar que la idealización es una de las partes más importantes del diseño estructural, ya que las estructuras deben modelarse de forma análoga a la realidad.

2.3.1 Geometría en torres

“Las torres de telecomunicaciones son estructuras reticulares y se conforman de barras dispuestas en diferentes formas (cuadrada, triangular, etc.) articuladas en sus nudos. El triángulo es la única forma estructural compuesta por barras articuladas en sus nudos, capaz de resistir grandes deformaciones debido al giro de las barras”¹⁵.

La selección de una correcta geometría es de vital importancia, ya que de esto depende la ejecución de un buen análisis estructural, la facilidad para construcción y el costo de las torres. Debido a esto, una torre es considerada una sección compuesta, es decir, una columna desarrollada empleando varios perfiles para lograr una mayor capacidad de carga y altura, utilizando menor peso en la estructura y por ende a un menor costo. Para comprender la estructuración de una torre, es necesario conocer las partes que la conforman. En la Figura 10, se aprecia la nomenclatura típica empleada para los diferentes elementos. Así mismo, la Figura 11 presenta los arrostramientos típicos en torres, con base en el Eurocódigo 3 Part 3-1: Towers, masts and chimneys. De este modo, el presente diseño selecciona el tipo IIA de “arrostramientos cruzados”.

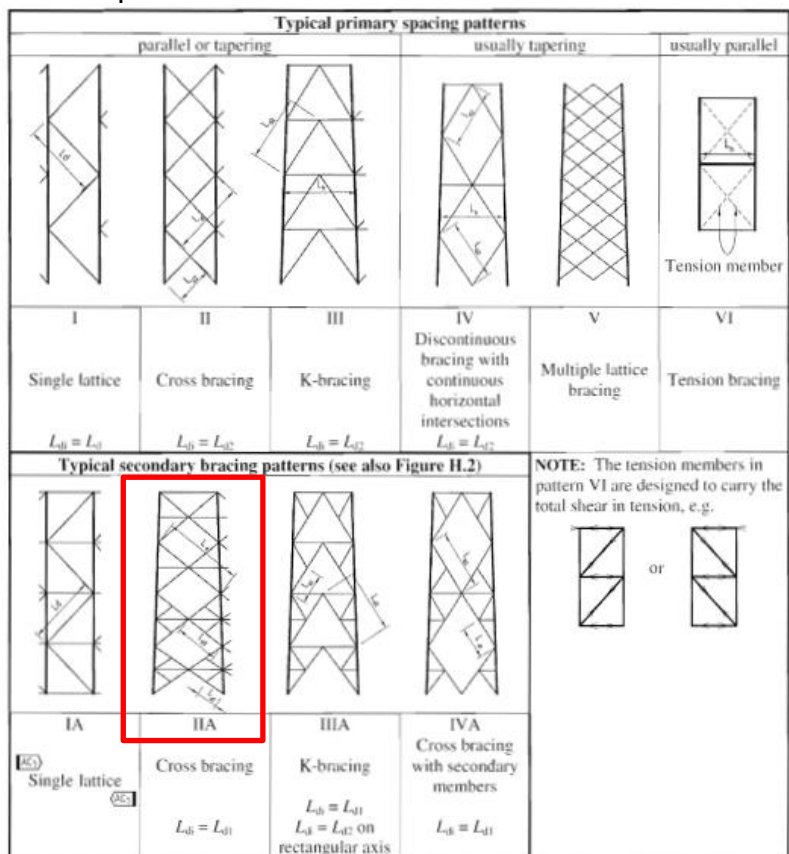
Figura 10. Partes de una torre



Fuente: Elaboración propia

¹⁵ GUTIÉRREZ MÉNDEZ, Karen. Análisis de una torre de telecomunicaciones atirantada ante los efectos del viento: relación del costo de la torre en función de la velocidad de viento. Ciudad de México, 2015, p. 26

Figura 11. Patrones típicos de arrostramiento.




Fuente: Eurocódigo 3 (Part 3-1: Towers, masts and chimneys), 2006 (extracto)

2.3.2 Análisis estructural

El análisis y modelado de la estructura es la parte más importante del diseño, ya que en esta se idealiza la torre cómo se comportará en la realidad. En su investigación, DA SILVA¹⁶ afirma que las torres de telecomunicación y transmisión asumen un comportamiento de celosía simple, donde todas las conexiones diseñadas se consideran articuladas. Es importante mencionar también, que el análisis general de la estructura se realiza como una viga en voladizo y que los elementos que la conforman trabajan similar a una cercha, es decir, a esfuerzos de tensión y compresión únicamente.

La norma TIA/EIA-222-G de 2005 complementa esta idea, mencionando que los modelos aceptados son aquellos que corresponden a una cercha tridimensional, compuesto por tramos rectos conectados en nodos, y articulados de tal manera que produzcan únicamente fuerzas axiales en los miembros.

¹⁶ J.G.S. da Silva, *et al.* Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers. Rio de Janeiro, 2005, p. 1109

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

2.4 CONSIDERACIONES SÍSMICAS

Debido a la naturaleza de las torres metálicas, anteriormente no se consideraba el análisis sísmico como hipótesis a evaluar. Sin embargo, en zonas de amenaza sísmica intermedia y alta, resulta importante incluir este análisis basado en revisiones bibliográficas realizadas.

AMIRI y MASSAH¹⁷, fueron los principales investigadores en considerar el análisis sísmico aplicado especialmente a torres se sección cuadrada, es decir, considerando apoyos de cuatro (4) patas o montantes. El análisis propuesto fue el dinámico lineal, concluyendo que la carga de viento prevalece a la carga sísmica, pero que debido a la similitud de los resultados resulta necesario investigar las fuerzas de sismo.

En documentos como el de RODRIGUEZ¹⁸, se evalúa la vulnerabilidad de dos (2) torres; una de sección triangular y otra de sección cuadrada, dando como resultado que la combinación de la acción de la carga de sismo aplicada en las dos direcciones de las secciones transversales, es el estado más desfavorable para todos los elementos en ambos modelos. El estudio anterior no tiene en cuenta la carga generada por las antenas, lo que puede suponer un error a tener presente para la actual investigación.


Investigaciones más recientes, como la de METI y VIJAPUR¹⁹, consideran de importancia la utilización de amortiguadores viscosos en las torres, con el propósito de aumentar rigidez y disminuir los periodos sísmicos entre un 5-20%. No obstante, la implementación de estos amortiguadores no es de uso común en el país, por lo que tener en cuenta estos elementos, no representa una solución viable aplicada al medio colombiano.

Por otra parte, con la importancia de los efectos sísmicos sobre estas estructuras, los códigos actuales de diseño ya incluyen el análisis sísmico para torres de telecomunicación. Es el caso de la norma TIA/EIA-222-G de 2005 con la implementación del método de análisis modal, para la cual este proyecto tomara de guía, por ser equivalente con el mapa de amenaza sísmica de la NSR-10 (Figura 3).

¹⁷ AMIRI, G.G. and S.R. MASSAH, Seismic Response of 4-Legged Self-Supporting Telecommunication Towers. IJE Transactions B: Applications, 2007. Vol. 20 (No. 2): p. 107-125.

¹⁸ RODRÍGUEZ, Patricia M. Evaluación de la vulnerabilidad estructural de torres autosoportadas de telecomunicaciones bajo cargas de viento y sismo. La Habana, 2012, p. 97

¹⁹ METI, Ashok and VIJAPUR, Vinayak. Seismic Analysis of Telecommunication Tower Using Viscous Damper. Karnataka, 2017, p. 2804

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

2.5 CONSIDERACIONES DE VIENTO

La hipótesis de carga de viento, generalmente es la que predomina en el diseño de las torres. Esta consideración es la más importante, ya que la mayoría de colapsos presentados anteriormente se deben a este efecto. Con base en lo anterior, se debe tener en cuenta el fenómeno de volteo sobre las estructuras para garantizar el uso adecuado de las torres.

Las normas internacionales siguen un patrón básico para estimar las fuerzas de viento. Inicialmente se tiene en cuenta una categoría de exposición y se asume una velocidad de viento en función del sitio donde se ubica la torre. La investigación de TESSARI²⁰ considera un modelo estático y un modelo dinámico aplicado a una torre de 50m de altura. La conclusión de este análisis indica que ambos modelos conducen a niveles de seguridad muy similares, por lo que la dirección de viento más desfavorable resulta ser un análisis conservador, aplicable a esta investigación.

Adicionalmente, se deben tener en cuenta los efectos del viento sobre las antenas, basado en diferentes proyectos de investigación. Un ejemplo de esto, es el estudio experimental de las antenas parabólicas de las torres de telecomunicaciones, realizado por MARTÍN²¹, donde se evalúa la presencia de cargas adicionales en la torre, por causa de la forma de las antenas.

En ese sentido, la norma TIA/EIA-222-G de 2005 es la más adecuada para realizar este análisis, ya que, considera las fuerzas de viento para la estructura y los accesorios de las torres (antenas, escalera, cables de alimentación). Este procedimiento corresponde al método analítico, equivalente al de la norma NSR-10.

²⁰ TESSARI, R. K., KROETZ, H. M., & BECK, A. T. Performance-based design of steel towers subject to wind action. *Engineering Structures*, 2017, p. 557


²¹ MARTÍN, P., Elena, V. B., LOREDO-SOUZA, A. M., & CAMAÑO, E. B. Experimental study of the effects of dish antennas on the wind loading of telecommunication towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, p. 40–47

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

3. ALCANCE Y LIMITACIONES

Se desarrolla el análisis y diseño estructural para tres (3) torres de telecomunicaciones de 20, 30 y 40m de altura utilizando el software SAP2000 y las normas NSR-10 (Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente) y TIA/EIA 222-G (Structural standard for antenna), abarcando el diseño de conexiones pernadas con el software RAM CONNETION e IDEA STATICA. Así mismo, se propone una cimentación de tipo superficial para un perfil de suelo tipo D con capacidad portante de 10 T/m². Con estas características se tiene en cuenta un suelo típico, esperando abarcar un gran porcentaje del territorio nacional que requiera de la utilización de esta guía. También es alcance de esta investigación incluir planos estructurales de las torres con su respectivo presupuesto (costos directos).

Para ello se utiliza el análisis sísmico dinámico en zona intermedia y el método analítico para la fuerza de viento en regiones tipo 5, utilizando el software SAP2000. Esta investigación limita las estructuras a un solo tipo de geometría, cargas y acero comercial ASTM A992. De igual manera, se excluye el diseño de elementos no estructurales, placa base, método constructivo, selección y justificación de equipos y esquema de protección a la corrosión. De este modo la investigación se centra exclusivamente en el análisis estructural de las torres afectado bajo las hipótesis de cargas evaluadas.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--


4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Elaborar una guía aplicada al diseño estructural de torres de telecomunicaciones para alturas de 20, 30 y 40m, teniendo en cuenta las condiciones ambientales más representativas del país. Esto con el fin de aportar en el proceso de mitigar colapsos, reducir tiempos de diseño y estimar costos de las estructuras.

4.2 ESPECÍFICOS

- Verificar la influencia del viento sobre las torres, en comparación con los efectos sísmicos.
- Evaluar el comportamiento de las torres mediante las cargas aplicadas, teniendo en cuenta la altura y el tipo de celosía escogido.
- Realizar los cálculos manuales de diseño para los elementos y conexiones de mayor importancia en las estructuras, para posteriormente validarlo con software RAM CONNECTION y SAP2000.
- Generar una guía de diseño incluyendo cimentación de tipo superficial, memorias de cálculo, planos estructurales y presupuesto.

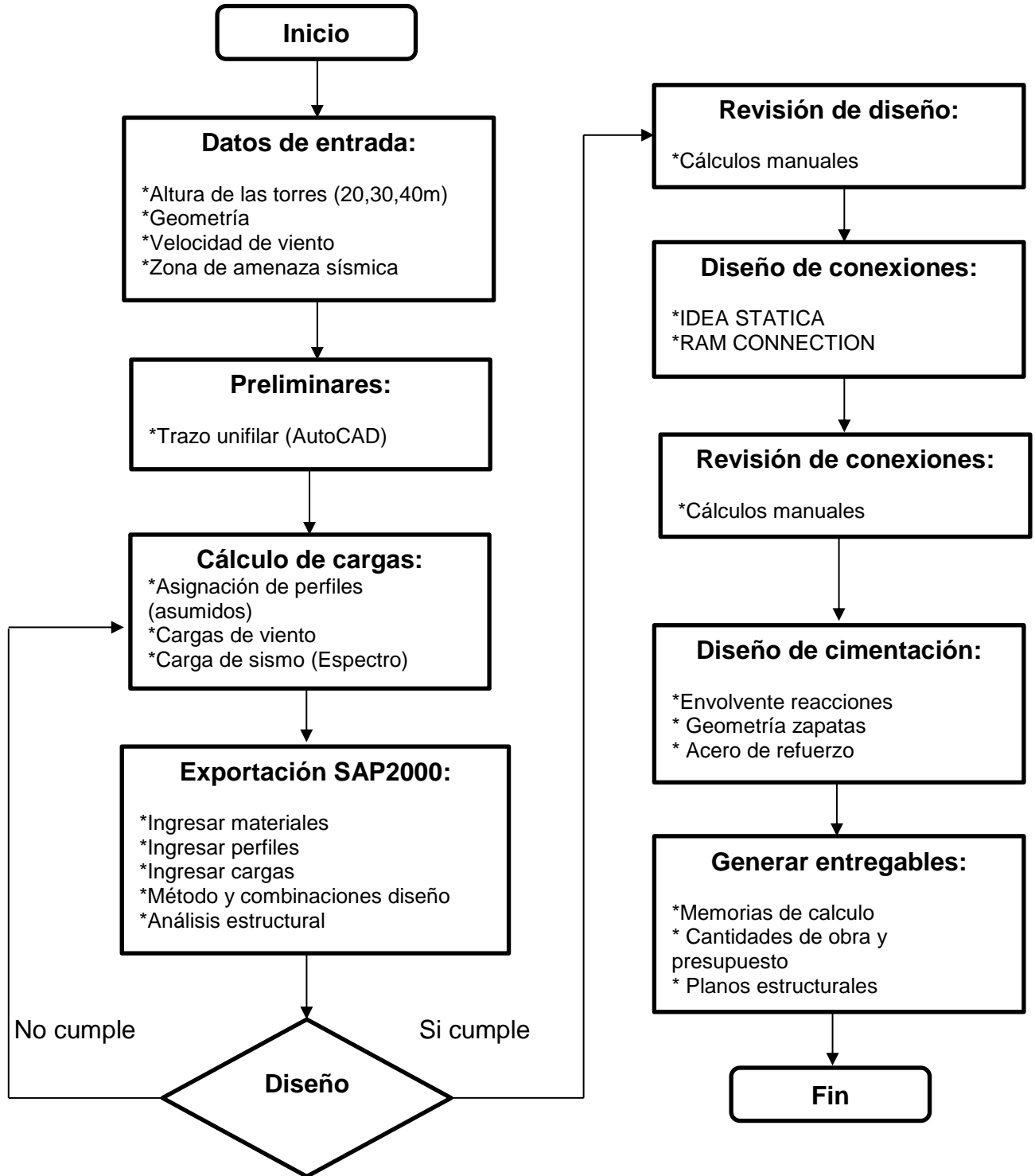
 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

5. METODOLOGÍA


De acuerdo con los parámetros establecidos en el apartado 4, correspondiente a los objetivos del proyecto, el presente trabajo se desarrolla empleando las siguientes acciones de manera secuencial (Figura 12):

- Se utiliza el software *AutoCAD* para realizar el trazo unifilar (esquema del dibujo en 3D por medio de líneas) de la torre, para poder ser exportado a *SAP2000*. Respectivamente, en *SAP2000* se evalúan las condiciones de esfuerzos y deformaciones sobre las estructuras. De esta manera, se realizará una comparación de las tres (3) torres, las cuales se analizan con la misma cuantía estructural.
- Se analizan las condiciones del viento sobre las torres y posteriormente una comparación de los resultados con el análisis sísmico realizado en *SAP2000*. De esta manera, se determinan las cargas que gobiernan el diseño de las torres.
- Revisar mediante cálculos manuales el diseño de los montantes principales de las torres. Con esta metodología se podrá comprobar que el análisis realizado para los diferentes esfuerzos (tensión, compresión, cortante, etc.) son evaluados correctamente sobre el elemento y corresponden con similitud a los resultados del software *SAP2000*. De esta manera se podrá obtener una relación demanda/capacidad lo suficientemente confiable.
- Diseñar conexiones pernadas utilizando el programa *RAM CONNECTION* e *IDEA STATICA CONNECTION*. Posteriormente se realiza una validación manual para las uniones por aplastamiento, específicamente para la conexión entre tramos de las torres y diagonales, usando para ello, pernos de alta resistencia A325.
- Generar una envolvente de cargas para determinar las reacciones en la base de las torres y de esta manera realizar el diseño de la cimentación superficial (zapatas).
- Realizar el diseño óptimo de las torres analizadas, de tal manera que la relación peso/beneficio de las estructuras sea de viable ejecución en el contexto nacional. Para ello se realizan planos estructurales y posteriormente se estiman las cantidades y presupuestos de las torres.
- Con base en lo anterior, se desarrollan memorias de cálculo para cada una de las torres (20,30 y 40 metros), con el fin de generar una guía de diseño de amplia utilización en el territorio nacional.

Figura 12. Diagrama de flujo metodología.



Fuente: Elaboración propia.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1 MARCO NORMATIVO

El presente proyecto está basado en normas nacionales e internacionales, bien sea para consideraciones de cargas o para el diseño y recomendaciones de las mismas.

- NSR-10 (Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente)
- TIA/EIA-222 G (Structural Standard for Antenna Towers and Antenna Supporting Structures), manual guía para el diseño de torres de comunicación.
- ASCE (American Society of Civil Engineers)
- AISC (American Institute of Steel Construction), manual guía para el procedimiento, evaluación y diseño de las estructuras en acero.
- ACI (American Concrete Institute), manual guía para tener en cuenta en el diseño de la cimentación superficial.


6.2 MARCO LEGAL

A continuación, se hará referencia de algunas normativas (decretos y resoluciones), las cuales regulan las actividades de este tipo de estructuras.

Tabla 2. Marco legal

Política y normatividad	
Resolución 1409 del 2012	Reglamenta seguridad para protección contra caídas en trabajo en alturas.
Decreto 676 2011	Establece las normas urbanísticas, arquitectónicas y técnicas para la ubicación e instalación de Estaciones de Telecomunicaciones Inalámbricas.
Decreto 1469 2010	La cual reglamenta las disposiciones relativas a las licencias urbanísticas; al reconocimiento de edificaciones.
Decreto 1450 de 2011	<i>Artículo 54:</i> Infraestructura para redes y servicios de telecomunicaciones al interior de las zonas comunes en los inmuebles que tengan un régimen de copropiedad o propiedad horizontal.
Directiva presidencial; N°11 del 27 de diciembre del 2013	Bienes inmuebles para instalación de infraestructura y redes de telecomunicación para el beneficio de la población.

Fuente: MinTIC, www.mintic.gov.co/portal/604/w3-article-5356.html

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7. MARCO TEÓRICO

7.1 TIPOS DE TORRES

Las torres de comunicación son las encargadas de soportar antenas que transmiten señales en alturas considerables. Ante esto, las empresas están encargadas de plantear la ubicación, localización y definir la altura de las mismas, con el fin proveer un adecuado servicio y funcionamiento para la sociedad.

Con base en lo anterior, el ingeniero estructural tomara la decisión más adecuada para realizar el diseño y así seleccionar el tipo de torre a implementar. Según la CRC (Comisión de Regulación de Comunicaciones)²², las torres más usadas de acuerdo a la necesidad y exigencias de carga a las que se van a someter, son: torres atirantadas, torres monopolo y torres autosoportadas .

7.1.1 Torres atirantadas

Estas son torres que disponen de cables a diferentes distancias para generar más estabilidad a la estructura. Suelen colocarse sobre estructuras o edificaciones existentes. Sin embargo, se debe tener consideraciones especiales ya que la base de la torre transmitirá un esfuerzo de compresión donde este apoyado, y los tirantes generarán o transmitirán esfuerzos a tensión, por tanto, este tipo de torre deberá contar con un sistema de columnas y vigas en la base para soportar y distribuir todos los esfuerzos que la torre atirantada le va a transmitir²³ (Figura 13).

Figura 13. Torre atirantada, Ibagué Tolima.



Fuente: Archivo propio.

²² CRC. 2012. Código de Buenas Prácticas para la infraestructura de redes de telecomunicaciones [En línea] MinTIC, (Ministerio de Telecomunicaciones de la Información y las Comunicaciones., 25 de Junio de 2012. [Citado el: 10 de enero de 2019.]. p.62.

²³ *Ibíd.*, p.62.



7.1.2 Torres monopolo

“Es una estructura conformada por dos partes, el cuerpo de la torre y la parte superior donde se instalan las antenas. El cuerpo o monopolo está compuesto por varias secciones dependiendo de la altura total de la estructura²⁴”. Se caracteriza por ser secciones con materiales tubulares e ideales para brindar estética en lugares donde se requiera (Figura 14).

Figura 14. Torre monopolo, Bogotá D.C




Fuente: Archivo propio.

7.1.3 Torres autosoportadas

Este tipo de torre es menos susceptible a sufrir por torsión, son las más apropiadas para ubicar en zonas urbanas, suburbanas o rurales. Su diseño estructural cumple con la capacidad de soportar varias antenas de gran superficie, su geometría piramidal es la más adecuada, su sección transversal puede ser cuadrada o triangular (Figura 15).

²⁴ Ibíd., p.62.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

“La torre se ancla a una cimentación que, dependiendo de las cargas y capacidad del terreno, consistirá en un conjunto de zapatas de concreto reforzado, o un grupo de pilotes pre-excavados o hincados²⁵”.

Figura 15. Torre autoportada, Bogotá D.C



Fuente: Archivo Propio

Con base en la información anterior y al recorrido realizado (Figura 4), este proyecto se centra en el diseño de torres autoportadas, ya que de manera visual se logró evidenciar una cantidad significativa de estas estructuras, implementadas en el casco urbano de las ciudades visitadas.

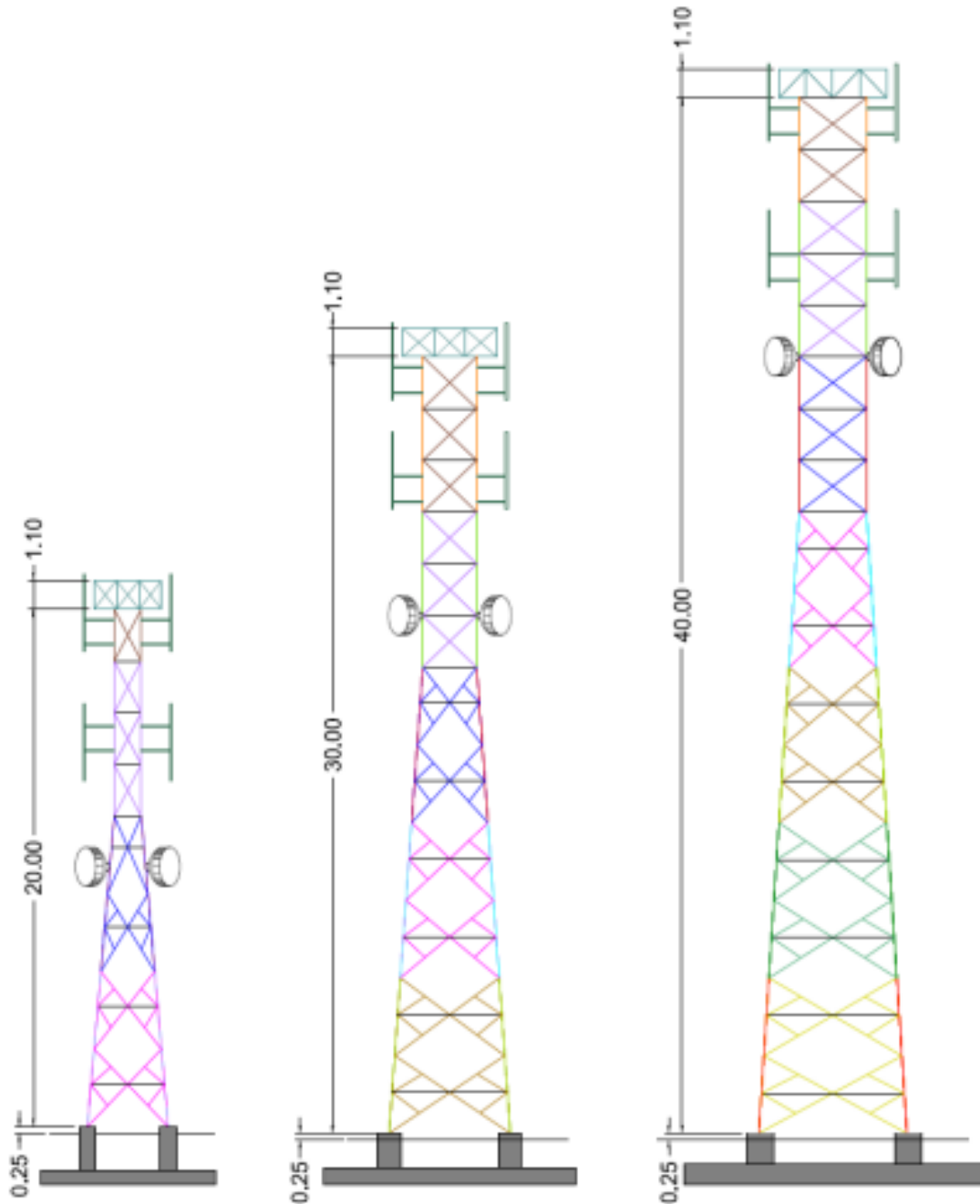
En ese sentido, la geometría de las torres se plantea de sección cuadrada, base troncopiramidal y parte superior constante (Figura 16), empleando una relación base/altura inferior a 1/10 para no considerar los efectos P- Δ , según AGUIRRE²⁶.

