



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO DE UNA TORRE TRIANGULAR
AUTOSOPORTADA DE 42 m. DE ALTURA EN EL CANTÓN MOCHA, PROVINCIA DE
TUNGURAHUA; UTILIZANDO LA NORMA ANSI/TIA 222-G-2005
Y ANSI/TIA 222-H-2017**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: Joel Eduardo Lincango Robayo

TUTOR: David Patricio Guerrero Cuasapaz

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Joel Eduardo Lincango Robayo con documento de identificación N°. 1720903390, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesian pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 10 de agosto del 2023

Atentamente. -



Joel Eduardo Lincango Robayo

1720903390

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Joel Eduardo Lincango Robayo con documento de identificación N°. 1720903390, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Análisis técnico comparativo de una Torre triangular autosoportada de 42 m. de altura en el Cantón Mocha, Provincia de Tungurahua; utilizando la Norma ANSI/TIA 222-G-2005 y ANSI/TIA 222-H-2017”, el cual ha sido desarrollado para optar el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de agosto del 2023

Atentamente. -



Joel Eduardo Lincango Robayo

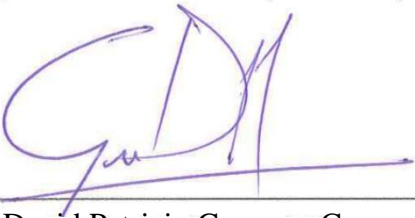
1720903390

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, David Patricio Guerrero Cuasapaz con documento de identificación N°. 1715215974, docente de la Universidad Politécnica Salesina; declaro que bajo mi tutoria fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO DE UNA TORRE TRIANGULAR AUTOSOPORTADA DE 42 M. DE ALTURA EN EL CANTÓN MOCHA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA; UTILIZANDO LA NORMA ANSI/TIA 222-G-2005 Y ANSI/TIA 222-H-2017, realizado por Joel Eduardo Lincango Robayo con documento de identificación N°.: 1720903390; obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 10 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. David Patricio Guerrero Cuasapaz, MSc.
1715215974

ANÁLISIS TÉCNICO COMPARATIVO DE UNA TORRE TRIANGULAR AUTOSOPORTADA DE 42 M. DE ALTURA EN EL CANTÓN MOCHA, PROVINCIA DE TUNGURAHUA; UTILIZANDO LA NORMA ANSI/TIA 222-G-2005 Y ANSI/TIA 222-H-2017

COMPARATIVE TECHNICAL ANALYSIS OF A SELF-SUPPORTED TRIANGULAR TOWER OF 42 M. HIGH IN THE MOCHA CANTON, PROVINCE OF TUNGURAHUA; USING THE STANDARD ANSI/TIA 222-G-2005 AND ANSI/TIA 222-H-2017

Joel Lincango - Robayo¹, Patricio Guerrero - Cuasapaz²

Resumen

A través de los años, las empresas de telecomunicaciones en Ecuador han experimentado un crecimiento vertiginoso; esto se debe a la creciente demanda de servicios de internet y telefonía en áreas donde la cobertura es ilimitada. Para satisfacer estas necesidades, las empresas están comprometidas en construir los mejores diseños de torres autosostenibles. Por tanto, este artículo académico tiene como objetivo analizar el comportamiento real de esta estructura; mediante un análisis técnico comparativo de una torre autosoportada de 42 m. de altura, utilizando la norma ANSI TIA 222-G y su versión actualizada ANSI TIA 222-H; para lo cual se generaron dos modelaciones, una por cada normativa. Esto permitió determinar aspectos de la estructura como: capacidad de carga, estabilidad estructural y resistencia a las fuerzas ambientales como son sismo y viento; este último factor es significativo, ya que es la principal causa de falla de este tipo de estructuras. Es importante destacar que se mantuvo la misma geometría, configuración y material en ambas estructuras para realizar una comparación precisa. Los resultados obtenidos indicaron que el criterio de la Norma ANSI TIA 222-H, es óptimo para el diseño y construcción de la torre estudiada; este criterio permite un consumo mínimo de material