²⁵ *Ibíd.*, p.62.


²⁶ AGUIRRE, María. Diseño de una torre autoportada triangular de 60 metros portadora de antenas. Piura, 2017, p. 45-46



Figura 16. Torres de estudio



Fuente: Elaboración propia

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--


7.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL ACERO

A continuación, se hará referencia a las ventajas y desventajas que tiene el acero como material constructivo, los diferentes tipos de acero comerciales en Colombia y los parámetros más relevantes del mismo.

7.2.1 Ventajas

Las ventajas del acero como material de construcción son muchas, partiendo de su versatilidad constructiva, su gran resistencia, poco peso y ahorro de tiempo en el montaje, realizando una comparación con respecto a estructuras de concreto. A continuación, se nombrarán algunas de las ventajas más significativas.

- **Alta resistencia:** Hace referencia a la resistencia del acero por unidad de peso, lo que implica que el peso de la estructura será relativamente bajo y podrá estar sometido a cargas considerables. Esto es de gran importancia para la construcción de torres de telecomunicación, ya que el diseño de las mismas requiere grandes alturas y un peso bajo, lo que mejora su estabilidad, al momento de disipar energía por condiciones sísmicas o de viento.
- **Ductilidad:** La ductilidad es la propiedad que tiene un material para soportar grandes deformaciones sin fallar o perder su resistencia por estar sometido a esfuerzos de tensión altos.
- **Durabilidad:** Las estructuras de acero con un adecuado acabado de la superficie y un mantenimiento periódico garantizan una duración indefinida.
- **Uniformidad:** Las propiedades del acero no cambian perceptiblemente con el tiempo a diferencia del concreto reforzado el cual puede variar dependiendo las condiciones ambientales de fundición. Por otro lado, la precisión de armado y terminado del concreto generan desfases significativos en comparación a las estructuras de acero, cuyas dimensiones se maneja para fabricación y montaje en milímetros (mm) generando una exigencia de su armado y precisión de acabado de toda la estructura.
- **Velocidad de montaje y transporte:** Estas ventajas se deben a que en el proceso de fabricación se realiza un análisis técnico detallado del despiece de cada elemento de la torre, donde se prevé los prefabricados y longitudes máximas para transporte.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.2.2 Desventajas

Como todo material estructural, este también posee diferentes desventajas, bien sea por factores en procesos de fabricación o constructivos. A continuación, se nombrarán algunas de las desventajas más significativas.

- **Corrosión:** Todos los aceros son susceptibles a la corrosión, gracias a que se encuentran expuestos al aire y al agua generando alteraciones físico químicas en el acero dañándolo con el paso del tiempo. De aquí radica la importancia de pintar las estructuras y realizar un buen mantenimiento²⁷.
- **Fatiga:** La fatiga es un proceso de deterioro del material a causa de variación en la magnitud de los esfuerzos o repetición de los mismos, cabe resaltar que este proceso solo se cumple a tensión²⁸.
- **Exposición al fuego:** Los materiales metálicos no son combustibles al fuego, pero una exposición prolongada a este, reduce su resistencia considerablemente. He aquí la importancia de considerar pinturas aislantes que minimicen estos eventos.

7.3 CRITERIOS DE DISEÑO

7.3.1 Tipos de acero estructural

Las propiedades del acero se pueden modificar, variando las cantidades de carbono presentes y añadiendo otros elementos como silicio, níquel, magnesio y cobre. Al adicionar todos estos elementos, se tiene un gran efecto sobre el acero. El porcentaje de estas cantidades tienen que ser menores a 0.5% en peso y frecuentemente esta dentro del orden del 0.2% a 0.3%²⁹.

Los aceros estructurales normalmente tienen una clasificación propuesta por la ASTM (American Society for Testing and Materials) y cuya relación esfuerzo vs deformación se observa en la Figura 17.

²⁷ Jack C. McCormac, S. F. (2013). Diseño de estructuras en acero. Ciudad de México: Alfaomega. p. 5

²⁸ Jack C. McCormac, S. F. (2013). Diseño de estructuras en acero. Ciudad de México: Alfaomega. p. 5.

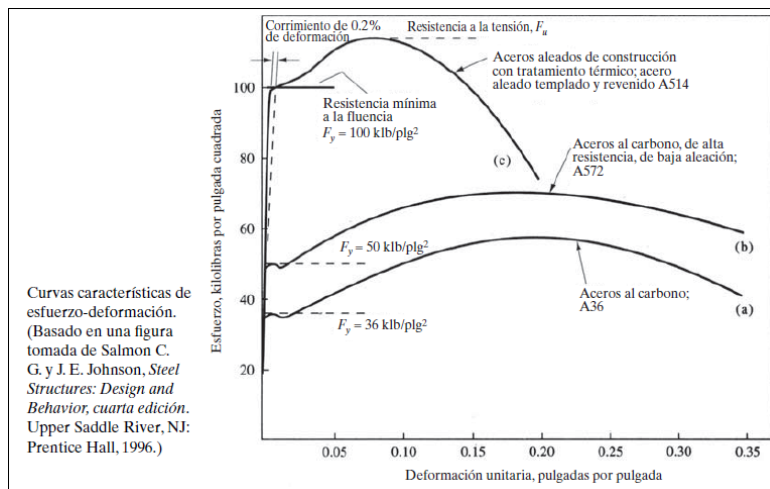
²⁹ Ibid., p.19.



- Aceros al carbono: A36, A53, A500 y A529.
- Aceros de baja relajación y alta resistencia: A572, A618, A913 y A992.
- Aceros de baja aleación y alta resistencia a la corrosión: A242, A588 y A587.

De acuerdo a la NSR-10, en el Título F, Capítulo F.2.1.5, se evidencian varios tipos de aceros como se muestra en la Tabla 3 y según el capítulo, el esfuerzo de fluencia de un material no es constante si no que varía según el espesor. A medida que el espesor de los perfiles aumente, el esfuerzo de fluencia disminuye³⁰ (Figura 17).

Figura 17. Relación esfuerzo deformación del acero.



Fuente: Diseño de Estructuras de Acero – McCormac.

Tabla 3 Aceros estructurales permitidos por la NSR-10

Tipo de acero	Designación NTC	Designación ASTM	F _y (Mpa)	Espesor en (mm)
Al carbon	NTC 1920	A-36	250	≤ 200
			220	> 200
+ manganeicio	NTC 4007	A-529	290	≤ 13
			350	≤ 38
Alta resistencia baja relajación.	NTC 1985	A-572	Gr 42	≤ 150
			Gr 50	≤ 100
			Gr 60	≤ 32
			Gr 65	≤ 32
+ Resistencia a la corrosión.	NTC 1950	A-242	290	38 - 125
			320	19 - 38
			350	< 19
	NTC 2012	A-588	290	125-200
			320	100-125
			350	≤ 100+N20
Aleacs. Templada y revenidas	NTC 4014	A-514	625	64 - 150
			695	≤ 64

Fuente: Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10 (extracto)

³⁰ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.30.



Comercialmente en Colombia se fabrican perfiles en acero de grado 50, de acuerdo con la NTC1985. De este modo, se define un tipo de acero A992, para el diseño de las torres en estudio. Acero A36 para la realización de platinas en las conexiones y un acero A500, para los perfiles tubulares redondos.


7.3.2 Secciones comerciales y ejes principales

En Colombia encontramos diferentes tipos de proveedores de acero estructural, los cuales adoptan una serie de parámetros ya establecidos por la NTC 1920 (Norma Técnica Colombiana), tanto en dimensionamiento como en procesos de fabricación del acero estructural al carbono. A continuación, se muestra en la Tabla 4 algunas designaciones de propiedades (inercia, radios de giro y módulos de sección) para algunas secciones, tal como aparecen en catálogos comerciales.

Tabla 4. Algunas secciones y ubicación de ejes.

Sección Perfil	Perfil	Ejemplo designación
	<u>Tipo I</u> IPE HEA W	HEA 150 IPE 220 W 40x278
	Canal	C 50x25 C dxb_f
	<u>Tubular</u> Cuadrado Rectangula Circular	□ 50x50x2.00 dxdxt □ 40x30x1.60 hxdxt ○ 12.7x1.25 Dxt
	<u>Ángular</u> Alas iguales	L16x16x3.2 L 5/8"x5/8"x1/8" bxbxt

Fuente: Catalogo Colmena, dibujo propio.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019 VERSIÓN 0
---	---	--

Para el desarrollo de la guía de diseño, se utiliza para las torres perfiles angulares de alas iguales, cuya sección tiene forma de L. Las caras exteriores e interiores de las alas son paralelas, por lo que las alas tienen el mismo espesor.

7.3.3 Clasificación de las estructuras

A continuación, se muestra en la Tabla 5, la descripción de las estructuras con su respectiva clasificación. En la Tabla 6 se presenta el valor de los factores de importancia según norma ANSI/TIA 222G.

Tabla 5. Clasificación de la estructura

Descripción de la estructura	Clase
Estructuras que debido a la altura, el uso o la ubicación representan un bajo riesgo para la vida humana y daños a la propiedad en caso de falla y / o se utilizan para servicios que son opcionales y / o donde sería aceptable un retraso en la devolución de los servicios.	I
Estructuras que debido a la altura, uso o ubicación representan un peligro importante para la vida humana y / o daños a la propiedad en caso de falla y / o utilizado para servicios que pueden ser provistos por otros medios.	II
Estructuras que debido a la altura, uso o ubicación representan un alto riesgo para la vida humana y / o daños a la propiedad en caso de falla y / o utilizado principalmente para comunicaciones esenciales.	III

Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto). p.39.

Tabla 6. Factores de importancia

Clasificación Estructura	Carga de viento		Espesor de Hielo	Sismo
	Sin Hielo	Con Hielo		
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
Cargas de hielo y sismo no aplican para Clasificación Estructural I				

Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto). p.39.

Las torres de telecomunicaciones son estructuras designadas como instalaciones esenciales, ya que, estas son las encargadas de mantener la red de comunicación en los casos donde se presenten catástrofes de gran magnitud. En ese sentido, estas estructuras deben mantenerse en pie ante cualquier eventualidad, por lo que se clasifican como estructuras de clase III, asociado a un factor de importancia de para las cargas de viento de 1.15. En aplicación al medio colombiano, este valor es equivalente al de norma NSR-10, el cual se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Factor de importancia (cargas de viento) NSR-10.

Categoría	Regiones no propensas a huracanes, y regiones con posibilidad de huracanes de $V = 40 - 45$ m/s	Regiones con posibilidades de huracanes y $V > 45$ m/s
I	0.87	0.77
II	1.00	1.00
III	1.15	1.15
IV	1.15	1.15

Fuente: NSR-10 (extracto) Título B. p.B-79.


7.4 CARGAS

Para definir las cargas a las que se ve sometida una torre de telecomunicación, se debe seguir criterios fundamentales, los cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

7.4.1 Carga muerta

Se incluye el peso propio de las torres, es decir, los elementos primarios que conforman el ensamble de la estructura como: diagonales, horizontales, placas de unión, montantes y tornillería. Adicional a esto, se incluyen elementos no estructurales, como:

- **Escalera de acceso:** Es un elemento fijo a lo largo de toda la torre y permite el acceso a cualquier altura, esta puede ir situada fuera o dentro de la estructura.
- **Escalerilla de cables:** Es un elemento fijo a lo largo de toda la torre que permite llevar los cables de alimentación que interconectan los equipos de la planta con la parte superior.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

- **Sistemas de seguridad:** Se hace referencia a las líneas de vida, puntos de anclaje, barandas, etc. Estos elementos son indispensables y obligatorios para trabajos en alturas según estipulado en la ley colombiana (Tabla 2).
- **Plataforma de trabajo:** Estas deben estar situadas en la parte superior de la torre y se dispone para el mantenimiento y como área de trabajo. Por lo general su diseño abarca los 360° del contorno de la torre.
- **Antenas:** Se tienen en cuenta antenas tipo RF (radio frecuencia) y tipo MW (microondas parabólicas), realizando un promedio con base del recorrido visual realizado en la Figura 2 y utilizando los catálogos de proveedor de antenas reconocidos, como la marca KATHREIN.

7.4.2 Carga viva

Se incluye la carga generada por el peso de las personas que realizan las actividades de montaje y mantenimiento de las torres, es decir, esta carga es considerada como carga viva sobre cubierta. Para ello, se tendrán en cuenta las recomendaciones del código ASCE (American Society of Civil Engineers) tabla 4.3-1, correspondiente a la categoría de pasarelas para el acceso de mantenimiento, con un valor de 1.92 kN/m².

7.4.3 Carga de granizo


Para la aplicación de esta guía de diseño estructural en Colombia, se deben tener en cuenta todos los factores posibles, asociados a la localización de las torres en el país. En ese sentido, se incluye la carga por granizo, debido al empozamiento que se pueda presentar en las plataformas de trabajo de las estructuras.

“Las cargas de granizo, G, deben tenerse en cuenta en las regiones del país con más de 2000 m.s.n.m. o en lugares de menor altura donde autoridades municipales o distrital así lo exija. En lugares donde la carga de granizo deba tenerse en cuenta, su valor es de 1.0 kN/m² (100kgf/m²)³¹”.

7.4.4 Carga de viento

Con base en la sección 2.5, las cargas producidas por el viento constituyen un factor importante a la hora de evaluar un diseño para torres de telecomunicación. La velocidad de viento básica se toma de la Fig. 2, aplicando el procedimiento analítico de la norma ANSI/TIA-222-G.

³¹ NSR-10, Título B, B.4.8.3. p. B-18.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

La interacción que se propone entre las normativas, es aplicable, debido a que las dos se basan en una velocidad del viento de una ráfaga de 3 segundos medida 10 m por encima del suelo.

NSR-10 (p.B-25):

“V = velocidad básica de viento de la fig. B.6.4-1 en m/s. 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 en un terreno de categoría de exposición C”.

ANSI/TIA-222-G 2005 (p.9):

“Basic wind speed, V: 3-second gust wind speed at 33 ft [10 m] above the ground in exposure category C as defined in 2.6.5.1 for a 50-year mean recurrence Interval”.

Para el desarrollo de este procedimiento, la hipótesis principal es suponer que el viento proviene de cualquier dirección. La aplicación al medio colombiano se realiza mediante el análisis de todas las variables propuestas por la NSR-10 Título B, de la sección B.6.5.6, interpretando la categoría de la rugosidad de terreno y la categoría de exposición.

7.4.4.1 Categorías de Rugosidad de Terreno³²

Rugosidad de Terreno B — Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones del tamaño, iguales o mayores al de una vivienda unifamiliar y con poca separación entre ellas.

Rugosidad de Terreno C — Terreno abierto con pocas obstrucciones y con alturas inferiores a 9.0 m. Esta categoría incluye campos planos abiertos y praderas.


Rugosidad de Terreno D — Áreas planas y no obstruidas y superficies acuáticas en regiones propensas a huracanes. Esta categoría incluye pantanos, salinas y superficies de hielo.

7.4.4.2 Categorías de Exposición³³

Exposición B — La categoría de exposición B aplica cuando la rugosidad del terreno, como se define en Rugosidad de Terreno B, prevalece por una distancia de al menos 800m o 20 veces la altura del edificio, la que sea mayor, en la dirección al viento.

³² NSR-10, Título B.6.5.6.2. p. B-28

³³ NSR-10, Título B.6.5.6.2. p. B-29

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019 VERSIÓN 0
---	---	---

EXCEPCIÓN — Para edificios cuya altura media sea menor o igual a 9.0 m, la distancia viento arriba puede reducirse a 600 m.

Exposición C — La categoría de exposición C aplicará para todos los casos donde no apliquen las categorías B y D.

Exposición D — La categoría de exposición D aplica cuando la rugosidad del terreno, como se define en Rugosidad de Terreno D, prevalece por una distancia mayor a 1500 m o 20 veces la altura del edificio, la que sea mayor, en la dirección de barlovento. La categoría de exposición D se extenderá hacia las áreas viento abajo de las Rugosidades de Terreno B o C por una distancia de 200 m o 20 veces la altura de la edificación, la que sea mayor.”

Para el análisis de las torres de este estudio, se adopta la categoría de exposición B, correspondientes a torres ubicadas en el casco urbano de las ciudades (Figura 4). Con base en lo anterior, se utiliza los coeficientes de la Tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes de la categoría de exposición

Categoría Exposición	Z_E	α	K_{zmin}	K_e
B	366 m [1200 ft]	7,0	0,70	0,90
C	274 m [900 ft]	9,5	0,85	1,00
D	213 m [700 ft]	11,5	1,03	1,10

Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto p.40)

7.4.4.3 Factor de direccionalidad

Este factor se define, de acuerdo al tipo de torre a diseñar. En este caso, torres autosoportadas de sección cuadrada, correspondiente a un valor de 0.85. La equivalencia de valores para el factor de direccionalidad entre la norma TIA-222-G y NSR-10, se observa en la Tabla 9 y 10 respectivamente.

Tabla 9. Factor de direccionalidad TIA-222-G

FACTOR DE PROBABILIDAD DIRECCIÓN DEL VIENTO	
Tipo de estructura	Factor de probabilidad dirección del viento, k_d
Estructuras en celosía con secciones transversales triangulares, cuadradas o rectangulares. Pueden tubulares.	0.85
Estructuras de postes tubulares, estructuras de celosías con otras secciones transversales, accesorios.	0.95

Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto). p.39.

Tabla 10. Factores de direccionalidad NSR-10

Tipo de Estructura	Factor de Direccionalidad del Viento, K_d *
Cubiertas Abovedadas	0.85
Avisos Sólidos	0.85
Avisos Abiertos y Estructura Rectangular	0.85
Torres en Celosía	
Triangular, Cuadrada y Rectangular	0.85
Todas las otras secciones transversales	0.95

Fuente: NSR-10, Título B, tabla B.6.5-4 (extracto p.B-82)

7.4.4.4 Categoría topográfica³⁴

Categoría 1: No hay cambios bruscos en la topografía general, por ejemplo, terreno plano u ondulado, sin viento se requerirá una consideración de aceleración.


Categoría 2: Estructuras situadas en o cerca de la cresta de una escarpa. La aceleración del viento se considerará que ocurre en todas las direcciones. Para estructuras situadas verticalmente en la parte mitad inferior de una escarpa u horizontalmente más allá de 8 veces la altura de la escarpa de su cresta, se permitirá ser considerado como Categoría Topográfica 1.

Categoría 3: Estructuras situadas en la mitad superior de una colina. La aceleración del viento se considera que ocurre en todas las direcciones. Estructuras situadas verticalmente en la mitad inferior de una colina, se permitirá que se considere como Categoría Topográfica 1.

Categoría 4: Estructuras situadas en la mitad superior de una cresta. La aceleración del viento se considera que ocurre en todas las direcciones. Estructuras situadas verticalmente en la mitad inferior de una cresta se permitirá ser considerada como Categoría Topográfica 1.

Con base en lo anterior, las torres estudiadas se ajustan a la categoría topográfica 1, por tratarse de torres situadas en el interior de las ciudades, y no en las montañas o cerros.

³⁴ Referencia Norma TIA-222-G (2.6.6.2). p.13

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.4.4.5 Coeficientes de la categoría topográfica

Tabla 11. Categoría topográfica

<i>Categoría Topográfica</i>	K_t	f
2	0,43	1,25
3	0,53	2,00
4	0,72	1,50

Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto). p.40.

7.4.4.6 Coeficiente de presión de la velocidad³⁵

Con base en la categoría de exposición del numeral 7.4.4.2, el coeficiente de presión se determina con la siguiente formula:

$$K_z = 2.01(Z/Z_g)^{2/\alpha} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

K_z : coeficiente de exposición de presión por velocidad evaluado a la altura z .

Z : altura sobre el nivel del terreno.

Z_g : coeficiente de categoría de exposición. Tabla 8.

α : exponente de la velocidad para rafaga de 3 segundos. Tabla 8.

7.4.4.7 Factor reducción de altura³⁶

$$K_h = e^{\left(\frac{fZ}{h}\right)} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$K_{zt} = \left(1 + \frac{K_e K_t}{K_h}\right)^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

Dónde:

e = logaritmo natural , base = 2.718

K_e = constante del terreno dado en la Tabla 8.


K_t = constante topográfica dada en Tabla 11.

f = factor de altura dado en Tabla 11.

z = Altura media de la estructura.

³⁵ Referencia Norma TIA-222-G (2.6.5.2). p.13

³⁶ Referencia Norma TIA-222-G (2.6.6.4). p.14

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

$h =$ Altura de la estructura.

$K_{zt} = 1.0$ para categoría topográfica I.

7.4.4.8 Presión de viento³⁷

La presión ejercida por el viento, se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.613 K_z K_{zt} K_d V^2 I \quad [N/m^2] \quad \text{Ecuación 4}$$

Dónde:

K_z : coeficiente de exposición de presión por velocidad, Ecuación 1.

$K_{zt} =$ Ecuación 3.

$K_d =$ Factor de direccionalidad, 7.4.4.3

$V =$ velocidad del viento m/s, Figura 2.

$I =$ Factor de importancia, Tabla 6.

7.4.4.9 Factor de efecto ráfaga³⁸

Para estructuras en celosía autosoportadas, el factor de efecto ráfaga debe tomarse como 1,00 para estructuras con alturas de 600 ft [183 m] o más. Para estructuras de 450 ft [137 m] o menos el factor será de 0,85. El factor se interpola para alturas entre 600 ft [183 m] y 450 ft [137 m].

Estas condiciones se expresan en las siguientes ecuaciones:

$$G_h = 0,85 + 0,15 * \left[\frac{h}{150} - 3,0 \right] \quad h, \text{ en pies.} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$G_h = 0,85 + 0,15 * \left[\frac{h}{45,7} - 3,0 \right] \quad h, \text{ en metros.} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$0,85 \leq G_h \leq 1,00$$

Dónde:

$h =$ altura de la estructura

³⁷ Referencia Norma TIA-222-G sección 2.6.9.6. p.25

³⁸ Referencia Norma TIA-222-G sección 2.6.7 p.15

7.4.4.10 Factor de dirección del viento³⁹

El diseño por resistencia deberá basarse en la resultante de la dirección del viento en la máxima respuesta. En caso de estructuras en celosía se deberá considerar por cada cara de la estructura como se indica en la Tabla 12.

Tabla 12. Factores de dirección del viento.

Sección 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	1,00	1,00

Direcciones de viento medida desde una línea normal a la cara de la estructura

D_f = Factor de dirección del viento para componentes estructurales planos.

D_r = Factor de dirección del viento para componentes estructurales circulares.

Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto). p.40.

7.4.4.11 Fuerza de viento de diseño⁴⁰

La fuerza de viento de diseño, incluye la suma de la fuerza de viento horizontal aplicado a la estructura en la dirección correspondiente, más las fuerzas de viento sobre accesorios propios de la estructura (Tabla 13). La fuerza de viento para estructuras tipo celosía se determina con la siguiente fórmula:

$$F_w = F_{st} + F_A$$

Ecuación 7

Dónde:


F_{st} = Fuerza de viento de diseño sobre la estructura

F_A = Fuerza de viento sobre accesorios

Nota: Las fuerzas de viento de diseño $F_{st} + F_A$, es necesario que no exceda la fuerza de viento calculada usando una relación de solidez de 1,0 (cara solida) más la cara de viento sobre accesorios instalados que se encuentran fuera del área normal de la estructura y en dirección del viento.

³⁹ Referencia Norma TIA-222-G (2.6.5.2). p.15

⁴⁰ Referencia Norma TIA-222-G (2.6.9.1). p.17

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.4.4.12 Fuerza de viento sobre la estructura F_{st} ⁴¹

La fuerza de viento se aplica a cada tramo de la torre con la siguiente formula:

$$F_{st} = q_z * G_h * (EPA)_s \quad \text{Ecuación 8}$$

Dónde:

q_z = presión de viento, Ecuación 4.

G_h = factor efecto rafaga, 7.4.4.9

$(EPA)_s$ = área efectiva proyectada, se calcula como se muestra a continuación:

$$(EPA)_s = C_f [D_f \sum A_f + D_r + \sum (D_r R_r)] \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

$$C_f = 3,4\varepsilon^2 - 4,7\varepsilon + 3,4 \quad (\text{Sección triangular}). \quad \text{Ecuación 10}$$

$$C_f = 4,0\varepsilon^2 - 5,9\varepsilon + 4,0 \quad (\text{Sección cuadrada}). \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\varepsilon = \text{Relación de solidez} \rightarrow \frac{(A_f + A_r)}{A_g} \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

A_f = área proyectada de los componentes en una cara de la sección.

A_r = área proyectada de los componentes estructurales circulares en una cara de la sección.

A_g = área bruta de una cara de la torre (se determina como si la cara fuera maciza o sólida).

D_f = Factor de dirección del viento para componentes estructurales planos, Tabla 12.

D_r = Factor de dirección del viento para componentes estructurales circulares, Tabla 12.

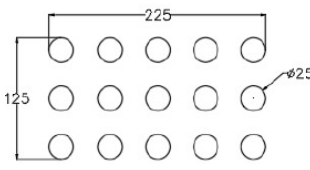
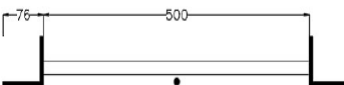

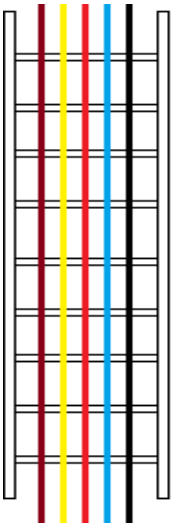
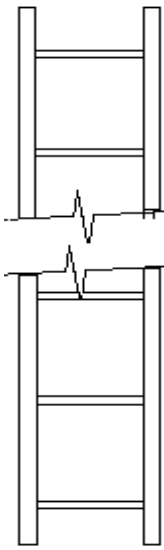

⁴¹ Referencia Norma TIA-222-G (2.6.9.1). p.17



7.4.4.13 Fuerza de viento sobre accesorios F_A^{42}


La fuerza horizontal de viento de diseño para accesorios y conexiones deberá considerarse con un factor de ráfaga cuyo valor es 1,00 y un factor de direccionalidad de $K_d=0,85$. No se debe considerar ningún escudo o efecto sombra entre elementos evaluados. Los accesorios a considerar son: cables de alimentación, escalera de acceso, antenas RF y antenas MW (Tabla 13).

Tabla 13. Accesorios

CABLES DE ALIMENTACIÓN	ESCALERA DE ACCESO	ANTENAS
 <p><u>VISTA EN PLANTA</u></p> <p>Cantidad y dimensiones de cables.</p>	 <p><u>VISTA EN PLANTA</u></p>	 <p>Antena MW</p>
 <p><u>VISTA FRONTRAL</u></p>	 <p><u>VISTA FRONTRAL</u></p>	 <p>Antena RF</p>

Fuente: Elaboración propia.

⁴² Referencia Norma TIA-222-G (2.6.9.2). p.20.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

La fuerza de viento sobre accesorio F_A , se determina para las antenas RF, escalera de acceso y cables de alimentación, mediante la siguiente ecuación:

$$F_A = q_z * Gh * (EPA)_A \quad \text{Ecuación 13}$$

Dónde:

q_z = presión de velocidad a la línea central, a la altura del accesorio Ecuación 4.

Gh = factor de efecto ráfaga, 7.4.4..

$(EPA)_A$ = área efectiva proyectada del accesorio.

El área efectiva proyectada $(EPA)_A$, se determina con la siguiente ecuación:

$$(EPA)_A = K_a [(EPA)_N \cos^2 \theta + (EPA)_T \sin^2 \theta] \quad \text{Ecuación 14}$$

Dónde:

$K_a = 1.0$ (El valor de K_a , puede usarse para cualquier accesorio y este valor es constante para todas las direcciones).

θ = ángulo relativo entre el acimut asociado con la cara del accesorio y la dirección del viento.

$(EPA)_N$ = área proyectada efectiva asociada con la cara a barlovento normal al acimut del accesorio.

$(EPA)_T$ = área proyectada efectiva asociada con la cara lateral de barlovento del accesorio.

Nota: el mayor valor de entre $(EPA)_N$ y $(EPA)_T$ puede usarse de manera conservadora para $(EPA)_A$ para todas las direcciones de viento.

En ausencia de datos más precisos, se considera que un accesorio consiste de componentes planos y redondos según lo siguiente:

$$(EPA)_N = \sum (C_a A_A)_N \quad \text{Ecuación 15}$$

$$(EPA)_T = \sum (C_a A_A)_T \quad \text{Ecuación 16}$$

Dónde:

C_a = coeficiente de fuerza según Tabla 14.

A_A = área proyectada del accesorio.



Tabla 14. Coeficiente de fuerza para accesorios.⁴³

Tipo de miembro		Relación de aspecto ≤ 2.5	Relación de aspecto = 7	Relación de aspecto ≥ 25
		C _a	C _a	C _a
Plana		1.2	1.4	2.0
Redondo	C < 32 [4.4] (Subcrítico)	0.70	0.8	1.2
	32 ≤ C ≤ 64 [4.4] ≤ 8.7 (transicional)	$\frac{3.76}{C^{0.485}} \left[\frac{1.43}{C^{0.485}} \right]$	$\frac{3.37}{C^{0.415}} \left[\frac{1.47}{C^{0.485}} \right]$	$\frac{38.4}{C^{1.0}} \left[\frac{5.23}{C^{1.0}} \right]$
	C < 64 [8.7] (Supercrítico)	0.50	0.60	0.60

Dónde:

$C = (I * K_{zt} * K_z)0.5 (V)(D)$ para D en pies [m], en mph [m/s]

V = Velocidad básica de viento para la condición de carga bajo investigación.

Nota: la relación de aspecto es igual a la relación (Longitud total / ancho) en un plano normal a la dirección del viento (la relación de aspecto no es en función de la separación entre dos puntos de apoyo de los accesorios lineales, ni tampoco se considera que la longitud de la sección tiene una fuerza uniformemente distribuida).

Fuente: ANSI/TIA-222-G, Tabla 2-8, p.42.

7.4.4.14 Fuerza de viento sobre antenas MW⁴⁴

Las fórmulas para determinar la fuerza de viento, en antenas microondas típicas con cubierta redonda, se presentan a continuación.

$$F_{AM} = q_z * Gh * C_A * A \quad \text{Ecuación 17}$$


$$F_{SM} = q_z * Gh * C_s * A \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde:

$q_z = \text{presion de viento, Ecuacion 4.}$

⁴³ Referencia Norma TIA-222-G, p.42

⁴⁴ Referencia Norma TIA-222-G, p.197

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

G_h = factor efecto ráfaga, 7.4.4.9

C_A, C_S = coeficientes de fuerza de viento para antena, Tabla 15.

A = área de apertura externa de la antena.

Tabla 15. Coeficiente de fuerza de viento para antena microondas típica con cubierta cilíndrica.

WIND ANGLE θ (DEG)	C_A	C_S	C_M
0	0.5352	0.0000	0.0000
10	0.5234	0.1016	0.0168
20	0.5078	0.1797	0.0289
30	0.4609	0.2305	0.0383
40	0.4063	0.2617	0.0449
50	0.3438	0.2734	0.0496
60	0.2344	0.2813	0.0527
70	0.1289	0.2734	0.0555
80	0.0391	0.2500	0.0492
90	-0.0508	0.2422	0.0434
100	-0.1172	0.2734	0.0469
110	-0.1875	0.2852	0.0504
120	-0.2656	0.2773	0.0512
130	-0.3359	0.2617	0.0496
140	-0.4063	0.2344	0.0445
150	-0.4766	0.2031	0.0371
160	-0.5469	0.1563	0.0273
170	-0.5859	0.0859	0.0148
180	-0.5938	0.0000	0.0000
190	-0.5859	-0.0859	-0.0148
200	-0.5469	-0.1563	-0.0273
210	-0.4766	-0.2031	-0.0371
220	-0.4063	-0.2344	-0.0445
230	-0.3359	-0.2617	-0.0496
240	-0.2656	-0.2773	-0.0512
250	-0.1875	-0.2852	-0.0504
260	-0.1172	-0.2734	-0.0469
270	-0.0508	-0.2422	-0.0434
280	0.0391	-0.2500	-0.0492
290	0.1289	-0.2734	-0.0555
300	0.2344	-0.2813	-0.0527
310	0.3438	-0.2734	-0.0496
320	0.4063	-0.2617	-0.0449
330	0.4609	-0.2305	-0.0383
340	0.5078	-0.1797	-0.0289
350	0.5234	-0.1016	-0.0168

Fuente: Referencia Norma TIA-222-G, (extracto) Tabla C-3. p.201.



7.4.5 Carga de sismo

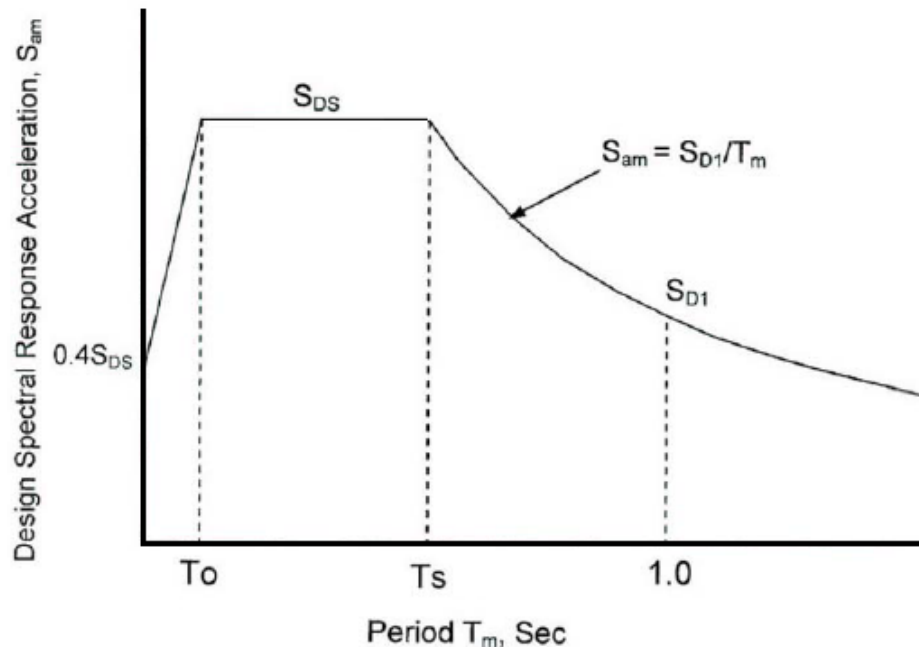
Con base en la sección 2.4, resulta importante considerar las cargas sísmicas para el diseño de torres de telecomunicaciones en zona de amenaza sísmica intermedia (Figura 3). En ese sentido, este proyecto realiza el análisis mediante el método 3 de la norma ANSI/TIA-222-G, correspondiente al análisis modal, aplicable a torres superiores a 20 metros.

7.4.5.1 Procedimiento de análisis modal (método 3)⁴⁵

Se construye un modelo matemático para determinar la masa y rigidez de las torres, esto con el fin de determinar los modos naturales de vibración de la estructura. El análisis debe incluir un número suficiente de modos, para obtener una masa modal combinada participativa de al menos el 85% en cada dirección de análisis (x, y).


En ese sentido, se mide la reacción de las torres en comparación con las vibraciones del suelo, a través de un espectro de respuesta mostrado en la Figura 18.

Figura 18. Espectro de diseño.



Fuente: ANSI/TIA-222-G (extracto). p.58

⁴⁵ Referencia Norma TIA-222-G (2.7.9). p.32

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

S_{am} : aceleración de la respuesta espectral de diseño para el periodo T_m .

T_0 : periodo de vibración correspondiente al inicio de aceleración del espectro, en s.

T_m : periodo de vibración correspondiente al modo de vibración m , en s.

T_s : periodo utilizado para definir el diseño de respuesta espectral.

S_{Ds} : diseño de aceleración espectral en periodos cortos.

S_{D1} : diseño de aceleración de respuesta en periodo de 1.0 segundo.

La aceleración de respuesta espectral de periodos cortos S_{Ds} , S_{D1} y los periodos de vibración T_0 , T_m , se determinan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$S_{Ds} = \frac{2}{3} \cdot F_a \cdot S_s \quad \text{Ecuación 19}$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} \cdot F_v \cdot S_1 \quad \text{Ecuación 20}$$

$$T_0 = 0.2 \cdot \frac{S_{D1}}{S_{Ds}} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$T_s = S_{D1}/S_{Ds} \quad \text{Ecuación 21}$$

Dónde:

F_a : coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos cortos, debido a los efectos del sitio.


F_v : coeficiente de amplificación que afecta la aceleración en la zona de periodos intermedios, debido a los efectos del sitio.

Los valores de S_s y S_1 se basan en procedimientos de análisis de respuesta dinámica específicos del sitio. Para la identificación de estos valores en la norma NSR-10, $S_1 = A_a$, $S_s = A_v$, especificados de acuerdo a la amenaza sísmica correspondiente a la Tabla 16.

Tabla 16. Factores de sitio A_a y A_v

Mayor valor entre A_a y A_v	Asociado en mapas de las figuras A.2.3-2 y A.2.3-3 a Región N°	Amenaza Sísmica
0.50	10	Alta
0.45	9	Alta
0.40	8	Alta
0.35	7	Alta
0.30	6	Alta
0.25	5	Alta
0.20	4	Intermedia
0.15	3	Intermedia
0.10	2	Baja
0.05	1	Baja

Fuente: Norma NSR-10 (extracto). p. A-15.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

La determinación de los valores F_a y F_v , se realiza con base en el perfil de suelo. Para efectos de cálculos en esta guía, se adopta un perfil de suelo tipo D (Tabla 21). La equivalencia de valores para los coeficientes en periodos cortos e intermedios, entre la norma TIA-222-G y NSR-10, se observan en las Tablas 17,19 y 18,20 respectivamente.

Tabla 17. Coeficiente de periodos cortos, F_a TIA-222-G

Site Class	Maximum Considered Earthquake Spectral Response Acceleration at One Second, (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	Note 1	Note 1	Note 1	Note 1	Note 1

Linear interpolation is allowed between values shown.

Note 1: Site-specific procedures required in accordance with 2.7.5.1.

Fuente: Norma ANSI/TIA-222-G (extracto). p.46

Tabla 18. Coeficiente de periodos cortos, F_a NSR-10

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
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	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.

Fuente: Norma NSR-10 (extracto). p. A-23.

Tabla 19. Coeficiente de periodos intermedios, F_v

Site Class	Maximum Considered Earthquake Spectral Response Acceleration at Short Periods, (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	Note 1	Note 1	Note 1	Note 1	Note 1

Linear interpolation is allowed between values shown.

Fuente: Norma ANSI/TIA-222-G (extracto). p.46


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Tabla 20. Coeficiente de periodos intermedios, F_v NSR-10

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	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	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota: Para el perfil tipo **F** debe realizarse una investigación geotécnica particular para el lugar específico y debe llevarse a cabo un análisis de amplificación de onda de acuerdo con A.2.10.


Fuente: Norma NSR-10 (extracto). p. A-24

Tabla 21. Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	$IP > 20$ $w \geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.50 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Fuente: Título A, NSR-10 (extracto).

El corte en la base de las estructuras, se determina por medio de las siguientes ecuaciones:

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

$$T_m = 1/f_m \quad \text{Ecuación 23}$$

f_m : frecuencia de estructura para el modo considerado, Hertz.

Para: $T_m < 4.0s$

$$S_{am} = S_{Ds}(0.4 + 0.6 \cdot T_m/T_o) \quad \text{Cuando } T_m < T_o \quad \text{Ecuación 24}$$

$$S_{am} = S_{Ds} \quad \text{Cuando } T_o < T_m < T_s \quad \text{Ecuación 25}$$

$$S_{am} = S_{Ds}/T_m \quad \text{Cuando } T_m \geq T_s \quad \text{Ecuación 26}$$

Para: $T_m \geq 4.0s$

$$S_{am} = 4 \cdot S_{Ds}/T_m^2 \quad \text{Ecuación 27}$$

$$V_m = \frac{S_{am} \cdot W_m \cdot l}{R} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$W_m = \frac{(\sum_{i=1}^n W_i \phi_{im})^2}{\sum_{i=1}^n W_i^2 \phi_{im}^2} \quad \text{Ecuación 29}$$

Dónde:

S_{am} : aceleración de la respuesta espectral de diseño para el periodo T_m .

W_m : caga grabitatoria modal efectiva.

l : factor de importacia, segun tabla 6.

R : coeficiente de modificación de la respuesta igual a 3.0 para estructuras auto soportadas de celocia, 2.5 para mastiles atirantados de celocia y 1.5 para monopolos.

n : nivel superior de la estructura con respecto a la distribución de las cargas.


m : sub indice que denota cntidades en el modo m .

W_i : Porción de carga gravitatoria total W asignada al nivel i .

ϕ_{im} : amplitud de desplazamiento de modo i de la estructura cuando esta vibra en su modo m .

La capacidad de disipación de energía, “Es la capacidad que tiene un sistema estructural, un elemento estructural, o una sección de un elemento estructural, de trabajar dentro del rango inelástico de respuesta sin perder su resistencia⁴⁶”. En ese sentido, el coeficiente de disipación de energía R , se determina de acuerdo a

⁴⁶ NSR-10, Titulo A. Pg. A-126.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

la equivalencia entre las normas TIA-222-G en la sección 2.7.9.2 y la NSR-10, correspondiente a la Tabla 22.

ANSI/TIA-222-G 2005 (p.34):

“El coeficiente de capacidad de disipación de energía (R) es igual a 3.0 para estructuras autoportadas en celosía, 2.5 para mástiles y 1.5 para estructuras tubulares⁴⁷”.

Tabla 22. Coeficiente de disipación de energía

Tipo de estructura	Valor de R_0
Tanques, contenedores de líquidos y gases a presión, apoyados sobre columnas arriostradas, con diagonales, o no	2.0
Silos y chimeneas de concreto reforzado vaciado en sitio, cuyas paredes son continuas hasta la fundación	3.5
Estructuras en forma de torre cuya masa está distribuida en la altura, tales como chimeneas, silos y tanques, cuyos apoyos consisten en faldones.	3.0
Torres en celosía, autoportantes o con templetes, chimeneas y torres con templetes.	3.0
Estructuras de tipo péndulo invertido	2.0
Tolvas sobre columnas, con o sin contravientos.	3.0
Torres de enfriamiento	3.5
Torres o anaqueles de almacenamiento	3.0
Avisos y vallas publicitarias	3.5
Monumentos y estructuras de parques de diversión	2.0
Otras estructuras autoportantes, no incluidas anteriormente	3.0

Fuente: Título A-1.3.5, NSR-10 (extracto).

7.5 COMBINACIONES DE CARGA

El diseño estructural para las torres, se realiza de acuerdo con la metodología LFRD, es decir, diseño en base a factores de carga y resistencia. La resistencia de diseño de cada miembro estructural es mayor o igual a la resistencia requerida determinada de acuerdo con las combinaciones de carga LRFD. En aplicación al medio colombiano, a continuación, se presentan combinaciones de carga establecidas por la norma la NSR-10 Título B, Capítulo B.2.4.2:

Nomenclatura:

D : carga muerta de estructura y accesorios.

L_r : carga viva sobre cubierta.


G : carga debido a granizo

E_x : carga sísmica en eje x .

E_y : carga sísmica en eje y .

W : cargas de viento ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ \dots 270^\circ$ y 315°)

⁴⁷ Referencia Norma TIA-222-G (2.7.9.2). p.34.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.5.1 Combinaciones mayoradas

$$1.4 D$$

$$1.2 D + 0.5 L_r$$

$$1.2 D + 1.0 W + 0.5 L_r$$

$$1.2 D + 1.0 W + 0.5 G$$

$$1.2 D + 1.6 L_r + 0.5 W$$

$$1.2 D + 1.6 E_x + 0.3 E_y$$

$$1.2 D + 1.6 E_y + 0.3 E_x$$

$$0.9 D + 1.0 W$$

$$0.9 D + 1.0 E_x + 0.3 E_y$$

$$0.9 D + 1.0 E_y + 0.3 E_x$$

7.5.2 Combinaciones de servicio

$$D + W$$

$$D + 0.7 E_x$$

$$D + 0.7 E_y$$

$$D + 0.75 W + 0.75 L_r$$

$$D + 0.75 W + 0.75 G$$

$$D + 0.75 (0.7 E_x) + 0.75 L_r$$

$$D + 0.75 (0.7 E_y) + 0.75 L_r$$

7.6 DISEÑO DE MIEMBROS A TENSIÓN

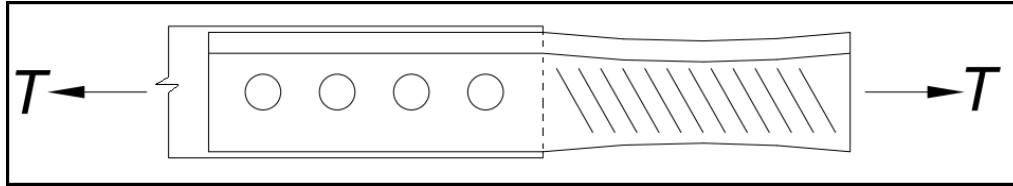
Todos los elementos estructurales de una torre de telecomunicación se ven sometidos a grandes esfuerzos que actúan sobre cada elemento que la componen, teniendo en cuenta esto, la tensión siempre es de la misma magnitud y de sentido contrario a la carga aplicada, actuando siempre a lo largo del eje centroidal.

Según McCormac⁴⁸, al tener miembros de acero perforados para el paso de tonillos, esta puede fallar por fractura en la sección neta que pasan por los agujeros, ya que está reduciendo el área bruta del miembro (Figura 19).

⁴⁸ Jack C. McCormac, S. F. (2013). Diseño de estructuras en acero. Ciudad de México: Alfaomega. p. 66



Figura 19. Elemento sometido a tensión.



Fuente: GERDAU CORSA.

Se deben considerar una serie de ecuaciones al momento de diseñar a tensión:

$$A_n = A_g - \sum d' * t \quad \text{Ecuación 30}$$

Dónde:

A_g : área total de la sección transversal .

A_n : área bruta menos el area de las perforaciones.

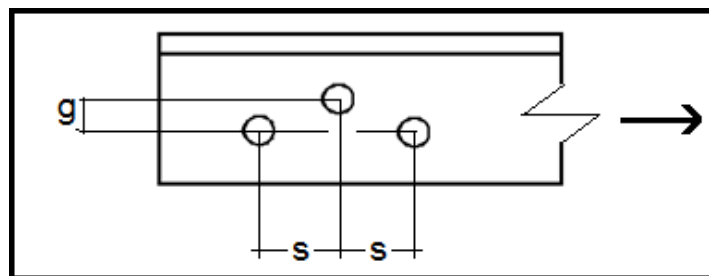
\sum : sumatoria que indica que pueden haber varias perforaciones.

d' : diametro de perforacion sumando un 1/16" de pulgada, para permitir una tolerancia al paso del perno.

t : espesordel elemento donde se encuentran los huecos.