Abstract

Over the years, telecommunication companies in Ecuador have experienced dizzying growth; this is due to the increasing demand for internet and telephony services in areas where coverage is unlimited. To meet these needs, companies are committed to building the best self-sustainable tower designs. Therefore, the objective of this academic paper is to analyze the real behavior of this structure; through a comparative technical analysis of a 42 m. high self-supported tower, using the ANSI TIA 222-G standard and its updated version ANSI TIA 222-H; for which two modeling's were generated, one for each standard. This allowed determining aspects of the structure such as: load capacity, structural stability and resistance to environmental forces such as seismic and wind; this last factor is significant, since it is the main cause of failure of this type of structures. It is important to note that the same geometry, configuration and material were maintained in both structures in order to make an accurate comparison. The results obtained indicated that the ANSI TIA 222-H criterion is optimal for the design and construction of the tower studied; this criterion allows a minimum consumption of material and a greater resistance to the acting loads; furthermore, the results revealed that the ANSI TIA 222-H

¹ Estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur – Quito – Ecuador.

² Docente – Universidad Politécnica Salesiana – Campus Sur – Quito – Ecuador.

Autor para correspondencia: jlincangor@est.ups.edu.ec¹, dguerrero@ups.edu.ec²

y una mayor resistencia a las cargas actuantes; además los resultados revelaron que la Norma ANSI TIA 222-H reduce más del 50 % las fuerzas, deflexiones, reacciones y momentos en comparación con la Norma ANSI TIA 222-G.

Palabras Clave: Análisis técnico comparativo, fuerza de viento, norma ANSI TIA, telecomunicaciones, torre autoportada, torre triangular.

Standard reduces forces, deflections, reactions and moments by more than 50% compared to the ANSI TIA 222-G Standard.

Keywords: Comparative technical analysis, wind force, ANSI TIA standard, telecommunications, self-supported tower, triangular tower.

1. Introducción

Las torres autoportadas han desempeñado un papel fundamental en diversas industrias a lo largo de la historia. Su desarrollo y evolución han sido impulsados por la necesidad de proporcionar soporte estructural a una variedad de aplicaciones, como telecomunicaciones, energía, radio y televisión, entre otras. A continuación, se presenta una breve historia de las torres autoportadas.

A finales del siglo XIX, surgieron las primeras estructuras utilizadas como torres para soportar antenas y cables, estas primeras torres eran principalmente de acero y se construían en forma de mástiles o postes. Durante el siglo XX, la industria de las torres autoportadas experimentó un avance significativo; se desarrollaron diseños más sofisticados y se utilizaron materiales más resistentes, como el acero estructural; por lo que las torres autoportadas se hicieron más altas y capaces de soportar mayores cargas. En la Figura 1 se muestra una de las torres de telecomunicaciones más antiguas ubicada en la ciudad de Estocolmo en Suecia.



Figura 1. Torre de telecomunicaciones en la ciudad de Estocolmo, Suecia [1].

En 1990, con el advenimiento de la telefonía móvil y la expansión de las redes inalámbricas, se requirieron torres autoportadas específicamente diseñadas para soportar antenas de telecomunicaciones; por lo que en la actualidad las torres autoportadas siguen siendo esenciales en la

infraestructura de comunicaciones y otras industrias. Actualmente se utilizan diversos materiales, como acero galvanizado o aluminio, para construir torres ligeras pero resistentes. Además, se han incorporado avances tecnológicos en el diseño y la construcción de torres, como la simulación con paquetes computacionales.

A continuación, se presenta con más detalle acerca de este tipo de estructura.