Si las perforaciones no se encuentran sobre un mismo eje (Figura 20), se debe considerar la siguiente ecuación:

Figura 20. Perforaciones discontinuas.



Fuente: Propia.

$$A_n = A_g - \sum(d' * t) + \sum\left(\frac{s^2}{4g}\right) * t \quad \text{Ecuación 31}$$

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Dónde:

s: paso, distancia entre huecos medida en dirección de la carga.

g: gramil, distancia entre huecos medida en dirección perpendicular a la dirección de la carga.

También es necesario analizar el área efectiva neta por efectos de rezago.

$$A_e = A_n * U \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

A_n: área bruta menos el área de las perforaciones.

A_e: área efectiva.

U: factor de rezago que se calcula como se muestra en Tabla 23.

Para evaluar la resistencia a la fluencia y la rotura, se utilizan las siguientes ecuaciones de acuerdo a NSR-10.

- “Para fluencia por tensión sobre el área bruta”⁴⁹:

$$P_n = \phi * F_y * A_g \quad \text{Ecuación 33}$$

$\phi = 0,9$. Factor de reducción.

- “Para rotura por tensión sobre el área neta”⁵⁰:

$$P_u = \phi * F_u * A_e \quad \text{Ecuación 34}$$

$\phi = 0,75$. Factor de reducción.

Dónde:

A_e: área efectiva. mm^2

A_g: área total de la sección transversal. mm^2

F_y: esfuerzo de fluencia mínimo para el tipo de acero usado, MPa.

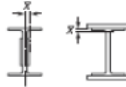

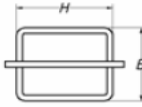
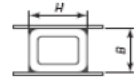
F_u: resistencia de fluencia mínimo para el tipo de acero usado, MPa.

⁴⁹ NSR-10. Título F, F.2.4.2.


⁵⁰ NSR-10. Título F, F.2.4.2.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Tabla 23. Factores por Rezago de Cortante para conexiones en miembros a tensión.

Caso	Descripción del elemento	Factor por rezago de cortante U	Ejemplos
1	Todos los miembros a tensión donde la carga se transmita directamente a cada uno de los elementos de la sección transversal mediante pernos o soldaduras (excepto para los casos 4, 5 y 6)	$U = 1.0$	
2	Todos los miembros a tensión, excepto platinas y PTE, donde la carga de tensión se transmita a algunos pero no a todos los elementos de la sección transversal mediante pernos o soldaduras longitudinales, o por una combinación de soldaduras longitudinales y transversales (para perfiles W, M, S, HP y perfiles laminados similares se puede aplicar alternativamente el caso 7. Para ángulos se puede aplicar el caso 8).	$U = 1 - \frac{\bar{x}}{\ell}$	
3	Todos los miembros a tensión donde la fuerza se transmita mediante soldaduras transversales únicamente a algunos pero no a todos los elementos de la sección transversal	$U = 1.0$ y A_n = área de los elementos conectados directamente	
4	Platinas donde la fuerza de tensión se transmite mediante soldaduras longitudinales únicamente.	$\ell \geq w$ $U = 1.0$ $2w > \ell \geq 1.5w$ $U = 0.87$ $1.5w > \ell \geq w$ $U = 0.75$	
5	PTE circulares con platina de conexión única y concéntrica	$\ell \geq 1.3D$ $U = 1.0$ $D \leq \ell < 1.3D$ $U = 1 - \frac{\bar{x}}{\ell}$ $\bar{x} = D/\pi$	
6	con platina de conexión única y concéntrica	$\ell \geq H$ $\bar{x} = \frac{B^2 + 2BH}{4(B+H)}$ $U = 1 - \frac{\bar{x}}{\ell}$	
	con dos platinas de conexión laterales	$\ell \geq H$ $U = 1 - \frac{\bar{x}}{\ell}$ $\bar{x} = \frac{B^2}{4(B+H)}$	
7	Perfiles W, M, S, HP o perfiles laminados similares, y perfiles T derivados de ellos (se permite calcular U según el caso 2 y tomar el mayor valor)	conexión por las aletas, con 3 ó más pernos por línea en dirección de la carga $b_f \geq 2/3d$ $U = 0.90$ $b_f < 2/3d$ $U = 0.85$	
		conexión por el alma, con 4 o más pernos por línea en dirección de la carga $U = 0.70$	
8	Ángulos simples (se permite calcular U según el caso 2 y tomar el mayor valor)	Con 4 ó más pernos por línea en dirección de la carga $U = 0.80$	
		Con 3 pernos por línea en dirección de la carga (para menos de 3 pernos por línea en dirección de la carga usar el caso 2) $U = 0.60$	
<p> l = longitud de la conexión, mm w = ancho de la platina, mm \bar{x} = excentricidad de la conexión, mm B = ancho total de un miembro en PTE rectangular, medido perpendicularmente al plano de la conexión, mm H = peralte de un miembro en PTE rectangular, medido en el plano de la conexión, mm </p>			

Fuente: NSR-10, tabla F.2.4.3-1 (extracto).

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

De acuerdo a los requisitos de esbeltez, no se establece un límite máximo para miembros a tensión. Pero preferiblemente no debe exceder de 300. Esta recomendación no aplica para pendolones o varillas a tensión. (F.2.4.1, NSR-10)

$$\frac{KL}{r} < 300$$

Ecuación 35

Dónde:

r: radio de giro.

l: longitud del elemento sometido a tensión.

k: factor en función del apoyo

7.7 DISEÑO DE MIEMBROS A COMPRESIÓN

A diferencia de los miembros solicitados por tensión, la compresión hace referencia a la fuerza axial en cada extremo del elemento, que coincide con su eje centroidal y que ejerce una fuerza tal que trata de comprimir el miembro.

Según Valencia Clement⁵¹, cuando un elemento se carga axialmente a compresión el elemento tiende a reducir su longitud, sin embargo, cuando se alcanza una determinada carga; conocida como carga crítica o de pandeo, esta empieza tomar deformaciones laterales o torsionales.

$$\frac{KL}{r} \leq 200$$

Ecuación 36

Dónde:

$\frac{KL}{r}$: relación de esbeltez.

r: radio de giro, evaluado en r_x y r_y .

l: longitud del elemento sometido a tensión.

k: factor en función del apoyo, según Tabla 24.

⁵¹ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.35.



Tabla 24 valores aproximados del factor de la longitud efectiva de K .

Las líneas punteadas muestran la forma pandeada del elemento	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valor K teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son aproximadas	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Símbolos para las condiciones de extremo	<ul style="list-style-type: none"> Rotación y traslación impedidas Rotación libre y traslación impedida Rotación impedida y traslación libre Rotación y traslación libres 					

Fuente: Jack C. McCormac, Diseño de estructuras de acero. p.143.

Para perfiles angulares, la tensión de fluencia efectiva para compresión axial de pandeo local, se calcula según *Tabla F.2.2.4-1a* de la *NSR-10*:

$$b/t \leq 0.45 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad \text{Ecuación 37}$$

Dónde:

b : ancho de la aleta que resiste la fuerza, mm.


t : espesor de la aleta del perfil angular, mm.

E : modulo de elasticidad del acero = 200.000 MPa.

F_y : esfuerzo de fluencia mínimo para el tipo de acero usado, MPa.

La resistencia axial de diseño se calcula como (*NSR-10, Título F*):

$$\phi_c P_n = \phi_c * F_{cr} * A_g \quad \text{Ecuación 38}$$

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] * F_y$$

Ecuación 39

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2}$$

Ecuación 40

P_n : resistencia nominal.

A_g : área total de la sección transversal .

F_{cr} : esfuerzo de pandeo a flexión.

Φ_c : coeficiente de reducción = 0.9

F_e : esfuerzo de pandeo crítico elástico.

E : módulo de elasticidad del acero = 200.000 MPa.

$\frac{KL}{r}$: relación de esbeltez.

7.8 DISEÑO DE CONEXIONES

Por su practicidad, las uniones atornilladas son conexiones saltables, en la cual se unen dos o varias piezas sueltas a través de elementos de unión estandarizados (tornillos y tuercas). Este tipo de uniones por lo general son más económicas, comparándola con las uniones soldadas en campo, las cuales agiliza procesos de montaje y considerándose un montaje más “limpio”.

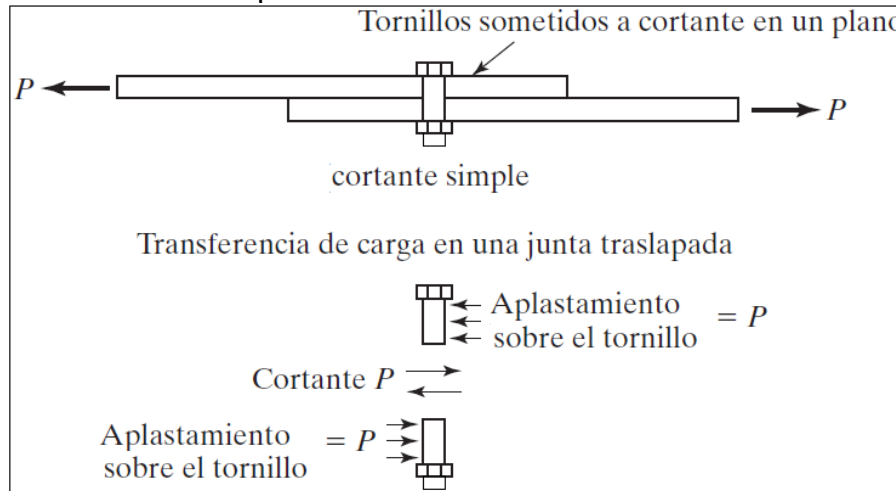
7.8.1 Tipo de juntas

- **Junta traslapada:** Es una junta donde las placas ejercen fuerzas en direcciones opuestas y están conectadas por medio de un grupo de tornillos. En consecuencia, las placas tendrán a degollar a los conectores (Perno). Por tanto, estos conectores se encuentran en corte simple (Figura 21) ⁵².

⁵² Jack C. McCormac, S. F. (2013). Diseño de estructuras en acero. Ciudad de México: Alfaomega. p. 402.



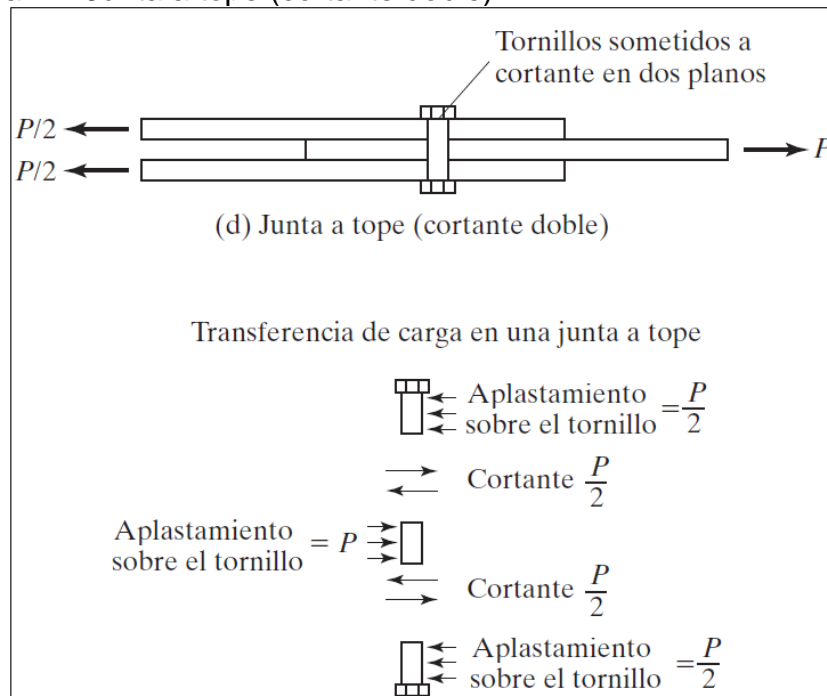
Figura 21. Junta traslapada.



Fuente: Diseño de estructuras en acero. Jack C. McCormac, S. F. (2013).


- **Junta a tope:** Esta junta se forma cuando se conectan tres miembros, por medio de un conjunto de pernos y como resultado tenderán a degollar simultáneamente al perno en los dos planos. Por tanto, se dice que, el perno está sometido a cortante doble y aplastamiento (Figura 22).⁵³

Figura 22. Junta a tope (cortante doble).



Fuente: Diseño de estructuras en acero. Jack C. McCormac, S. F. (2013).

⁵³ Ibid. p.403.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Para el diseño de conexiones planteado en este proyecto, se utilizan pernos de alta resistencia A325, de acuerdo a las características de las tablas 25 y 26.

Tabla 25. Resistencia nominal para pernos y piezas roscadas, MPa.

Descripción de los conectores	Resistencia Nominal a tensión F_{nt} (MPa)	Resistencia Nominal a Cortante en Conexiones Tipo Aplastamiento F_{nv} (MPa) ^(a)
Pernos A307	310 ^(b)	188 ^{(b)(c)}
Pernos Grupo A (tipo A325), con roscas incluidas en los planos de corte	620	372
Pernos Grupo A (tipo A325), cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	620	457
Pernos Grupo B (tipo A490), con roscas incluidas en los planos de corte	780	457
Pernos Grupo B (tipo A490), cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	780	579
Piezas roscadas que satisfacen los requisitos del numeral F.2.1.3.4, con roscas incluidas en los planos de corte	$0.75F_u$	$0.450F_u$
Piezas roscadas que satisfacen los requisitos del numeral F.2.1.3.4, cuando las roscas están excluidas de los planos de corte	$0.75F_u$	$0.563F_u$

Fuente: NSR-10, Título F, Tabla F.2.10.3-2 (extracto) p.F-119


Tabla 26. Diámetros y áreas de pernos.

DIAMETRO PERNO		
\varnothing		Área (mm ²)
PULGADAS	(mm)	A_b
1/2"	12,7	127
5/8"	15,9	199
3/4"	19,05	285
7/8"	22,23	388
1"	25,4	507
1-1/8"	28,6	642
1-1/4"	31,8	794

Fuente: Elaboración propia.

7.8.2 Tipo de conexiones pernadas

Las conexiones pueden ser de dos tipos: conexiones por aplastamiento y conexiones por deslizamiento crítico.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.8.2.1 Conexiones por aplastamiento

“Las uniones por aplastamiento, conocidas como uniones a cortante, son aquellas en las que los pernos no se aprietan con torque especificado; por lo tanto, aunque se puede presentar cierta fricción entre los elementos unidos, esta se desprecia, por lo cual se supone que las superficies en contacto de los miembros pueden deslizarse una con respecto a la otra, en la medida en que actúen cargas en la dirección de los ejes de tales miembros”⁵⁴.

7.8.2.2 Conexiones por deslizamiento crítico

“Al contrario de las uniones por aplastamiento, cuando se utilizan pernos de alta resistencia apretados con el torque especificado, se genera una fuerza normal al plano de los elementos conectados, la que permite que se desarrolle fricción entre las superficies de estos elementos”⁵⁵.

En ese sentido, este trabajo selecciona el tipo de conexión por aplastamiento, entendiendo que el montaje de las torres de telecomunicación puede ser algo tedioso, con la utilización de torques.

Así mismo, se deben tener en cuenta los estados límites asociados a este tipo de conexión, de la siguiente manera:

7.8.2.3 Pernos en tensión

Según Valencia⁵⁶, En este tipo de uniones, cuando los pernos están solicitados por tensión y cortante actuando simultáneamente, los esfuerzos reales, no deben superar la resistencia del material. Por tanto, la resistencia de diseño debe evaluarse con la siguiente ecuación:

$$\phi R_n = \phi F'_n A_b \quad 57 \qquad \text{Ecuación 23}$$


Dónde:

⁵⁴ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.55.

⁵⁵ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.63.

⁵⁶ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.58.

⁵⁷ NSR-10, Título F. Ecuación F.2.10.3-1. p.F-122.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

ϕR_n : resistencia de diseño

ϕ : factor de resistencia igual 0.75

F'_n : resistencia nominal a tensión, MPa. (Tabla 25)

A_b : área nominal del perno .

7.8.2.4 Pernos en cortante

La resistencia de diseño por fuerza cortante en un perno, es calculada según la siguiente ecuación:

$$\phi R_n = \phi F_{nv} A_b \quad 58 \quad \text{Ecuación 42}$$

Dónde:

ϕR_n : resistencia de diseño

ϕ : factor de resistencia igual 0.75

F_{nv} : resistencia nominal a cortante, MPa. (Tabla 25)

A_b : área nominal del perno .

7.8.2.5 Aplastamiento

Según Valencia⁵⁹ Se presentan esfuerzos de aplastamiento, entre el perno y las paredes de la perforación de la platina. Esta resistencia está en función de varios factores:

- **Tamaño de perforación:** Estas pueden ser de varios tamaños estándar, con holguras, alargadas, entre otras (Tabla 27).

Tabla 27. Dimensiones Nominales de perforaciones.

Diámetro del Perno mm (pulg.)	Dimensiones de las Perforaciones			
	Perforación estándar mm	Perforación agrandada mm	Ranura corta (Ancho x largo) mm	Ranura Larga (Ancho x largo) mm
12.7 (1/2")	14.3	15.9	14.3 x 17.5	14.3 x 31.8
15.9 (5/8")	17.5	20.6	17.5 x 22.2	17.5 x 39.7
19.1 (3/4")	20.6	23.8	20.6 x 25.4	20.6 x 47.6
22.2 (7/8")	23.8	27.0	23.8 x 28.6	23.8 x 55.6
25.4 (1")	27.0	31.8	27.0 x 33.3	27.0 x 63.5
≥ 28.6 (≥ 1 1/8")	d + 3.2	d + 7.9	(d + 3.2) x (d + 9.5)	(d + 3.2) x (2.5 x d)

Fuente: NSR-10, Título F, Tabla F.2.10.3-3 (extracto). p.F-120

⁵⁸ NSR-10, Título F. Ecuación F.2.10.3. p.F-123.

⁵⁹ Valencia Clement, Gabriel. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. Bogotá D. C. 2010. p.60.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

- **Deformaciones aceptables:** El material alrededor de la perforación sufre deformaciones, por tanto, la NSR-10 establece la resistencia de diseño en función de la deformación que el diseñador considere apropiado.
- **Distancias entre perforaciones:** La resistencia aumenta en cuando se trabajan con mayores distancias al borde (Tabla 28), teniendo en cuenta que hay un límite donde a pesar de una mayor distancia, la resistencia no aumenta.

Tabla 28. Distancias mínimas al borde.

Diámetro del Perno mm (pulgadas)	Distancia mínima al borde mm
12.7 (½")	19.1
15.9 (5/8")	22.2
19.1 (¾")	25.4
22.2 (7/8")	28.6
25.4 (1")	31.8
28.6 (1 1/8")	38.1
31.8 (1 ¼")	41.3
mayor que 31.8 (1 ¼")	1.25 x d

Fuente: NSR-10, Título F, Tabla F.2.10.3-4 (extracto). p.F-121

La resistencia de diseño al aplastamiento en perforaciones, se determina, si la consideración alrededor del perno, bajo cargas de servicio, es una consideración de diseño se calcula:

$$\phi R_n = 1.2 L_c t F_u \leq 2.4 d t F_u \quad 60 \quad \text{Ecuación 43}$$

Dónde:


d : diámetro nominal del perno, mm.

F_u : resistencia a tensión mínima especificada del material conectado, MPa.

L_c : distancia libre, en la dirección de la fuerza, entre el borde de la perforación considerada y el borde de la perforación adyacente o el borde del material, mm.

t : espesor del material conectado.


⁶⁰ NSR-10, Título F. Ecuación F.2.10.3-6a. p.F-124.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

7.9 REQUISITOS EN CONDICIÓN DE SERVICIO

Según la norma ANSI/TIA-222-G, los estados límite de deformación de la estructura, bajo cargas de servicio en cualquier punto de la estructura no debe exceder:

- 1- Una rotación (giro) de 4 grados alrededor del eje vertical o cualquier (balaceo) eje horizontal de la estructura.
- 2- Un desplazamiento horizontal no superior al 5% de la altura de la estructura.

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

8. RESULTADOS

8.1 CÁLCULO DE CARGAS

Una vez definido el alcance del diseño y la realización del trazo unifilar de las torres (Figura 15), el paso siguiente corresponde a calcular las cargas (muerta, viva, granizo), así como también las generadas por la acción de viento y sismo, de acuerdo con la sección 7.4.4 y 7.4.5 respectivamente.

Nota: La carga viva de cubierta (L_r) y la carga de granizo (G), se encuentran en las secciones 7.4.2 y 7.4.3.

8.1.1 Carga muerta (D)

Se contempla en el diseño el peso de las antenas tipo RF y MW (Tabla 29). Escalera metálica de acceso (Tabla 30), cables de alimentación (Tabla 31), plataforma metálica superior (Tabla 32), y el peso propio de la torre, el cual es considerado directamente por el software SAP2000.

Tabla 29. Elementos a soportar por las torres

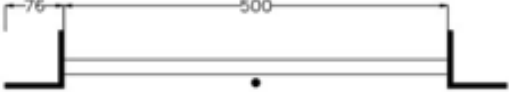
#	Tipo	Catálogo	Dimensiones (m)	No. Antenas	Altura (m)	Peso unit. (kg)	Peso total (kg)
1	RF		2.70 x 0.35 x 0.16	9	h	40.5	364.5
2	RF	Kathrein	2.70 x 0.35 x 0.16	6	h-5	40.5	243
3	MW		2.00	2	h-10	100	200
Σ				17			807.5

h= altura de la torre.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Escalera de acceso

Escalera de acceso



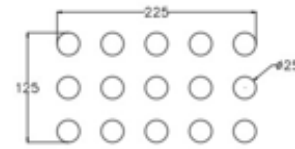
#	Elementos	Catálogo	(kg/m)	(kN/m)
1	L 3"x1/4"	Gerdau diaco	7.29	0.072
2	L 3"x1/4"	Gerdau diaco	7.29	0.072
3	Barra lisa 3/4"	Gerdau diaco	2.24	0.022
4	Linea de vida 3/8"	Gerdau diaco	0.56	0.005
Total			0.170	

Fuente: Elaboración propia



Tabla 31. Cables de alimentación

Cables de alimentación

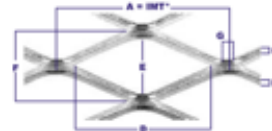


#	Elemento	Catálogo	(kg/m)	(kN/m)	Cant.	(kN/m)
1	Cables de alimentación ϕ 24.5 (mm)	General cable	0.76	0.007	15	0.112

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Malla plataforma superior

Malla expandida plataforma metálica



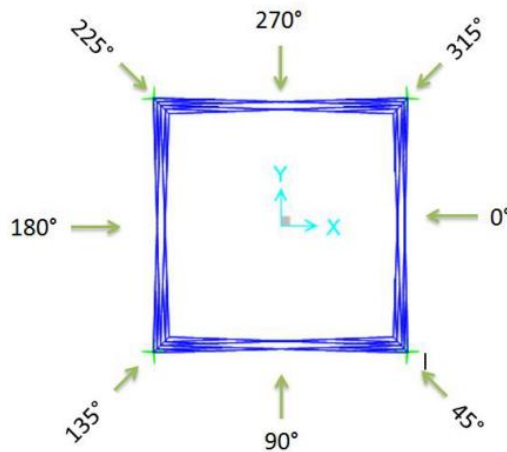
#	Elementos	Catálogo	(kg/m ²)	(kN/m ²)
1	Malla IMT-40	Colmallas	5.90	0.058

Fuente: Elaboración propia


8.1.2 Fuerza de viento (W)

El procedimiento para calcular las fuerzas de viento en las estructuras, es realizado mediante la asignación de perfiles asumidos y la programación hojas de cálculo, ya que, se trata de una técnica iterativa, en la cual se van ajustando los perfiles hasta obtener una fuerza de viento final de diseño. La dirección del viento es asumida, de acuerdo a la Figura 23.

Figura 23. Dirección del viento



Fuente: Elaboración propia

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Las tablas 33,34 y 35, muestran el resultado final de las fuerzas de viento, correspondiente a la torre de 20,30 y 40m. El procedimiento completo de diseño puede observarse en la sección 5.4 de los anexos A, B y C.

Tabla 33. Fuerza de viento Torre 20m

Tramo #	Componente	Perfil	Cant.	Longitud m	Carga Viento (kN/m)								
					0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	
1	Montantes	L 76.2 x 10	2	2.00	4.05	3.09	2.55	1.47	2.73	3.09	3.88	3.09	
	Diagonales	L 57.15 x 6	2	2.24	1.81		1.14		1.22		1.73		
2	Montantes	L 76.2 x 13	2	6.00	1.72	1.37	1.56	1.88	1.72	1.37	1.56	1.88	
	Diagonales	L 57.15 x 6	6	2.24	1.54		1.39		1.54		1.39		
3	Montantes	L 101.6 x 13	2	6.02	1.82	2.03	1.68	1.51	1.82	2.03	1.68	1.51	
	Diagonales t1	L 76.2 x 10	2	3.25	1.68		1.55		1.68		1.55		
	Diagonales t2	L 76.2 x 10	2	3.47	1.58		1.45		1.58		1.45		
4	Montantes	L 101.6 x 13	2	6.02	1.67	1.77	1.53	1.77	1.67	1.77	1.53	1.77	
	Diagonales t1	L 76.2 x 13	2	3.75	1.34		1.23		1.34		1.23		
	Diagonales t2	L 76.2 x 13	2	4.07	1.24		1.13		1.24		1.13		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Fuerza de viento Torre 30m

Tramo #	Componente	Perfil	Cant.	Longitud m	Carga Viento (kN/m)								
					0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	
1	Montantes	L 76,2 x 13	2	6,00	3,46	2,64	2,78	2,69	2,97	2,69	3,27	3,28	
	Diagonales	L 76,2 x 6	6	2,83	2,45		1,96		2,10		2,31		
2	Montantes	L 101,6 x 13	2	6,00	2,49	2,75	2,31	2,08	2,49	2,75	2,31	2,08	
	Diagonales	L 76,2 x 8	6	2,83	1,76		1,63	1,47	1,76		1,63		
3	Montantes	L 127 x 13	2	6,01	2,23	2,50	2,07	2,50	2,23	2,50	2,07	2,50	
	Diagonales t1	L 127 x 16	2	3,80	1,77		1,64		1,77		1,64		
	Diagonales t2	L 127 x 16	2	3,99	1,68		1,56		1,68		1,56		
4	Montantes	L 127 x 16	2	6,01	1,93	2,05	1,78	2,05	1,93	2,05	1,78	2,05	
	Diagonales t1	L 76,2 x 13	2	4,27	1,36		1,25		1,36		1,25		
	Diagonales t2	L 76,2 x 13	2	4,58	1,26		1,17		1,26		1,17		
5	Montantes	L 127 x 8	2	6,01	2,11	2,23	1,97	2,23	2,11	2,23	1,97	2,23	
	Diagonales t1	L 76,2 x 13	2	4,90	1,30		1,21		1,30		1,21		
	Diagonales t2	L 76,2 x 13	2	5,24	1,21		1,13		1,21		1,13		

Fuente: Elaboración propia


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Tabla 35. Fuerza de viento Torre 40m

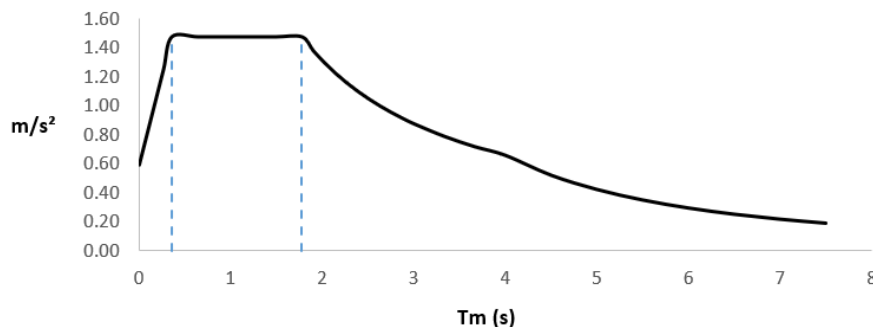
Tramo #	Componente	Perfil	Cant.	Longitud m	Carga Viento (kN/m)							
					0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	Montantes	L 101,6 x 9,53	2	4,00	5,01	3,47	3,93	3,71	4,20	3,71	4,74	4,70
	Diagonales	L 76,2 x 6,35	4	3,20	1,57		1,23		1,31		1,48	
2	Montantes	L 127 x 9,53	2	6,00	2,98	3,35	2,69	2,60	2,97	3,35	2,69	2,60
	Diagonales	L 76,2 x 7,94	6	2,83	1,05		0,95		1,05		0,95	
3	Montantes	L 127 x 15,88	2	6,00	2,40	2,57	2,21	2,57	2,40	2,57	2,21	2,57
	Diagonales	L 76,2 x 12,7	6	3,20	0,75		0,69		0,75		0,69	
4	Montantes	L 152,4 x 15,88	2	6,01	2,05	2,27	1,92	2,27	2,05	2,27	1,92	2,27
	Diagonales t1	L 101,6 x 6,35	2	4,03	1,53		1,43		1,53		1,43	
	Diagonales t2	L 101,6 x 6,35	2	4,29	1,44		1,34		1,44		1,34	
5	Montantes	L 152,4 x 15,88	2	6,01	2,23	2,42	2,09	2,42	2,23	2,42	2,09	2,42
	Diagonales t1	L 101,6 x 6,35	2	4,56	1,47		1,38		1,47		1,38	
	Diagonales t2	L 101,6 x 6,35	2	4,85	1,38		1,30		1,38		1,30	
6	Montantes	L 152,4 x 12,7	2	6,01	2,33	2,56	2,19	2,56	2,33	2,56	2,19	2,56
	Diagonales t1	L 101,6 x 6,35	2	5,15	1,36		1,28		1,36		1,28	
	Diagonales t2	L 101,6 x 6,35	2	5,46	1,28		1,21		1,28		1,21	
7	Montantes	L 152,4 x 12,7	2	5,99	2,55	2,73	2,41	2,73	2,55	2,73	2,41	2,73
	Diagonales t1	L 101,6 x 7,94	2	5,78	1,32		1,25		1,32		1,25	
	Diagonales t2	L 76,2 x 12,7	2	6,10	1,25		1,19		1,25		1,19	

Fuente: Elaboración propia

8.1.3 Sismo (E)

El análisis modal de las estructuras se realiza por medio de un espectro de respuesta de diseño, aplicable para las tres torres (Figura 24). El espectro mostrado está condicionado por la constante gravitacional (9.81 m/s²), con la finalidad de no realizar pasos adicionales en el software SAP2000. El procedimiento completo de diseño puede observarse en la sección 5.5 de los anexos A, B y C.

Figura 24. Espectro de diseño Torres 20,30,40m



Fuente: Elaboración propia

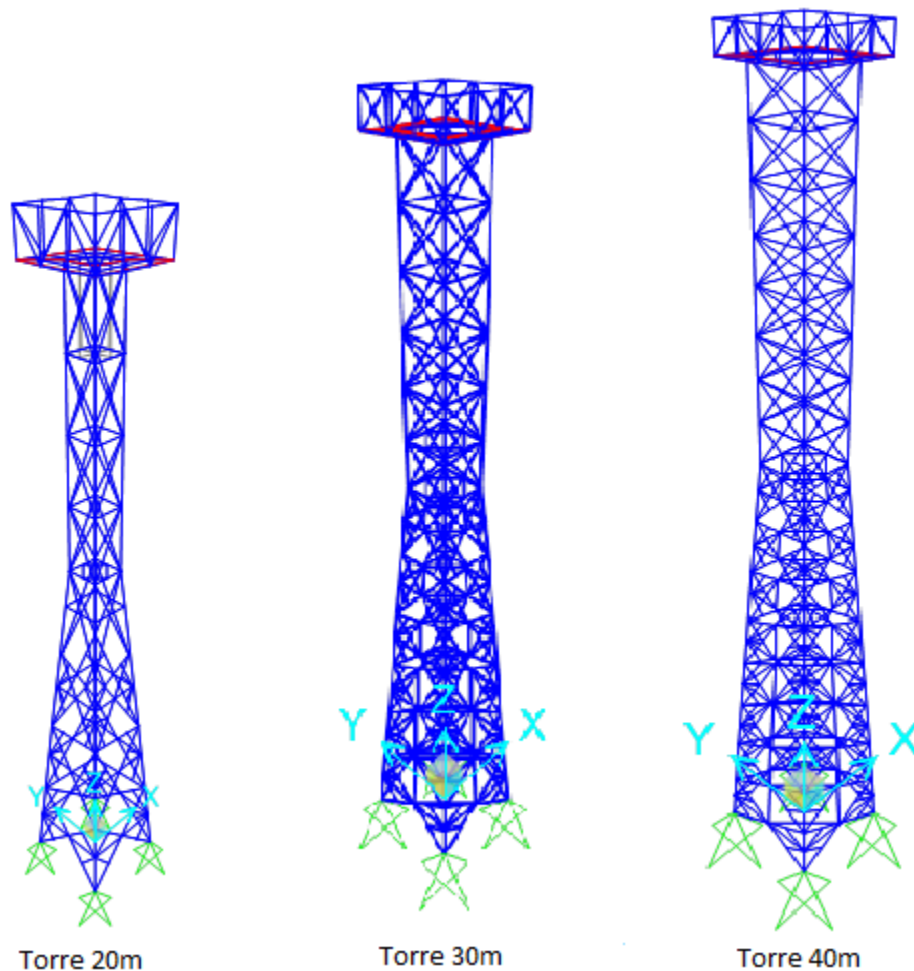


8.2 SOFTWARE SAP2000


Para el análisis y diseño estructural de las torres, se realiza el modelo matemático con la ayuda del Software SAP2000 (Figura 25), utilizando el método de elementos finitos. Este software evalúa las cargas sobre los elementos que componen la torre, teniendo en cuenta las diferentes combinaciones de carga. Esto permite generar el reporte de las fuerzas resultantes tanto en los elementos como en los apoyos, al igual que el diseño de estos elementos y los desplazamientos máximos de la torre causadas por el viento o el sismo.

Mediante el proceso de exportación (AutoCAD a SAP2000), se realizan los pasos correspondientes a la asignación de materiales, perfiles, cargas y combinaciones de carga. El procedimiento completo se encuentra en el anexo D.

Figura 25. Modelo matemático de elementos finitos



Fuente: Software SAP2000

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019 VERSIÓN 0
---	---	---

8.2.1 Análisis estructural

8.2.1.1 Desplazamientos máximos

El desplazamiento máximo de las estructuras (Tabla 36, 37, 38), corresponde a los puntos más elevados de la torre, y se analizan empleando las combinaciones límites de servicio.

Tabla 36. Desplazamientos Torre 20m

TABLE: Joint Displacements					
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3
Text	Text	Text	m	m	m
A-05	D + W180° (Servicio)	Combination	0.073034	-0.000139	-0.003099
D-05	D + W180° (Servicio)	Combination	0.073033	0.000047	0.002676
C-05	D + W180° (Servicio)	Combination	0.072937	0.000038	0.002697
B-05	D + W180° (Servicio)	Combination	0.0729	-0.000141	-0.003092

Fuente: Software SAP2000

Tabla 37. Desplazamientos Torre 30m


TABLE: Joint Displacements T30M					
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3
Text	Text	Text	mm	mm	mm
A-06	D + W0° (Servicio)	Combination	121,897171	0,277174	5,212681
B-06	D + W0° (Servicio)	Combination	121,715450	0,242671	5,270299
C-06	D + W0° (Servicio)	Combination	121,740176	0,175294	7,112522
D-06	D + W0° (Servicio)	Combination	121,831147	0,164191	7,107222

Fuente: Software SAP2000

Tabla 38. Desplazamientos Torre 40m

TABLE: Joint Displacements T40M					
Joint	OutputCase	CaseType	U1	U2	U3
Text	Text	Text	mm	mm	mm
A-08	D + W0° (Servicio)	Combination	183,25700	2,55900	7,76800
B-08	D + W0° (Servicio)	Combination	183,16300	2,55600	7,42100
C-08	D + W0° (Servicio)	Combination	183,17100	2,65100	9,86200
D-08	D + W0° (Servicio)	Combination	183,23400	2,65100	9,54100

Fuente: Software SAP2000

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

8.2.1.2 Reacciones en la base

El cálculo de las reacciones máximas de la estructura (Tabla 39, 40, 41), se obtiene por medio de una combinación de tipo envolvente, donde se incluyen todas las combinaciones límite de servicio, y se registran las mayores para el diseño de la cimentación.

Tabla 39. Reacciones Torre 20m

TABLE: Joint Reactions						
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN
D-01	Envolvente_Cimentación	Combination	Max	39.313	32.669	242.164

Fuente: Software SAP2000

Tabla 40. Reacciones Torre 30m

TABLE: Joint Reactions T30M						
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN
C-01	Envolvente_Cimentación	Combination	Max	76.477	71.405	359.325

Fuente: Software SAP2000

Tabla 41. Reacciones Torre 40m

TABLE: Joint Reactions T 40M						
Joint	OutputCase	CaseType	StepType	F1	F2	F3
Text	Text	Text	Text	KN	KN	KN
C-01	Envolvente	Combination	Max	96.54	90.01	541.76

Fuente: Software SAP2000

8.2.1.3 Participación modal de la masa

De acuerdo al análisis sísmico, los modos de vibración presentes en las estructuras, se evidencian en las tablas 42, 43 y 44.

Tabla 42. Modos de vibración Torre 20m

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.288971	0.26069	0.24302	1.726E-07
MODAL	Mode	2	0.28879	0.50293	0.50273	0.000007503
MODAL	Mode	3	0.075926	0.60999	0.64521	0.00009685
MODAL	Mode	29	0.037409	0.88019	0.87233	0.22698

Fuente: Software SAP2000


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Tabla 43. Modos de vibración Torre 30m

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.352433	0.35589	0.19167	0.000001303
MODAL	Mode	2	0.352206	0.54789	0.54782	0.000003047
MODAL	Mode	3	0.150572	0.54795	0.54782	0.00291
MODAL	Mode	25	0.042352	0.87708	0.87507	0.83775

Fuente: Software SAP2000

Tabla 44. Modos de vibración Torre 40m

TABLE: Modal Participating Mass Ratios						
OutputCase	StepType	StepNum	Period	SumUX	SumUY	SumUZ
Text	Text	Unitless	Sec	Unitless	Unitless	Unitless
MODAL	Mode	1	0.410948	0.11014	0.43868	1.508E-11
MODAL	Mode	2	0.410916	0.54886	0.54884	0.000001082
MODAL	Mode	3	0.13287	0.54886	0.54919	0.00951
MODAL	Mode	19	0.058204	0.86747	0.86789	0.60455

Fuente: Software SAP2000

8.2.2 Diseño estructural

El diseño de los elementos que conforman la torre, es realizado de acuerdo a la normativa AISC 360-10, utilizando el método de resistencia ultima (LRFD) con las combinaciones de carga mayoradas.

El diseño de los elementos presentados en las tablas 45, 46 y 47, corresponde al diseño de los montantes principales de las torres. El diseño completo de todos los elementos se presenta en la sección 8 de los anexos A, B y C.

Tabla 45. Diseño montantes Torre 20m

Frame	DesignSect	DesignType	Status	Ratio	RatioType
M4-04	L4X4X1/2	Column	No Messages	0.572801	PMM
M4-01	L4X4X1/2	Column	No Messages	0.632194	PMM
M4-02	L4X4X1/2	Column	No Messages	0.603625	PMM
M4-03	L4X4X1/2	Column	No Messages	0.664147	PMM

Fuente: Software SAP2000

Tabla 46. Diseño montantes Torre 30m

Frame	DesignSect	DesignType	Status	Ratio	RatioType
M05-02	L5X5X3/8	Column	No Messages	0,79348	PMM
M05-03	L5X5X3/8	Column	No Messages	0,816963	PMM
M05-01	L5X5X3/8	Column	No Messages	0,794481	PMM
M05-04	L5X5X3/8	Column	No Messages	0,817161	PMM

Fuente: Software SAP2000

Tabla 47. Diseño montantes Torre 40m

Frame	DesignSect	DesignType	Status	Ratio	RatioType
M7-02	L6X6X1/2	Column	No Messages	0,761199	PMM
M7-03	L6X6X1/2	Column	No Messages	0,792825	PMM
M7-01	L6X6X1/2	Column	No Messages	0,750012	PMM
M7-04	L6X6X1/2	Column	No Messages	0,7794	PMM

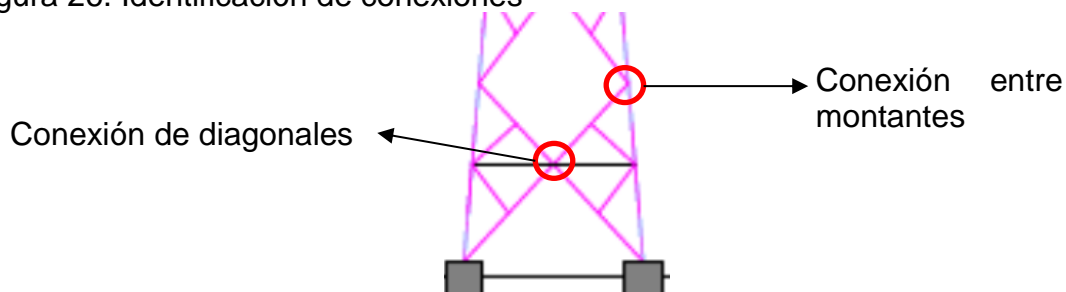
Fuente: Software SAP2000

8.3 CONEXIONES

En cuanto al diseño de conexiones, se utilizan las aplicaciones RAM CONNECTION e IDEA STATICA CONNECTION. Estos programas permiten diseñar todo tipo de conexiones, soldadas o atornilladas mediante la modelación de diferentes escenarios de conexión. Esto permite la verificación rápida de diseño implementando las normas AISC y simplificando la disposición de pernos, placas y soldaduras.

Todas las conexiones se diseñan usando pernos A325. A manera de ejemplo, se muestra la conexión entre montantes usando el software IDEA STATICA (Figura 27,28,29), y la conexión entre diagonales usando RAM CONNECTION (Figura 30,31, 32), en relación a la Figura 26. Los datos de salida completos se observan en la sección 9 de los anexos A, B y C.