1.1. Torre Autoportada

Una torre autoportada es una estructura vertical independiente diseñada para soportar cargas, como antenas y equipos de comunicación; sin requerir anclajes o soportes externos [2]. Estas torres son capaces de mantenerse en pie por sí mismas, gracias a su diseño y construcción esbelta; cumpliendo con estándares de seguridad específicos. Las torres autoportadas de telecomunicaciones son estructuras tipo celosías, flexibles y de bajo amortiguamiento, lo que las hace sensibles ante las acciones del viento y sismo [3].

Dependiendo de la altura y el propósito de la torre, pueden tener diferentes configuraciones, como torres triangulares o torres cuadradas. En la Figura 2 se presenta un modelo de torre triangular autoportada (A) y un modelo de torre cuadrada autoportada (B).

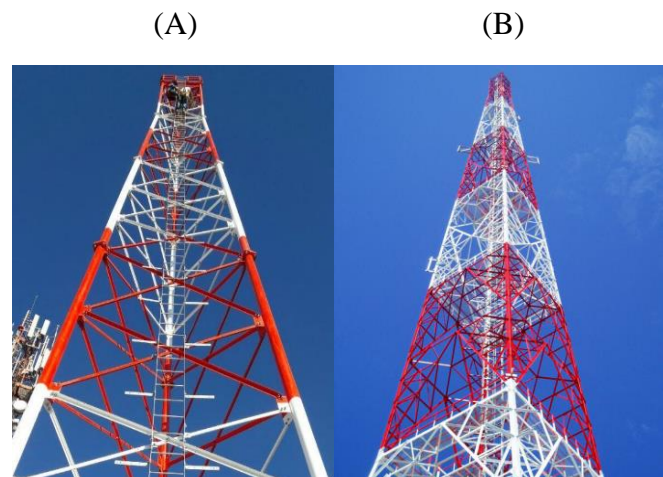


Figura 2. Torre triangular autoportada (A) y Torre cuadrada autoportada (B) [4].

2. Materiales y Métodos

Para el presente análisis técnico comparativo se presentó una estructura tipo torre triangular autoportada de 42 m. de altura; donde se consideró una configuración de 7 tramos; cada tramo de 6 m. de altura y diseñado con material acero A-36.

Los elementos principales de toda la estructura son los siguientes: 3 montantes (piernas de la torre) con canales abiertos tipo UV, ángulos horizontales y diagonales de distintos tamaños. En la Figura 3 se muestra los componentes la estructura en estudio.

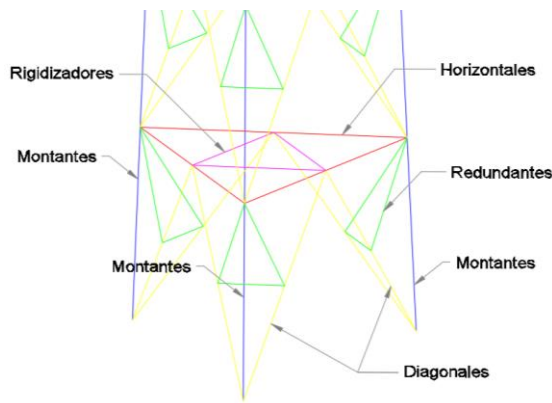


Figura 3. Componentes de la estructura (partes) de la torre autoportada.

Desde el primer tramo al tercer tramo se colocaron ángulos tipo redundantes; de la misma manera desde el primer tramo hasta el cuarto tramo se ubicaron ángulos tipo rigidizadores [5].

Inicialmente se realizó un prediseño utilizando diferentes perfiles; luego con la asistencia de un paquete computacional, se ajustó el diseño de manera que cumpliera con todas las cargas y

esfuerzos permitidos. A continuación, se muestra en la Tabla 1 las características técnicas definitivas de la torre en estudio.

A su vez en la Figura 4 se muestra la configuración general de la estructura.