Figura 26. Identificación de conexiones

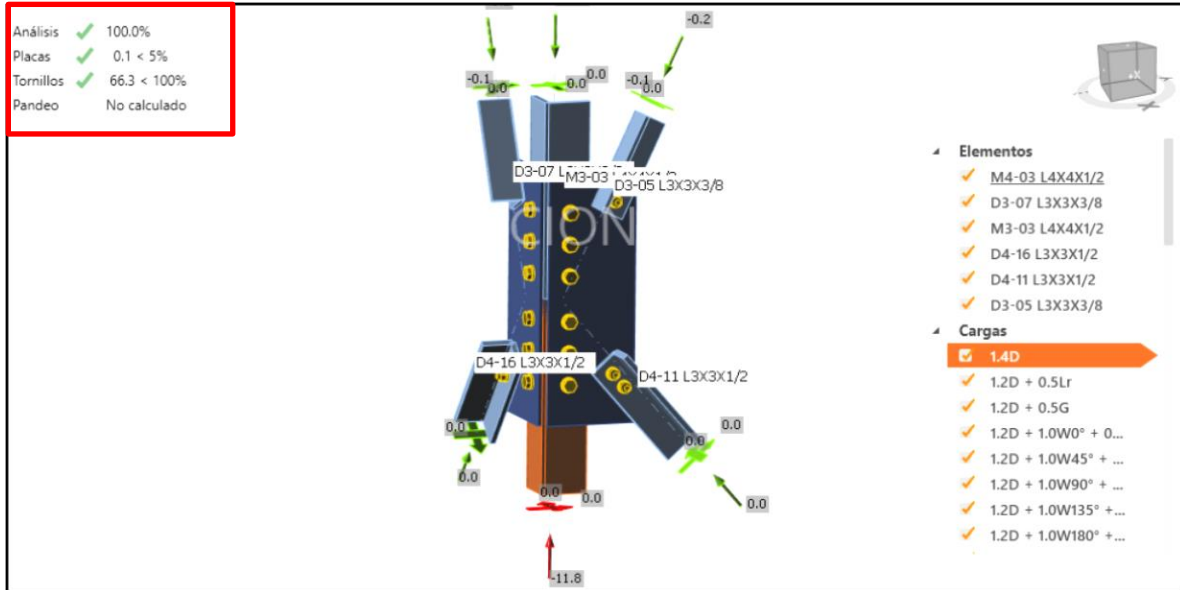


Fuente: Elaboración propia



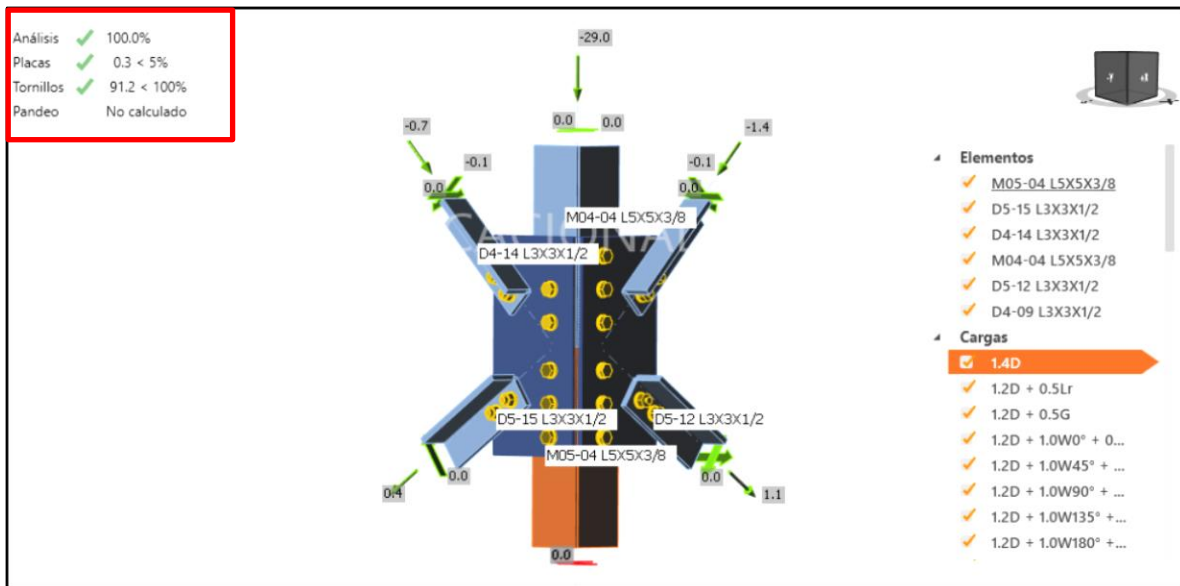
8.3.1 Conexión entre montantes

Figura 27. Empalme Torre 20m



Fuente: Software IDEA STATICA

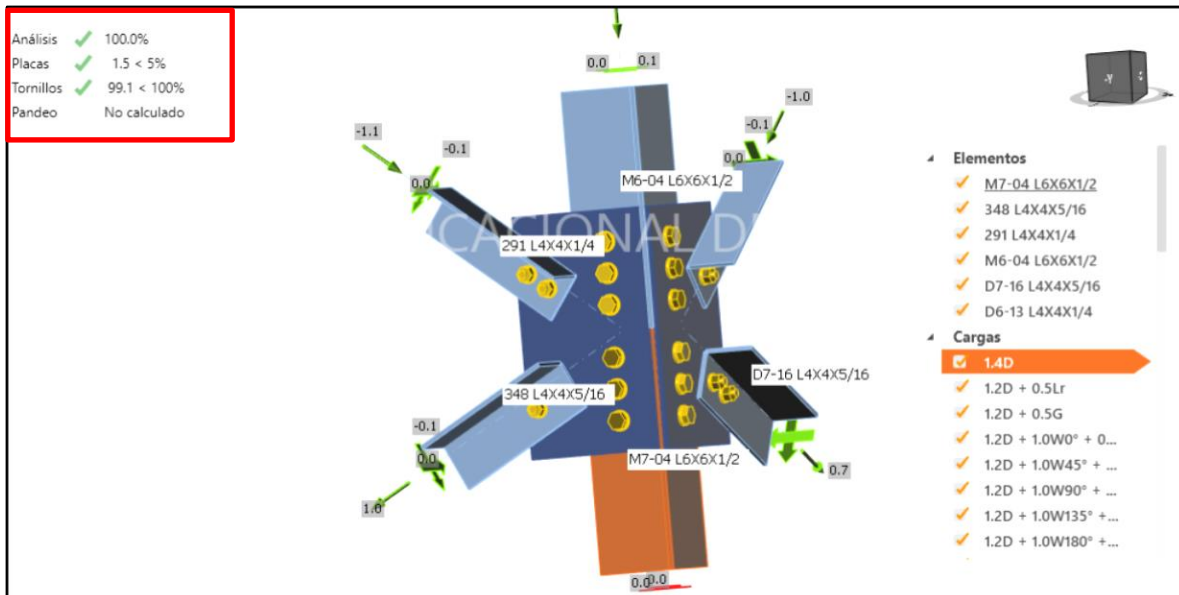
Figura 28. Empalme Torre 30m



Fuente: Software IDEA STATICA



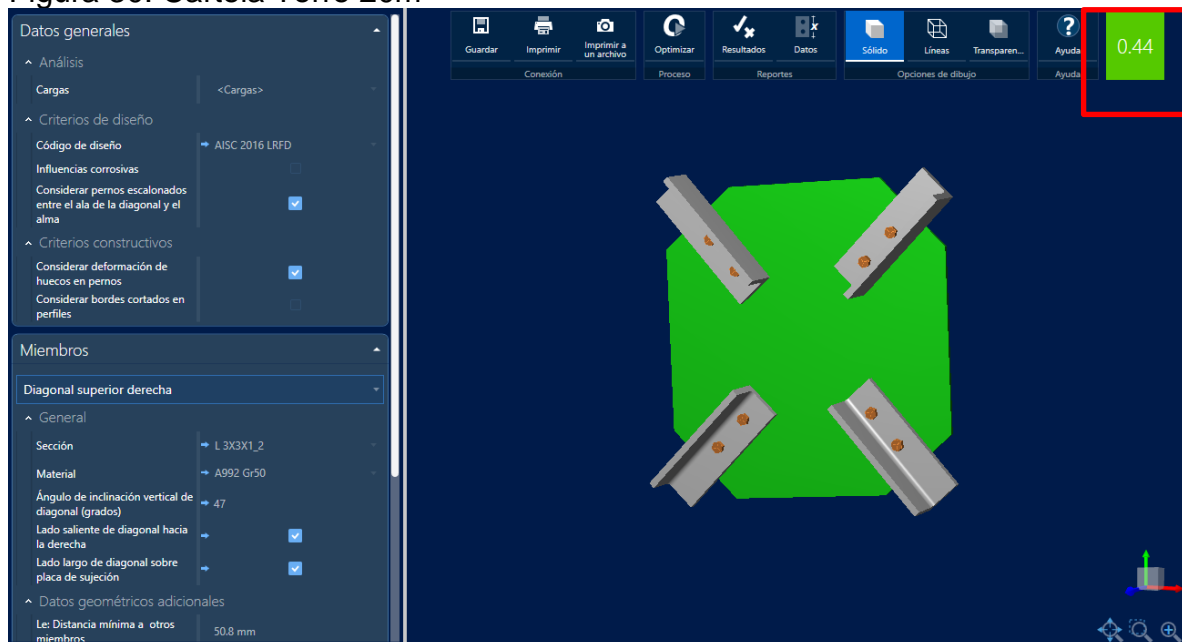
Figura 29. Empalme Torre 40m



Fuente: Software IDEA STATICA

8.3.2 Conexión para diagonales

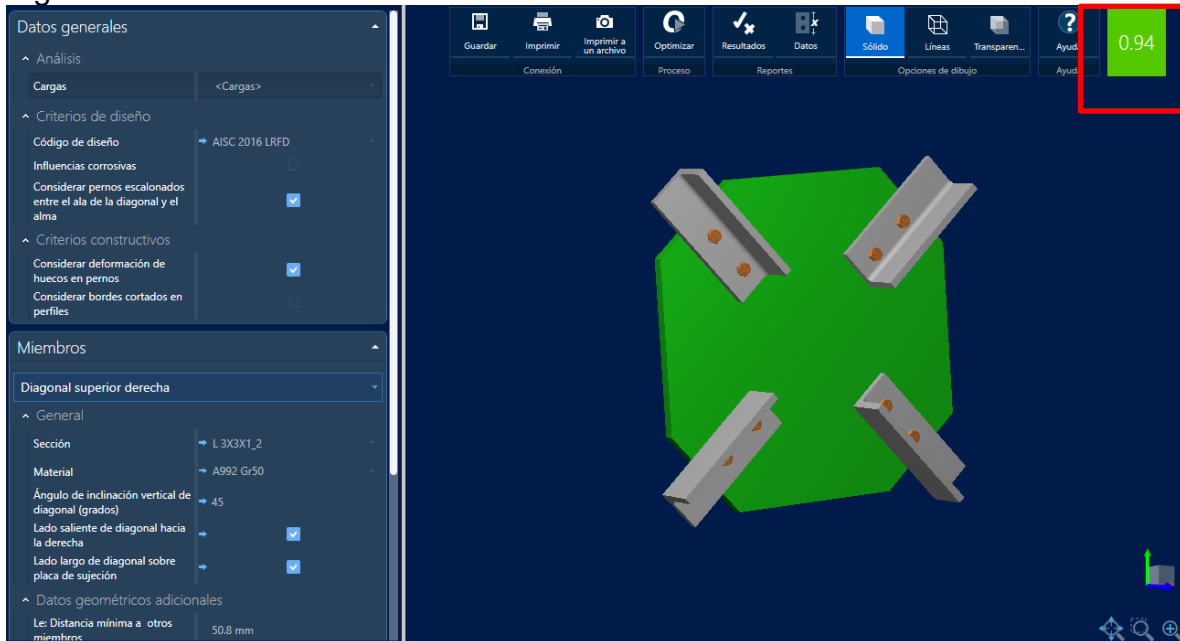
Figura 30. Cartela Torre 20m



Fuente: Software RAM CONNECTION

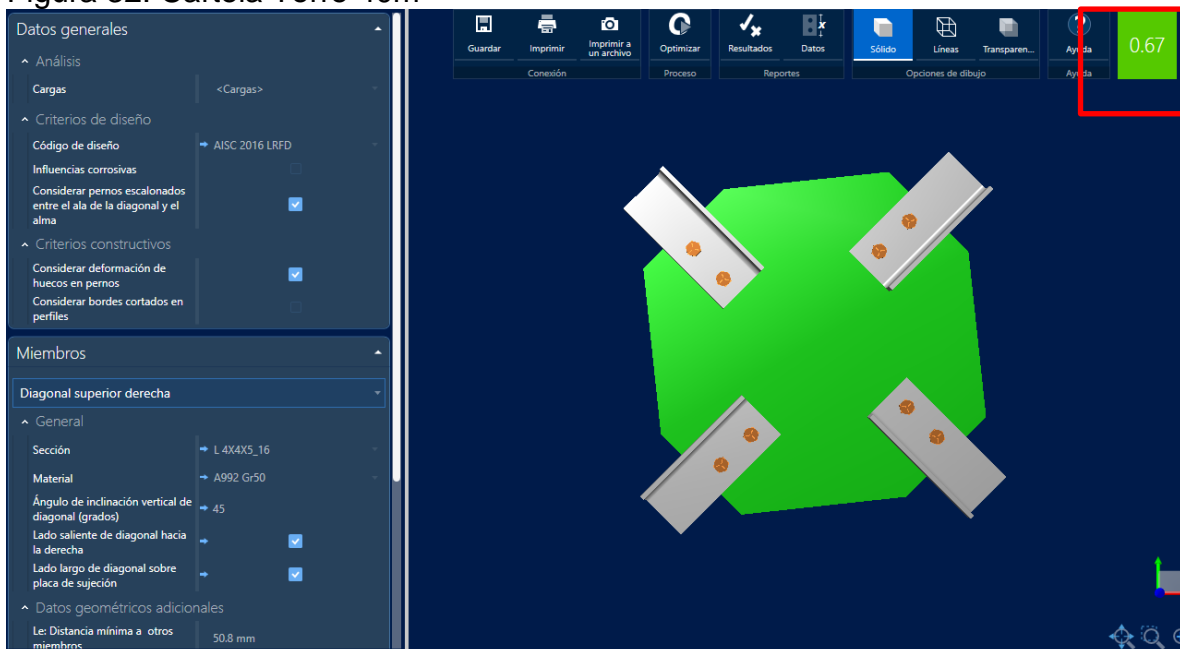


Figura 31. Cartela Torre 30m



Fuente: Software RAM CONNECTION

Figura 32. Cartela Torre 40m



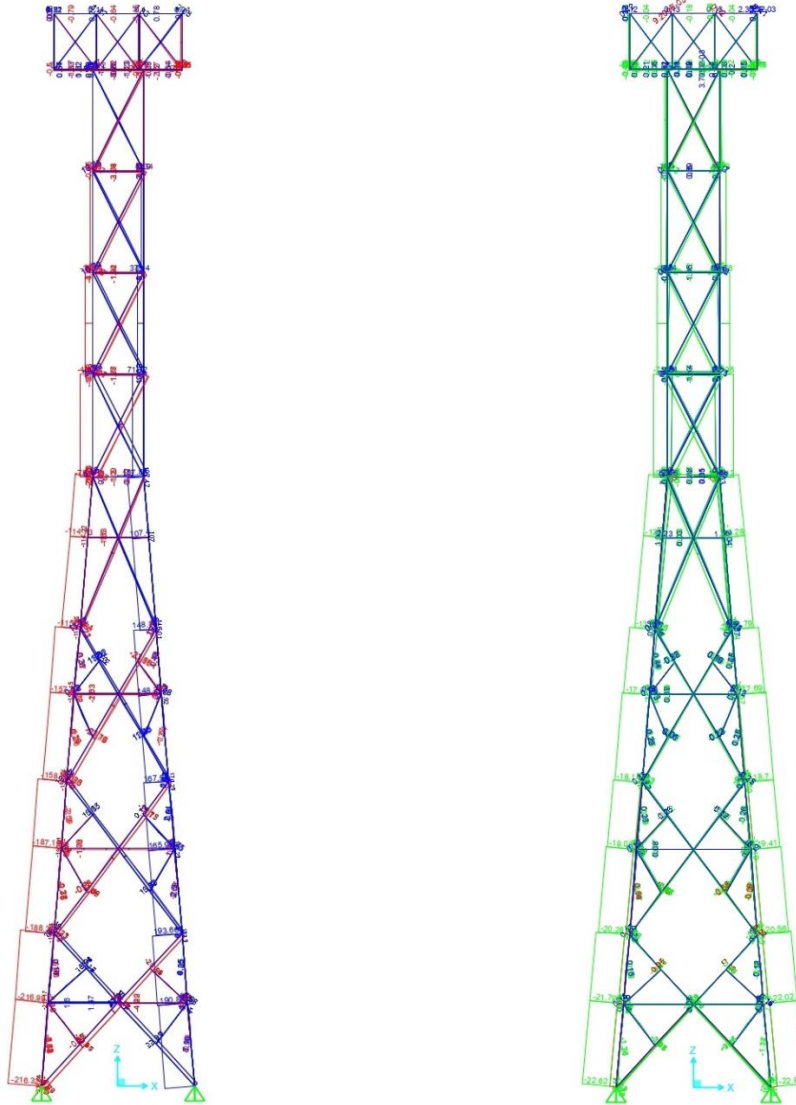
Fuente: Software RAM CONNECTION



9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 VERIFICACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL VIENTO SOBRE LAS TORRES, EN COMPARACIÓN CON LOS EFECTOS SÍSMICOS.

Figura 33. Fuerza axial viento vs sismo Torre 20m



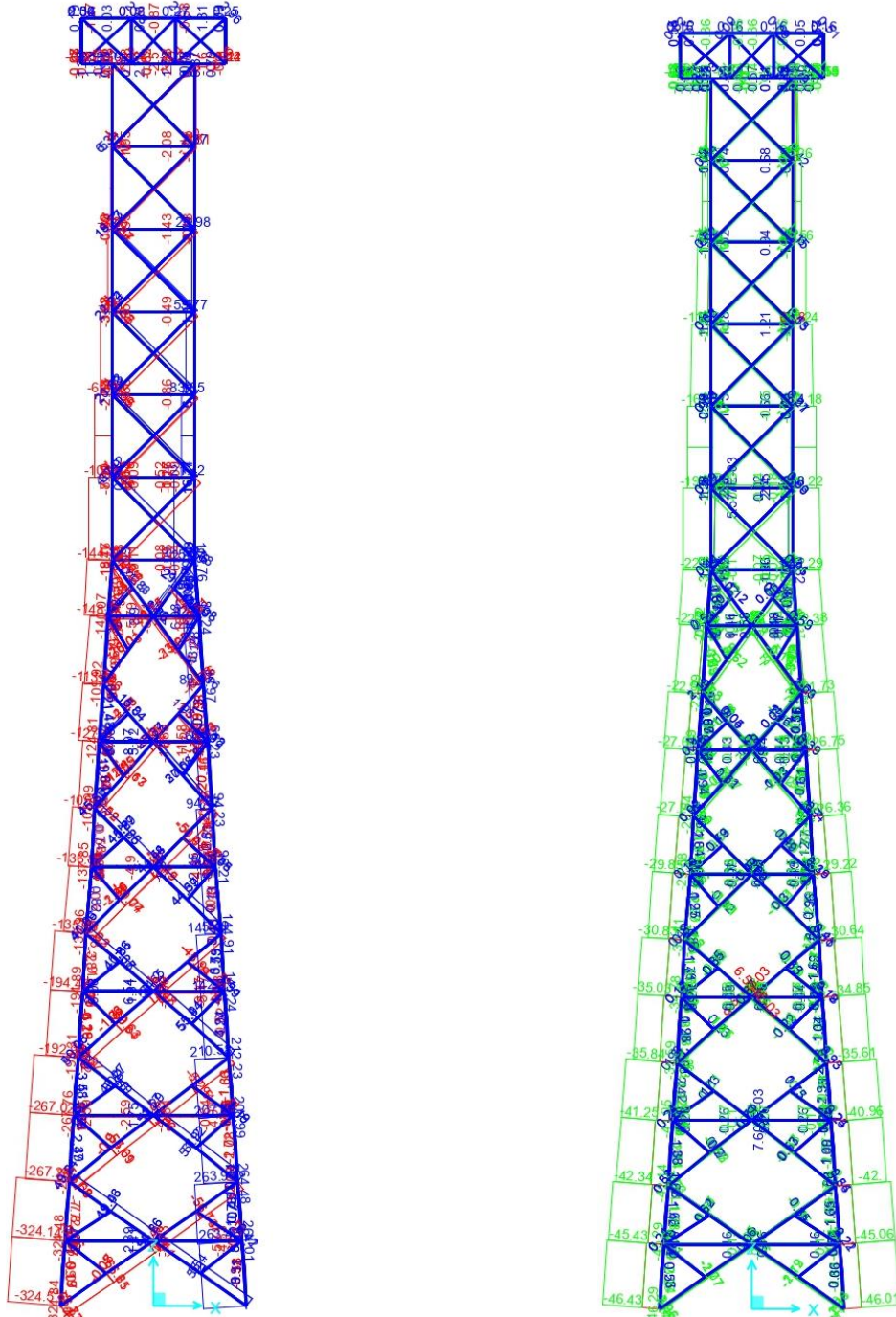
Frame	Viento	P (kN)
M4-03	1.2D + 1.0W0° + 0.5Lr	-219.175

Frame	Sismo	P (kN)
M4-04	1.2D + 1.0Ey + 0.3Ex	-22.809

Fuente: Software SAP2000



Figura 34. Fuerza axial viento vs sismo Torre 30m

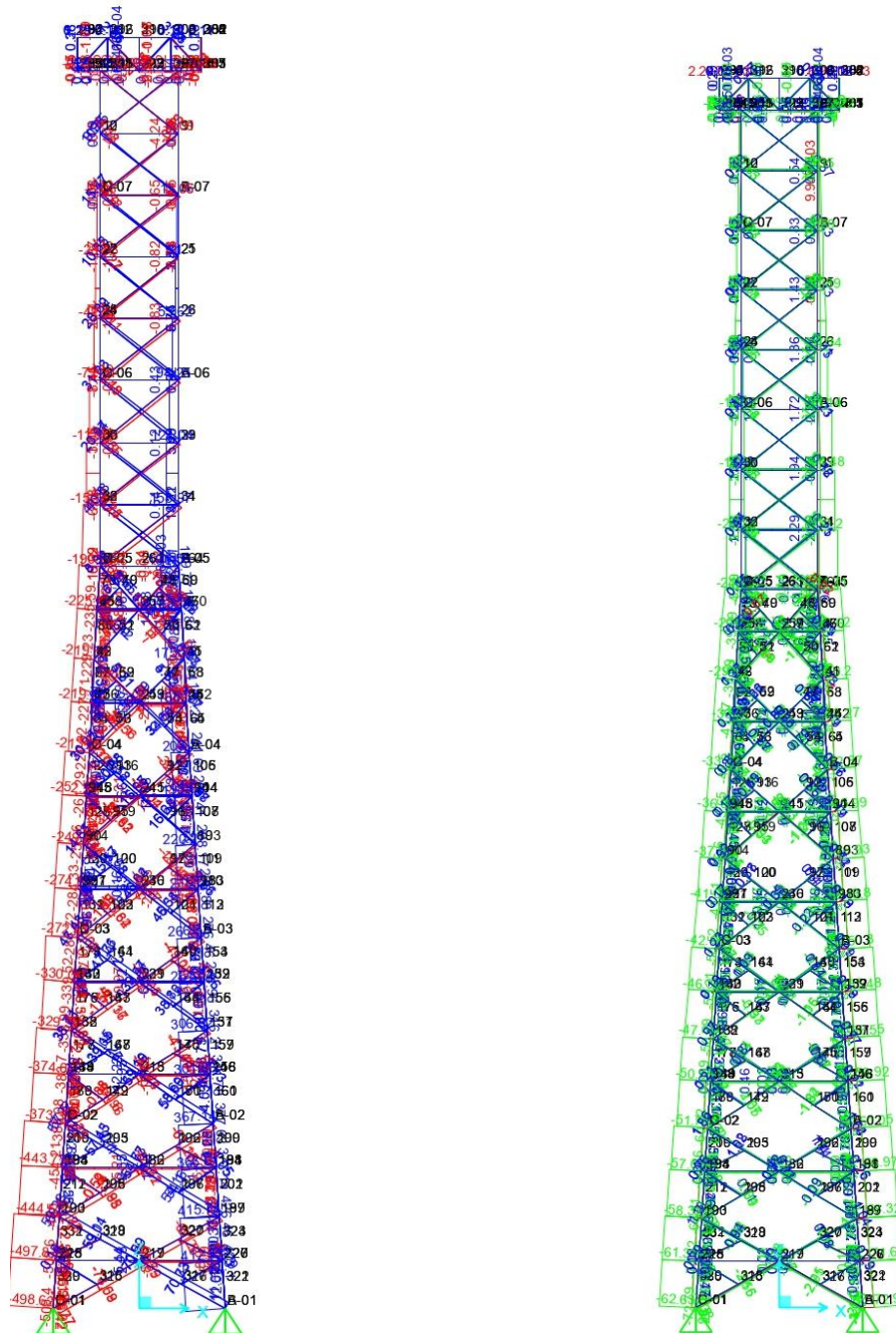


Frame	Viento	P (kN)	Frame	Sismo	P (kN)
M05-03	$1.2D + 1.0W0^\circ + 0.5Lr$	-324.843	M05-04	$1.2D + 1.0Ey + 0.3Ex$	-46.428

Fuente: Software SAP2000



Figura 35. Fuerza axial viento vs sismo Torre 40m



Frame	Viento	P (kN)
M7-03	1.2D + 1.0W0° + 0.5Lr	-509.404

Frame	Sismo	P (kN)
M7-02	1.2D + 1.0Ey + 0.3Ex	-72.978

Fuente: Software SAP2000

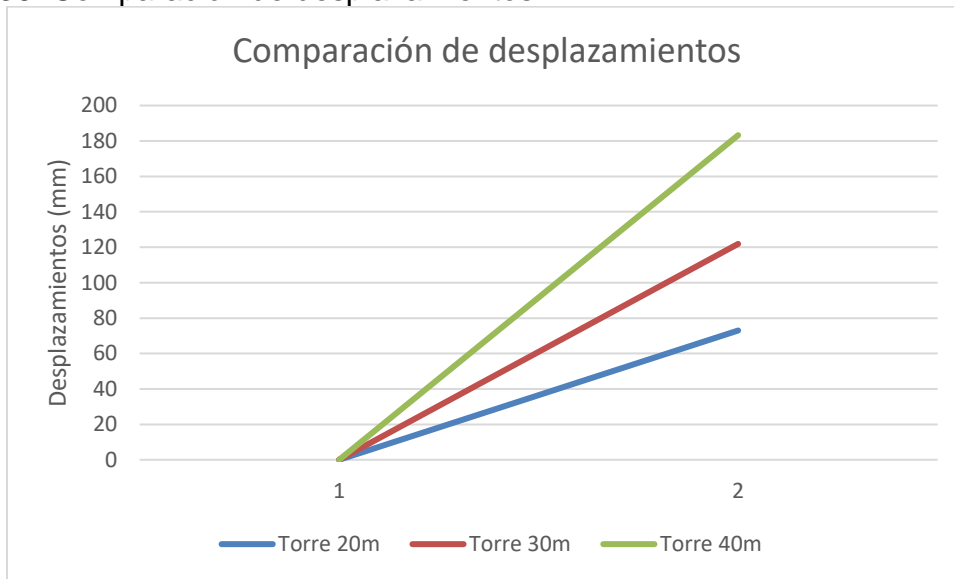


Las fuerzas axiales de las figuras 33, 34 y 35, corresponden a la combinación que genera la mayor carga, asociado al evento sísmico y viento de las torres. En estas graficas se puede apreciar que, la influencia del viento en las torres es mayor, en comparación con los efectos sísmicos. Así mismo, en condiciones de servicio, las torres tienen un mayor desplazamiento por la acción del viento, principalmente en las caras frontales (0° y 180°), de acuerdo con la sección 8.2.1.1.

9.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LAS TORRES MEDIANTE LAS CARGAS APLICADAS.

Con base en los desplazamientos máximos calculados de las estructuras, se evidencia en la Figura 36 que, los desplazamientos aumentan en relación a la altura de las torres. En ese sentido, se debe verificar que dichos desplazamientos cumplan los requerimientos de servicio o funcionamiento, con relación a la sección 7.9 (Tabla 48).

Figura 36. Comparación de desplazamientos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 48. Verificación de desplazamientos

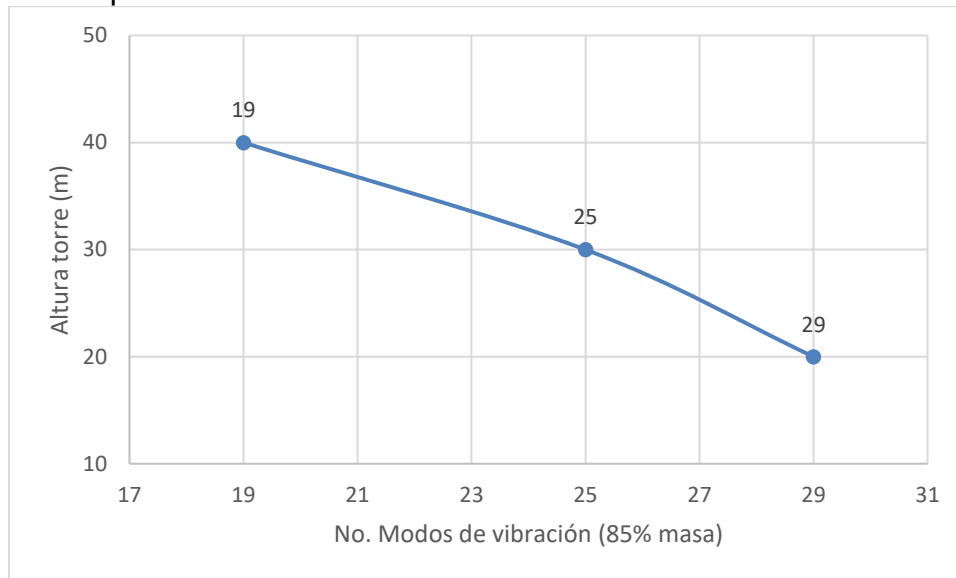
Altura torre (m)	Desplazamiento Limite (m)	Desplazamiento calculado (m)	Verificación
20.00	1.00	0.073	Cumple
30.00	1.50	0.1219	Cumple
40.00	2.00	0.1832	Cumple

Fuente: Elaboración propia



De acuerdo con el análisis modal realizado para las torres, se observa en la tabla 49, una relación de los modos de vibración requeridos para alcanzar el 85% de la masa, según la sección 7.4.5.1.

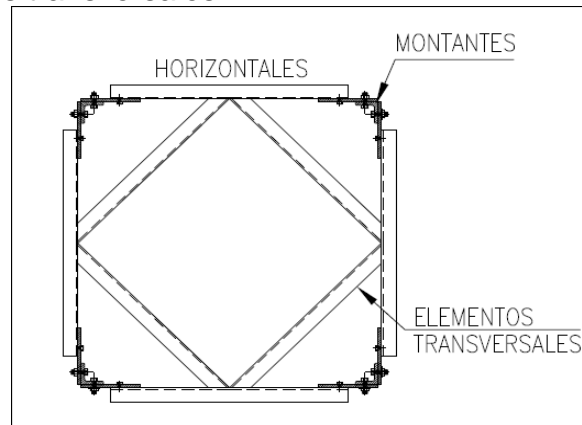
Tabla 49. Comparación modos de vibración



Fuente: Elaboración propia

La relación inversa del número de modos con respecto a la altura de las torres, se debe a la utilización de elementos transversales (Figura 37), que permitan arriostrar las torres más altas, con el fin de generar más estabilidad y controlar la torsión en las estructuras. Esto lleva a que la participación de las masas, se desarrolle en un número más pequeño de modos de vibración.

Figura 37. Elementos transversales.

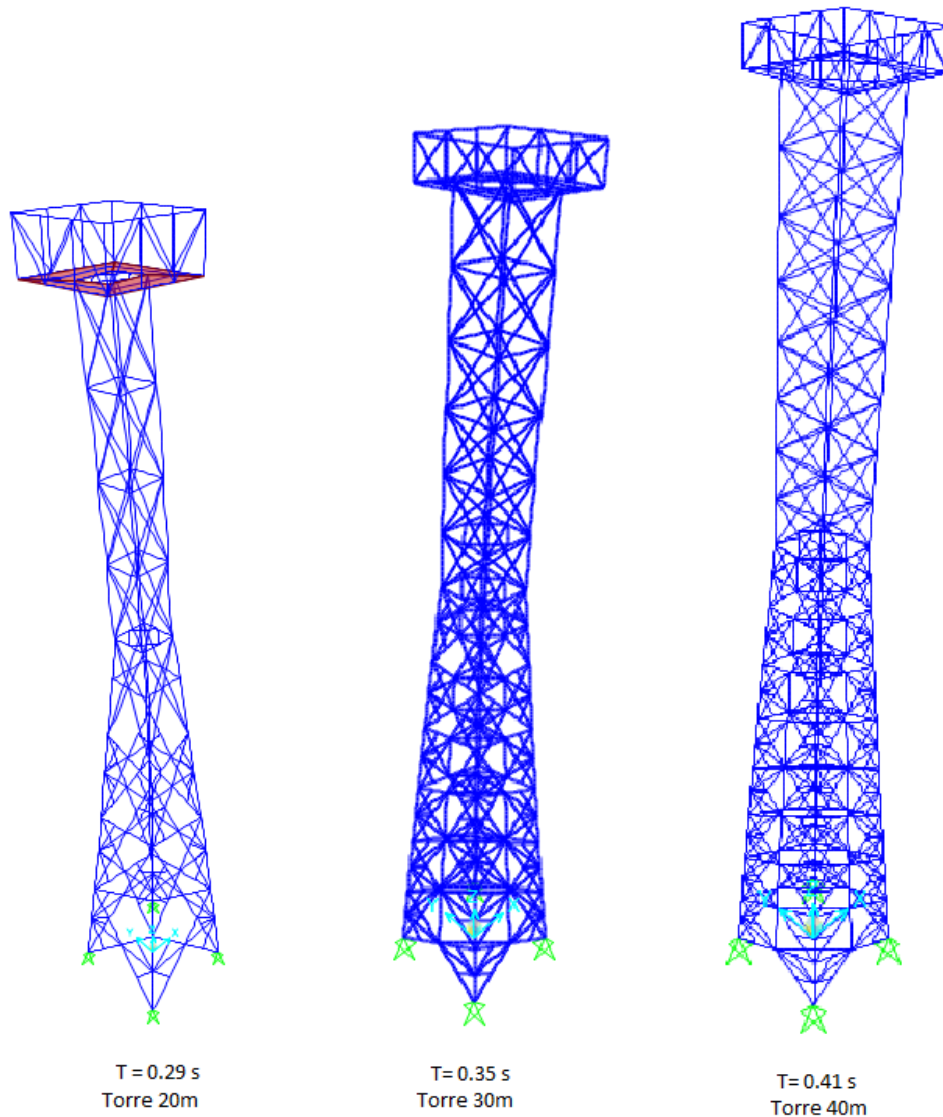


Fuente: Elaboración propia.



Con base en lo anterior, se analiza la respuesta dinámica de las torres, con respecto al periodo fundamental de vibración del modo 1, mediante la Figura 38.

Figura 38. Comparación periodos de vibración



Fuente: Software SAP2000

Para las torres estudiadas, el periodo de oscilación es directamente proporcional a la altura de las torres. En ningún caso, el periodo fundamental supera 1s, por lo que las torres diseñadas pueden considerarse rígidas.



9.3 CÁLCULOS MANUALES DE DISEÑO EN ELEMENTOS Y CONEXIONES.

9.3.1 Montante principal T20m (SAP2000)

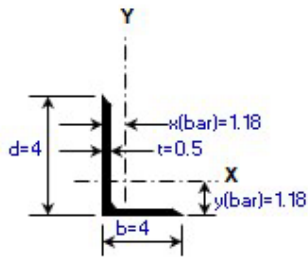
Datos de entrada:

Elemento: *M4 – 03* (Montante principal)

Longitud: $L := 6.042 \text{ m}$

Sección: **L4"x4"x1/2"**

Propiedades de la sección:



$$\begin{aligned}
 A &:= 3.75 \text{ in}^2 & r_x &:= 1.213 \text{ in} \\
 d &:= 4 \text{ in} & r_z &:= 0.776 \text{ in} \\
 b &:= 4 \text{ in} & S_x &:= 1.96 \text{ in}^3 \\
 t &:= 0.5 \text{ in} & C_w &:= 0.366 \text{ in}^6 \\
 I_x &:= 5.52 \text{ in}^4 & J &:= 0.322 \text{ in}^4
 \end{aligned}$$



Propiedades del material:

Acero estructural: **A992**

Límite elástico mínimo: $f_y := 345 \text{ MPa}$

Resistencia última: $f_u := 450 \text{ MPa}$

Modulo de elasticidad: $E := 200000 \text{ MPa}$

Solicitaciones:

Carga axial: $P_u := 190.871 \text{ kN}$ (Compresión)

Momento máximo: $M_{umax} := 3.6 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Momento mínimo: $M_{umin} := 0.302 \text{ kN} \cdot \text{m}$



Relación de esbeltez local a compresión:

Caso 3:
$$\frac{b}{t} < 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Relación ancho a espesor:
$$\lambda := \frac{b}{t} = 8$$

Relación limite:
$$\lambda_r := 0.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 10.83$$

$$\lambda \leq \lambda_r \quad \text{-----} > \quad r = \text{“Perfil Compacto”}$$

Capacidad a Compresión:

Factor de arriostamiento:
$$f := 0.278$$

Longitud no arriestrada:
$$L_b := L \cdot f = 1.68 \text{ m}$$

Factor de longitud efectiva:
$$K := 1$$

Para miembros de un solo angulo:
$$\frac{L_b}{r_x} = 54.52$$

Esbeltez modificada:
$$\frac{L_{ib}}{r_x} \leq 80 \quad \text{-----} > \quad 72 + 0.75 \left(\frac{L_b}{r_x} \right) = 112.89$$

$$4.71 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 113.4$$

Tensión de pandeo elástico:
$$F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_b}{r_x} \right)^2} = 271.81 \text{ MPa}$$

Tensión crítica:
$$F_{cr} = 202.82 \text{ MPa}$$

Coefficiente a compresión (LRFD):
$$\phi := 0.90$$

Resistencia de diseño:
$$\phi P_n := \phi \cdot F_{cr} \cdot A = 442 \text{ kN}$$



Relación de esbeltez local a flexión:

Caso 12:
$$\frac{b}{t} \leq 0.54 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}$$

Relación ancho a espesor:
$$\lambda := \frac{b}{t} = 8$$

Relación limite:
$$\lambda_p := 0.54 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 13$$

$$\lambda \leq \lambda_p \quad \text{-----} > \quad r = \text{“Perfil Compacto”}$$

Capacidad a Flexión:

Coefficiente a flexión (LRFD):
$$\phi := 0.90$$

Fluencia en angulos:
$$M_y := f_y \cdot S_x = 11.08 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Resistencia de diseño:
$$\phi M_n := \phi \cdot 1.5 \cdot M_y = 14.96 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Relación demanda / capacidad:

Ecuación de interacción:
$$\frac{P_u}{\phi P_n} = 0.43 \quad \frac{P_u}{\phi P_n} \geq 0.2$$

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{umax}}{\phi M_n} + \frac{M_{umin}}{\phi M_n} \right)$$

Relación cálculo manual:
$$ratio := \frac{P_u}{\phi P_n} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{umax}}{\phi M_n} + \frac{M_{umin}}{\phi M_n} \right) = 0.664 \quad \checkmark$$

Relación SAP2000:
$$ratio_{SAP2000} := 0.664 \quad \checkmark$$

Porcentaje de error:
$$error := \frac{(ratio - ratio_{SAP2000})}{ratio_{SAP2000}}$$

$$error = 0$$

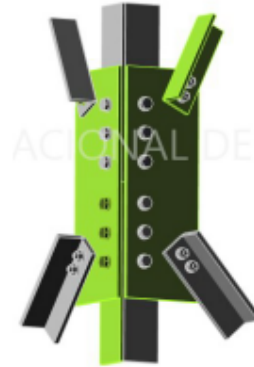




9.3.2 Conexión entre tramos, empalme T20m (IDEA STATICA)

Datos de entrada:

Montante portante:	M4 – 03	L4"x4"x1/2"
Montante a empalmar:	M3 – 03	L4"x4"x1/2"
Diagonales:	D4 – 11	L3"x3"x1/2"
	D4 – 16	L3"x3"x1/2"
	D3 – 05	L3"x3"x3/8"
	D3 – 07	L3"x3"x3/8"



Propiedades del material: Acero estructural: **A992**

Límite elástico mínimo: $f_y := 345 \text{ MPa}$

Resistencia ultima: $f_u := 450 \text{ MPa}$

Acero estructural: **A36**

Límite elástico mínimo: $F_y := 250 \text{ MPa}$

Resistencia ultima: $F_u := 400 \text{ MPa}$

Modulo de elasticidad: $E := 200000 \text{ MPa}$

Propiedades de los pernos: Pernos de alta resistencia: **A325**

Resistencia nominal a tensión: $F_{nt} := 620 \text{ MPa}$

Resistencia nominal a cortante: $F_{nv} := 372 \text{ MPa}$

Área nominal del perno $\Phi_1 := \frac{1}{2} \text{ in}$: $A_{b1} := \frac{\pi}{4} (\Phi_1)^2 = 127 \text{ mm}^2$

Área nominal del perno $\Phi_2 := \frac{5}{8} \text{ in}$: $A_{b2} := \frac{\pi}{4} (\Phi_2)^2 = 198 \text{ mm}^2$



Resistencia de los pernos:

Coeficiente a tensión y cortante (LRFD): $\phi := 0.75$

Resistencia de diseño a tensión: $\phi R_{nt1} := \phi \cdot F_{nt} \cdot A_{b1} = 59 \text{ kN}$ (1/2")

$\phi R_{nt2} := \phi \cdot F_{nt} \cdot A_{b2} = 92 \text{ kN}$ (5/8")

Resistencia de diseño a cortante: $\phi R_{nv1} := \phi \cdot F_{nv} \cdot A_{b1} = 35 \text{ kN}$ (1/2")

$\phi R_{nv2} := \phi \cdot F_{nv} \cdot A_{b2} = 55 \text{ kN}$ (5/8")

Resistencia al aplastamiento de los elementos conectados:

$$1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u$$

Distancia libre entre pernos: $l_c := 54 \text{ mm}$

Espesor de platina: $t := \frac{3}{8} \text{ in} = 10 \text{ mm}$

$$d := \Phi_2$$

$$\phi R_{n1} := \phi \cdot 1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u = 185.17 \text{ kN}$$

Resistencia: $\phi R_{n2} := \phi \cdot 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u = 108.87 \text{ kN}$

Solicitaciones pernos críticos:

Fuerza a tensión $\Phi_1 := \frac{1}{2} \text{ in}$: $F_{t1} := 5.0 \text{ kN}$

Fuerza a corte $\Phi_1 := \frac{1}{2} \text{ in}$: $V_1 := 22.2 \text{ kN}$

Fuerza a tensión $\Phi_2 := \frac{5}{8} \text{ in}$: $F_{t2} := 2.8 \text{ kN}$

Fuerza a corte $\Phi_2 := \frac{5}{8} \text{ in}$: $V_2 := 36.6 \text{ kN}$

Como la solicitación conjunta a tensión y a corte es menor a 30%, no es necesario tener en cuenta la ecuación de interacción tracción-cortante (AISC 360-16: J3-2).



Relación demanda/capacidad:

Relación a tensión $\Phi_1 := \frac{1}{2} in :$ $ratio_1 := \frac{F_{t1}}{\phi R_{nt1}} = 0.08$

Relación a corte $\Phi_1 := \frac{1}{2} in :$ $ratio_2 := \frac{V_1}{\phi R_{nv1}} = 0.63$

Relación a tensión $\Phi_2 := \frac{5}{8} in :$ $ratio_3 := \frac{F_{t2}}{\phi R_{nt2}} = 0.03$

Relación a corte $\Phi_2 := \frac{5}{8} in :$ $ratio_4 := \frac{V_2}{\phi R_{nv2}} = 0.66$

Relación de aplastamiento: $ratio_5 := \frac{V_2}{\min(\phi R_{n1}, \phi R_{n2})} = 0.34$

Relación general de la conexión: $ratio := \max(ratio_1, ratio_2, ratio_3, ratio_4, ratio_5)$

$ratio = 0.663$ ✓

Relación Idea Statica: $ratio_{IdeaStatica} := 0.663$ ✓

Porcentaje de error: $error := \frac{(ratio - ratio_{IdeaStatica})}{ratio_{IdeaStatica}}$

$error = 0$



9.3.3 Conexión en diagonales, Cartela T20m (RAM CONNECTION)

Datos de entrada:

Diagonales:	<i>D4-1</i>	L3"x3"x1/2"
	<i>D4-2</i>	L3"x3"x1/2"
	<i>D4-3</i>	L3"x3"x1/2"
	<i>D4-4</i>	L3"x3"x1/2"



Propiedades del material: Acero estructural: **A992**

Límite elástico mínimo: $f_y := 345 \text{ MPa}$

Resistencia ultima: $f_u := 450 \text{ MPa}$

Acero estructural: **A36**

Límite elástico mínimo: $F_y := 250 \text{ MPa}$

Resistencia ultima: $F_u := 400 \text{ MPa}$

Modulo de elasticidad: $E := 200000 \text{ MPa}$

Propiedades de los pernos: Pernos de alta resistencia: **A325**

Resistencia nominal a tensión: $F_{nt} := 620 \text{ MPa}$

Resistencia nominal a cortante: $F_{nv} := 372 \text{ MPa}$

Área nominal del perno $\Phi := \frac{1}{2} \text{ in}$: $A_{b1} := \frac{\pi}{4} (\Phi)^2 = 127 \text{ mm}^2$

Numero de pernos : $\# := 2$



Resistencia de los pernos:

Coefficiente a tensión y cortante (LRFD): $\phi := 0.75$

Resistencia de diseño a tensión: $\phi R_{nt} := \phi \cdot F_{nt} \cdot A_{b1} \cdot \# = 118 \text{ kN}$

Resistencia de diseño a cortante: $\phi R_{nv} := \phi \cdot F_{nv} \cdot A_{b1} \cdot \# = 71 \text{ kN}$

Resistencia al aplastamiento de los elementos conectados:

$$1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u \leq 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u$$

Distancia libre al borde: $l_c := 44 \text{ mm}$

Espesor de platina: $t := \frac{1}{4} \text{ in} = 6.35 \text{ mm}$

$$d := \Phi$$

Resistencia en pernos: $\phi R_{n1} := (\phi \cdot 1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot f_u) \cdot 2 = 226.31 \text{ kN}$

$$\phi R_{n2} := (\phi \cdot 2.4 \cdot d \cdot t \cdot f_u) \cdot 2 = 130.64 \text{ kN}$$

Resistencia en platina: $\phi R_{n3} := (\phi \cdot 1.2 \cdot l_c \cdot t \cdot F_u) \cdot 2 = 201.17 \text{ kN}$

$$\phi R_{n4} := (\phi \cdot 2.4 \cdot d \cdot t \cdot F_u) \cdot 2 = 116.13 \text{ kN}$$

Solicitud diagonal crítica:

Carga axial: $P_u := 30.74 \text{ kN}$

Relación demanda/capacidad:

Relación a corte : $ratio_1 := \frac{P_u}{\phi R_{nv}} = 0.43$



Relación de aplastamiento (pernos): $ratio_2 := \frac{P_u}{\min(\phi R_{n1}, \phi R_{n2})} = 0.24$

Relación de aplastamiento (platina): $ratio_3 := \frac{P_u}{\min(\phi R_{n3}, \phi R_{n4})} = 0.26$

Relación general de la conexión: $ratio := \max(ratio_1, ratio_2, ratio_3)$

$ratio = 0.435$ ✓

Relación RAM Connection: $ratio_{RAM} := 0.44$ ✓

Porcentaje de error: $error := \text{abs}\left(\frac{(ratio - ratio_{RAM})}{ratio_{RAM}}\right)$

$error = 1\%$



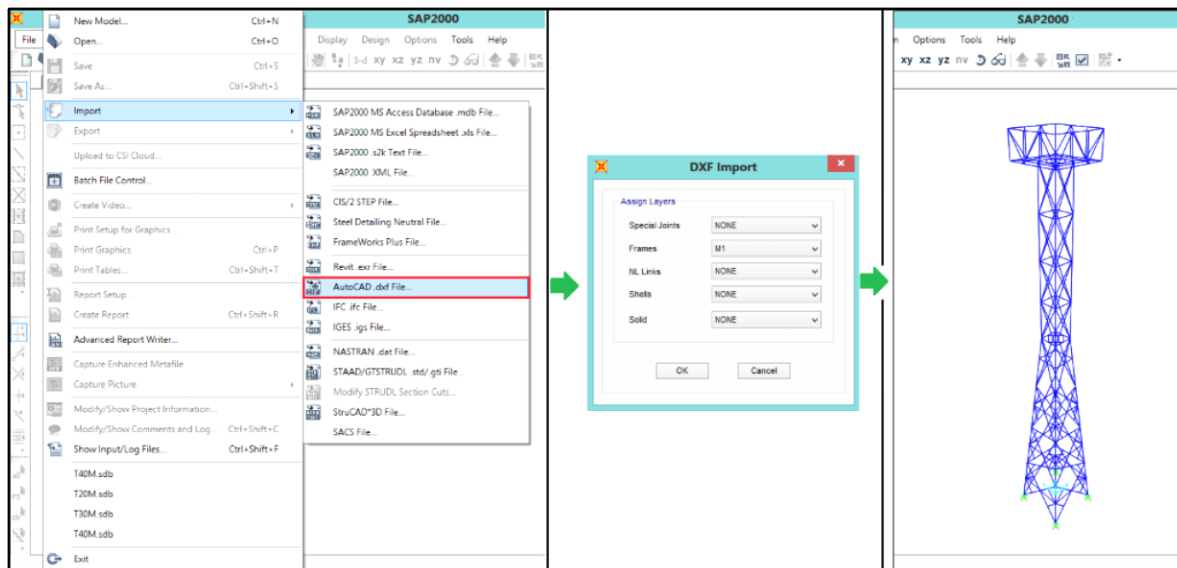
9.4 REALIZACIÓN GUÍA DE DISEÑO

A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado de las estructuras, se genera una guía aplicada al diseño de torres de telecomunicaciones en Colombia. Con el fin de que la evaluación de las torres, se realice de manera completa, se incluye una propuesta de cimentación, presupuesto, y la realización de planos estructurales.

El desarrollo de la guía de diseño (Anexo D), muestra el paso a paso ejecutado, para llevar a cabo el desarrollo de torres, utilizando software especializado de diseño. El documento se divide en dos secciones: Análisis y diseño de elementos usando SAP2000, y diseño de conexiones mediante IDEA STATICA y RAM CONNECTION.

Como ilustraciones a el contenido, se presentan las Figuras 39, 40 y 41, no obstante, el desarrollo completo se observa en el Anexo D.

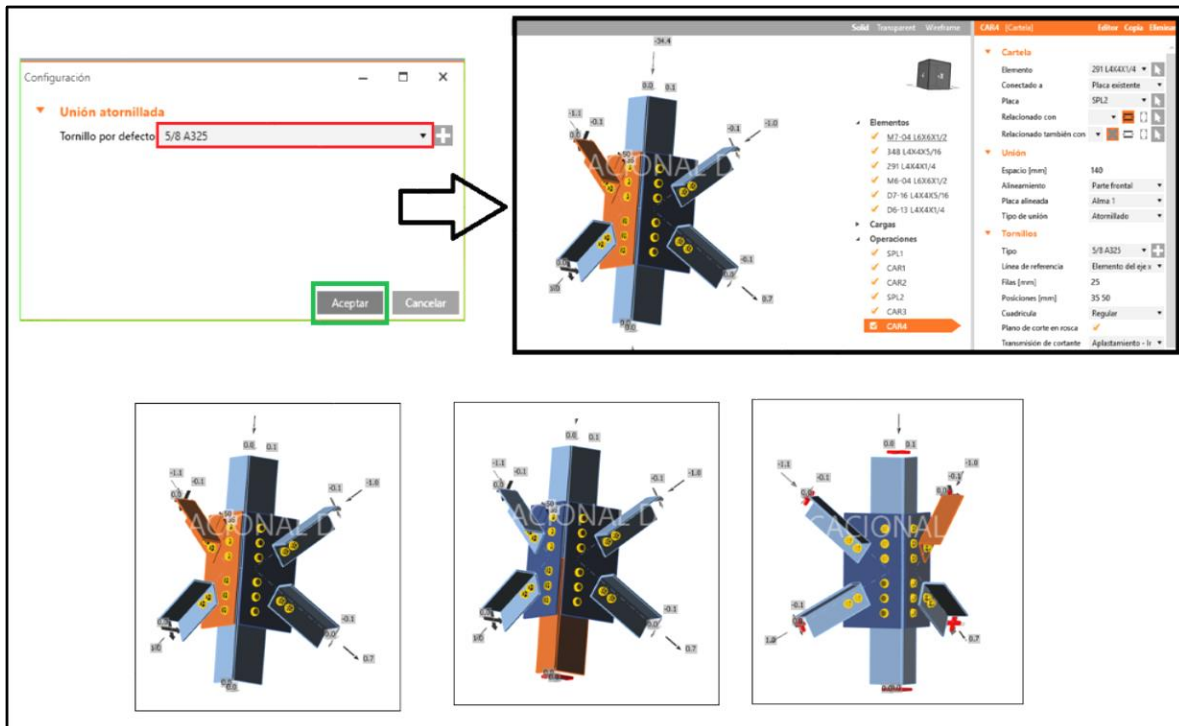
Figura 39. Guía de diseño (SAP2000)



Fuente: Propia (SAP2000)

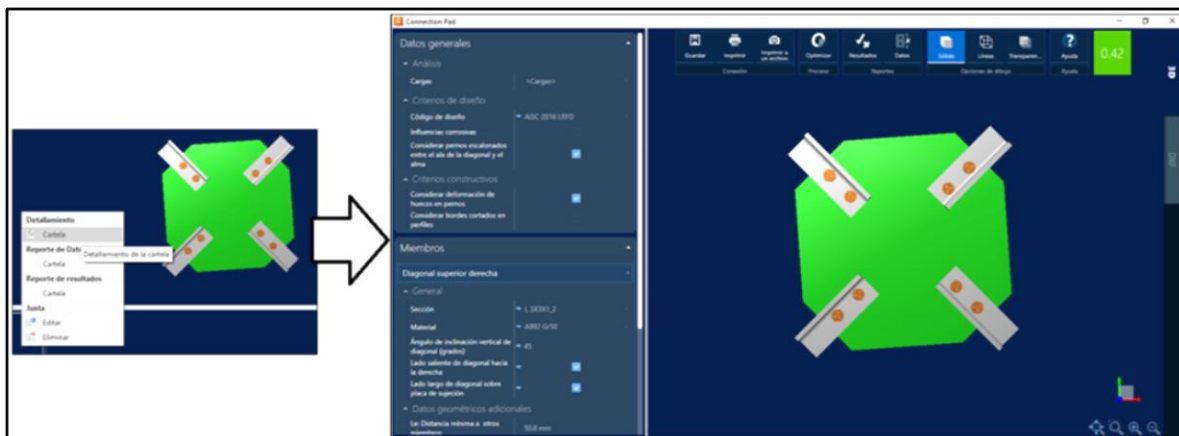


Figura 40. Guía de diseño (Idea Statica)



Fuente: Propia (Idea Statica)

Figura 41. Guía de diseño (Ram Connection)



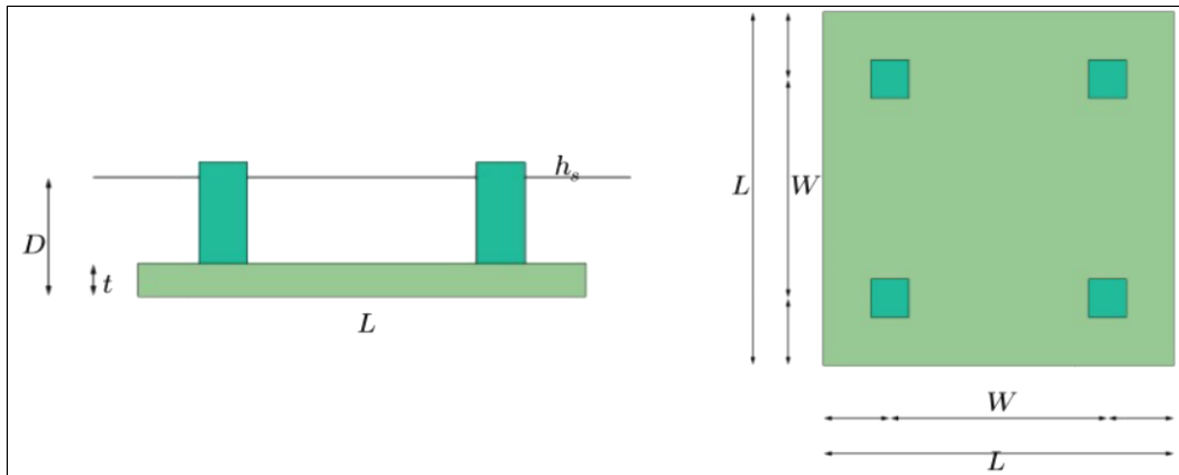
Fuente: Propia (Ram Connection)



9.4.1 Cimentación

Se trata de una cimentación de tipo aislada superficial con zapata, la cual está conformada por cuatro pedestales (Figura 42). El área de la zapata se determina para una capacidad portante de 10.00 ton/m², definido para una zapata cuadrada, localizada a una profundidad de 2.00m.

Figura 42. Esquema cimentación



Fuente: Elaboración propia

A manera de ejemplo, se realizan las verificaciones correspondientes de volcamiento, deslizamiento y capacidad portante para la cimentación correspondiente a la torre de 20m. El desarrollo completo de la cimentación, se encuentra en la sección 10 de los anexos A, B y C.

Ancho base de la torre:	$W := 3.0 \text{ m}$
Longitud de zapata:	$L := 6.5 \text{ m}$
Profundidad de cimentación:	$D := 2.0 \text{ m}$
Altura de zapata:	$t := 0.55 \text{ m}$
Ancho de pedestal:	$W_p := 0.60 \text{ m}$
Altura saliente de pedestal:	$h_s := 0.25 \text{ m}$
Area de zapata:	$A_z := L^2 = 42.25 \text{ m}^2$
Area de pedestal:	$A_p := W_p^2 = 0.36 \text{ m}^2$



9.4.1.1 Verificación por volcamiento

Peso de suelo sobre la zapata: $W_s := \gamma_s \cdot ((A_z \cdot (D - t)) - (A_p \cdot (D - t)) \cdot 4) = 887.62 \text{ kN}$

Peso de la zapata + pedestales: $W_c := \gamma_c \cdot ((A_z \cdot t) + (A_p \cdot (D - t + h_s)) \cdot 4) = 616.45 \text{ kN}$

Resistencia al volteo: $\phi_{STM} := 0.9 \cdot (W_s + W_c) \cdot (0.5 \cdot L) = 4399.4 \text{ kN} \cdot m$

Momento de volteo: $OTM := M + SH \cdot (D + h_s) = 1660.97 \text{ kN} \cdot m$

Relación demanda/capacidad: $\frac{OTM}{\phi_{STM}} = 0.38$ ✓

Factor de seguridad: $\frac{\phi_{STM}}{OTM} = 2.65$

9.4.1.2 Verificación por deslizamiento

Angulo de fricción interna: $\phi := 30^\circ$

Coefficiente de fricción: $\mu := \tan\left(\frac{2}{3} \phi\right) = 0.36$

Carga axial total: $C_a := 4 \cdot P = 968.66 \text{ kN}$

Fuerza estabilizadora: $F_{est} := (C_a + W_c) \cdot \mu = 576.93 \text{ kN}$

Fuerza desestabilizadora: $F_{des} := 222.39 \text{ kN}$

Relación demanda/capacidad: $\frac{F_{des}}{F_{est}} = 0.39$ ✓


Factor de seguridad: $\frac{F_{est}}{F_{des}} = 2.59$

9.4.1.3 Verificación por capacidad portante

Capacidad portante neta: $\sigma_n := \sigma + (\gamma_s \cdot D) = 128.07 \text{ kPa}$

Tensión máxima generada: $\sigma_{max} := 120 \text{ kPa}$

Relación demanda/capacidad: $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} = 0.94$ ✓

 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019 VERSIÓN 0
--	--	---

9.4.2 Cantidades y presupuesto

A continuación, se presenta el resumen de las cantidades de obra (Tabla 50, 52, 54) y presupuesto (Costos directos) de las torres (Tabla 51,53,55). La relación completa se encuentra en el anexo E.

Tabla 50. Cantidades Torre 20m

Nombre	Cantidad	Peso total (k (kg)	Superficie total (m ²)
HSSRound 1.900x0.120	28	135.20	6027
L2 1/2X2 1/2X1/4	32	365.90	1523
L2X2X1/8	104	278.90	23067
L3X3X1/2	40	1471.20	32059
L3X3X3/8	32	696.50	19814
L4X4X1/2	16	1839.80	39254
PL 10	109	649.40	17848
PL 19	4	95.50	2803
Tomillos	2816	122.40	
Total	3181	5654.80	156104

Fuente: Elaboración propia

Tabla 51. Presupuesto Torre 20m

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR TOTAL
1	CIMENTACIÓN	\$ 18 867 208.50
2	ESTRUCTURA	\$ 19 171 342.40
COSTO TOTAL DIRECTO		\$ 38 692 931.90

Fuente: Elaboración propia


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Tabla 52. Cantidades Torre 30m

Nombre	Cantidad	Total Peso (Kg)	Total Superficie (m2)
HSSRound 1.900x0.120			
	28	157.8	7.042
L2X2X1/8			
	168	664.9	55.026
L3X3X1/2			
	72	2 539.80	55.34
L3X3X1/4			
	24	439.8	18.381
L3X3X5/16			
	24	521.6	17.515
L5X5X1/2			
	8	1 162.80	24.501
L5X5X3/8			
	24	2 644.30	73.387
L5X5X5/8			
	16	1 599.60	27.302
PL 10			
	112	706.1	19.36
PL 19			
	24	812.5	11.724
Tornillos			
	3424	173.5	
Total			
	3924	11 422.80	309.579

Fuente: Elaboración propia

Tabla 53. Presupuesto Torre 30m

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR TOTAL
1	CIMENTACIÓN	\$ 43 008 874.02
2	ESTRUCTURA	\$ 35 587 473.60
COSTO TOTAL DIRECTO		\$ 79 963 895.62

Fuente: Elaboración propia


 UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.	GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS	FECHA: NOVIEMBRE DE 2019
		VERSIÓN 0

Tabla 54. Cantidades Torre 40m

Nombre	Cantidad	Total Peso (Kg)	Total Superficie (m2)
HSSRound 1.900x0.120			
	36	195	8.701
L2 1/2X2 1/2X3/16			
	4	97	5.392
L2X2X1/4			
	64	890.3	38.107
L3X3X1/4			
	16	335.4	14.019
L3X3X5/16			
	24	613.7	20.605
L5X5X3/8			
	8	24.384	
L5X5X5/8			
	8	1 428.60	24.384
L6X6X1/2			
	16	2 811	58.75
L6X6X5/8			
	16	3 470.80	58.75
PL 10			
	140	911.9	24.949
PL 19			
	28	1 096.70	15.753
Tornillos			
	4672	315.2	
Total			
	5317	17 866.20	479.872

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Presupuesto Torre 40m

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR TOTAL
1	CIMENTACIÓN	\$ 74 551 986.18
2	ESTRUCTURA	\$ 58 494 770.40
COSTO TOTAL DIRECTO		\$ 134 952 660.58

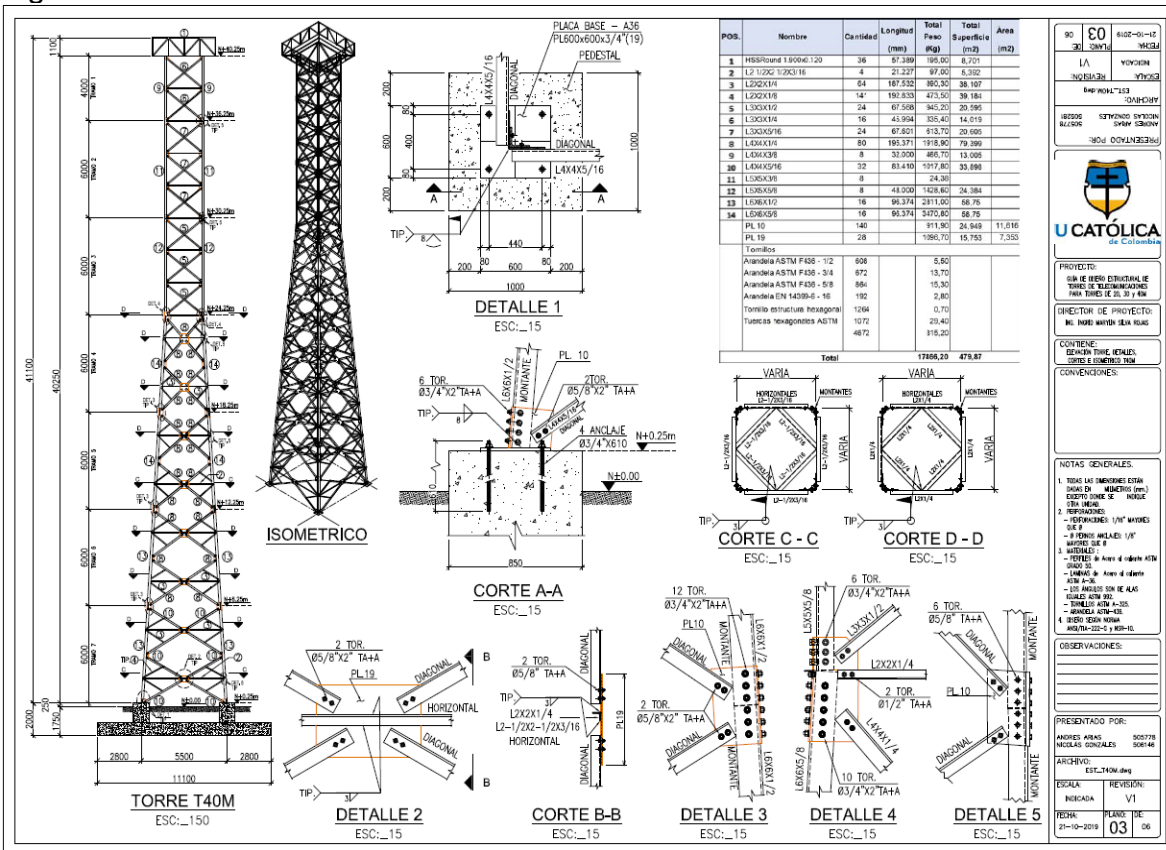
Fuente: Elaboración propia




9.4.3 Planos estructurales

Mediante la información de diseño recopilada, este proyecto presenta planos estructurales generales de las estructuras (Figura 43). La digitalización de los mismos, puede observarse en el anexo F.

Figura 43. Planos estructurales




Fuente: Elaboración propia

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

10. ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN Y DIVULGACIÓN

- Una primera divulgación es la comunicación interna, donde se transmiten los resultados entre las personas involucradas en el proceso de ejecución y aprobación del trabajo de grado (asesor, ejecutantes del proyecto y evaluadores).
- Posterior a la sustentación del proyecto de grado, este documento queda a disposición de la Universidad Católica de Colombia para su presentación y publicación dentro de su plataforma de consulta. La web es de uso público y se considera un medio indispensable para la transmisión de resultados.
- Se pretende dar a conocer la guía de diseño por medio de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI) donde se presentan a la comunidad los proyectos de ingeniería aplicada al contexto colombiano, de impacto social, político y/o económico, y el cual debe ser desarrollados por estudiantes de pregrado.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--


11. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que, la fuerza de viento afecta considerablemente las estructuras estudiadas. Es decir, como se trata de elementos altos, esbeltos y con poca masa, es muy poco el efecto que produce el sismo y por tanto, se puede deducir que las cargas de viento gobiernan el diseño. Así mismo, es válido afirmar que, en zonas de amenaza sísmica intermedia, no es necesario considerar los efectos sísmicos para las torres en Colombia, pues este efecto representa aproximadamente solo el 14% de influencia con respecto al viento para la región (5) más crítica del país.

De acuerdo con la evaluación realizada para las tres torres (20m, 30m, 40m), resulta importante mencionar que, el comportamiento de las torres se ve afectado por la altura de las mismas, lo cual representa un factor fundamental a considerar en el diseño. Por consiguiente, la altura produce un efecto directamente proporcional en los desplazamientos y periodos de vibración, lo que podría afectar la funcionalidad de estructuras de mayor altura. Por otra parte, la celosía estudiada y la geometría troncopiramidal propuesta, presentan buenos índices de confiabilidad, ya que, representan aproximadamente el 8% de desplazamientos, con respecto al límite permitido.


Conforme a los cálculos manuales realizados, se logró obtener una relación demanda/capacidad lo suficientemente confiable para los miembros y conexiones de las torres, es decir, la utilización del software SAP2000, RAM e IDEA STATICA CONNECTION, representa una opción viable de diseño, ya que el porcentaje de error máximo en las verificaciones realizadas es del 1%. De este modo, se logra una relación balanceada entre la reducción en tiempos de diseño y la seguridad de las estructuras calculadas.

La realización de esta guía de diseño, permite dar a conocer normativa vigente aplicable a este tipo de torres para el medio colombiano. Mediante los procedimientos descritos en este proyecto, se espera que la comunidad de ingenieros civiles pueda optimizar los tiempos de diseño, buscando principalmente desarrollar torres de telecomunicaciones seguras y reducir los colapsos de infraestructura indispensable para el país. De igual manera, los operadores de telefonía móvil, podrán estandarizar los diseños para diferentes necesidades de cobertura y estimar los costos directos de las estructuras, tomando como base el anexo E. Así mismo, la representación gráfica de los planos estructurales (Anexo F), permite evidenciar fácilmente la distribución de perfiles, conexiones y cimentación.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

12. RECOMENDACIONES

- Utilizar el presente estudio para el análisis y diseño estructural de torres de telecomunicaciones autosoportadas en el medio colombiano.
- Realizar estudios sobre la influencia del sismo en zonas de amenaza sísmica alta en Colombia.
- Desarrollar una normativa específica para el diseño de torres en celosía, ya que actualmente Colombia no cuenta con una.
- Realizar comparaciones de diseño a torres ubicadas en categorías topográficas 3 y 4.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

13. BIBLIOGRAFÍA

BONET, Llorenç. Gustave Alexandre Eiffel. Londres: TeNeues, 2003. p. 23.

INGEOMINAS, Ministerio de minas y energía. Plano mapa zonificación sísmica y valores Aa. Bogotá, 1999, p. 1.

AGUIRRE, María. Diseño de una torre autosoportada triangular de 60 metros portadora de antenas. Piura, 2017, p. 45-46.

AMIRI, G.G. and S.R. MASSAH, Seismic Response of 4-Legged Self-Supporting Telecommunication Towers. IJE Transactions B: Applications, 2007. Vol. 20 (No. 2): p. 107-125.

BETANCOURTH, VICTOR. 2013. APLICACIÓN NORMA TIA/EIA 222G PARA TORRES AUTOSOPORTADAS TIPO CELOSÍA DE TELECOMUNICACIONES EN GUATEMALA Y COMPARACIÓN CON NORMA TIA/EIA 222F. . Guatemala : s.n., 2013.


BOGOTÁ, Redacción. 2016. www.eltiempo.com. *Dos obreros muertos dejó el colapso de dos antenas en Bogotá.* [En línea] El Tiempo, 13 de abril de 2016. [Citado el: 12 de enero de 2019.] www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16562859.

CLEMENT, Gabriel Valencia. 2010. Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10. *Diseño básico de estructuras de acero de acuerdo con NSR-10.* Bogotá : Escuela Colombiana de ingeniería, 2010.

CRC (Comisión de Regulación de Comunicaciones). 2012. *Código de Buenas Prácticas para la infraestructura de redes de telecomunicaciones.* Bogotá D.C. : s.n., 2012.

EC3 (2007). Eurocode 3: “Design of steel structures - Part 3-1: Towers, masts and chimneys-Towers and masts” (EC).

EL TIEMPO. 2014. Ventarrón tumbó torre de comunicaciones en Cali. [En línea] EL TIEMPO, 19 de mayo de 2014. [Citado el: 12 de enero de 2019.] www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14010029.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

Fallas estructurales en torres reticuladas para telecomunicaciones. **PARNAS, Vivian Elena. 2008.** 2-3, La Habana, Cuba : Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, 2008, Vol. XXIX. pp. 57-63.

GERARDO E., Alvaro León. 2018. Frente comunitario propone nuevas guías para torres de comunicación. [En línea] El Nuevo Día, 11 de febrero de 2018. [Citado el: 12 de 01 de 2019.] www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/frentecomunitarioproponenuevasguiasparatorresdecomunicacion-2397734/.

GUTIÉRREZ MÉNDEZ, Karen. Análisis de una torre de telecomunicaciones atirantada ante los efectos del viento: relación del costo de la torre en función de la velocidad de viento. Ciudad de México, 2015.

HERNÁNDEZ, Sergio Alberto López. 2016. *Diseño de Torres de telecomunicación.* Ciudad de Mexico : s.n., 2016.

J.G.S. da Silva, et al. Structural assessment of current steel design models for transmission and telecommunication towers. Rio de Janeiro, 2005.


JACK C. McCormac, Stephen F. Csernak. 2013. *Diseño de Estructuras de Acero.* C. México : Alfaomega, 2013.

JARAMILLO, Viviana y SIACHICA, Yeison. **Guía de diseño para la construcción de cruces elevados en Colombia aplicado a poliductos. Bogotá, 2018, p. 10.**

LEÓN.Gloria Espinoza. 2007. *Ciclones tropicales en Colombia y tendencia de la frecuencia durante el último siglo.* Bogoá D. C. : Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales- IDEAM, 2007.

LÓPEZ, Isaac. La torre Eiffel: la construcción de un coloso. [En línea]. 2017. [Citada: 14 marzo 2019]. Disponible en internet: https://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/torre-eiffel-construccion-coloso_11345/22.

MARTÍN, P., Elena, V. B., LOREDO-SOUZA, A. M., & CAMAÑO, E. B. Experimental study of the effects of dish antennas on the wind loading of telecommunication towers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, p. 40–47.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

METI, Ashok and VIJAPUR, Vinayak. Seismic Analysis of Telecommunication Tower Using Viscous Damper. Karnataka, 2017, p. 2804 .

Ministerio del trabajo. 2012. *1409 DE 2012 - Reglamento de seguridad para proteccion contra caidas en el trabajo.* Bogotá D.C. : s.n., 2012.

PEÑA CASTAÑEDA, Camilo Andres. 2017. Todo lo que usted no sabe de las antenas de telecomunicaciones. [En línea] El Tiempo, 25 de Octubre de 2017. [Citado el: 10 de enero de 2019.] www.eltiempo.com/tecnosfera/novedades-tecnologia/labor-e-importancia-de-las-antenas-de-telecomunicacion-144818.


REINOSO, Edgar Eloy Rodriguez. 2015. *Análisis y diseño comparativo entre una torre autosoportada triangular de 40M de altura con montantes UV y una con montantes circulares.* Cuenca : Universidad de Cuenca., 2015.

RODRÍGUEZ, Patricia M. Evaluación de la vulnerabilidad estructural de torres autosoportadas de telecomunicaciones bajo cargas de viento y sismo. La Habana, 2012.

TESSARI, R. K., KROETZ, H. M., & BECK, A. T. Performance-based design of steel towers subject to wind action. *Engineering Structures*, 2017, p. 557.

TIA/EIA-222-G (2005). Structural standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures. Telecommunications Industry Association (TIA).

Zona cero. 2016. Torre de comunicaciones cae sobre taxi por las fuertes brisas en el norte de Barranquilla. [En línea] Zona cero, 13 de abril de 2016. [Citado el: 12 de enero de 2019.] zonacero.com/?q=generales/torre-de-comunicaciones-cae-sobre-taxi-por-las-fuertes-brisas-en-el-norte-de-barranquilla.

 <p>UNIVERSIDAD CATÓLICA de Colombia</p> <p>FACULTAD DE INGENIERÍA COORDINACIÓN TRABAJO DE GRADO.</p>	<p>GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE TORRES DE TELECOMUNICACIONES AUTOSOPORTADAS EN COLOMBIA PARA ALTURAS DE 20, 30 Y 40 METROS</p>	<p>FECHA: NOVIEMBRE DE 2019</p> <p>VERSIÓN 0</p>
---	---	--

14. RELACIÓN DE ANEXOS

ANEXO A. Memoria de cálculo Torre 20m

ANEXO B. Memoria de cálculo Torre 30m

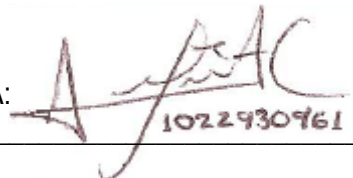
ANEXO C. Memoria de cálculo Torre 40m

ANEXO D. Guía de diseño estructural

ANEXO E. Cantidades de obra y presupuesto

ANEXO F. Planos estructurales

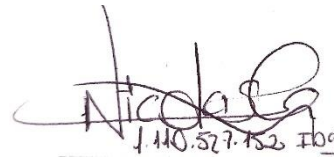
FIRMA:



1022930961

ANDRÉS FERNANDO ARIAS CANTOR
Código: 505778
afarias78@ucatolica.edu.co

FIRMA:



110.527.752 109

NICOLÁS ANDRÉS GONZÁLEZ ROMERO
Código: 506146
nagonzalez46@ucatolica.edu.co

FECHA: noviembre de 2019