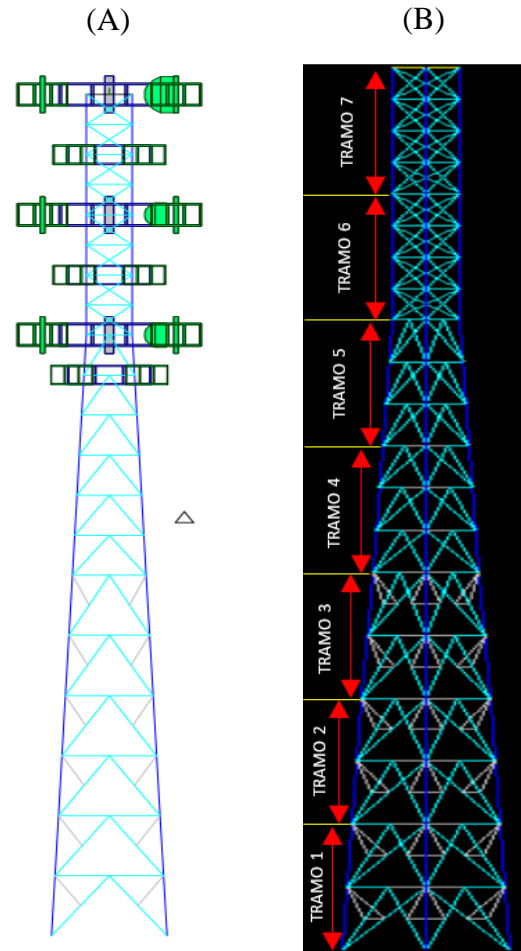



Figura 4. Configuración general de la estructura tipo torre autoportada en RISA TOWER (A) y torre autoportada en SAP 2000 (B).

Tabla 1. Características técnicas definitivas de la torre autoportada.

Sección	Tipo de material	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6	Tramo 7
Montantes		UV 160x100x8mm	UV 140x100x8mm		UV 120x100x8mm		UV 100x80x8mm	UV 80x80x6mm
Diagonales		L 75x75x6mm		L 65x65x6mm			L 60x60x5mm	
Horizontales		L 75x75x6mm		L 65x65x6mm			L 50x50x6mm	L 50x50x4mm
Redundantes		L 50x50x4mm			N/A			
Rigidizadores		L 50x50x4mm		L 40x40x4mm		N/A		
Altura		6 m.	12 m.	18 m.	24 m.	30 m.	36 m.	42 m.

2.1. Cargas actuantes en la Torre

Para un modelado real, la estructura debe tener en consideración todas las cargas que afectan el desempeño de la misma; para lo cual se consideró cuatro cargas principales, así como sus respectivas combinaciones de cargas según la norma ANSI TIA 222-G [6] y la norma ANSI TIA 222-H [7].

2.1.1. Cargas muertas o peso propio

Son cargas que actúan durante toda la vida de la estructura; la principal carga muerta es el peso propio de la estructura y además se consideran cargas por concepto de elementos adicionales como son de escaleras, plataformas, equipos y antenas.

2.1.2. Cargas vivas

Se considera como cargas vivas al personal de mantenimiento que opera en estas estructuras, ya que realizan tareas de reparación y mantenimiento periódicamente. Para tener en cuenta estas cargas significativas, se incluyó en el modelado a tres personas de mantenimiento, con un peso aproximado de 100 kg cada una [8].

2.1.3. Cargas de sismo

Al momento de diseñar una torre autosoportada, la carga sísmica es un factor fundamental a considerar. Esta carga tiene en cuenta la intensidad y frecuencia de los movimientos sísmicos esperados en la ubicación de la torre. En el presente estudio, se utilizó el análisis modal espectral basado en la NEC Peligro Sísmico [9, p. 86] para determinar dicha carga. Mediante la Ecuación 1, se obtuvo el cortante basal de diseño (V), en función de la carga sísmica reactiva y tiene un valor de 0,33 W .

Es importante resaltar que la torre analizada se encuentra ubicada en el cantón Mocha, provincia de Tungurahua.

$$V = \frac{\eta * z * F_a * I}{R} * W \quad (1)$$

A continuación, en la Tabla 2 se muestra los factores para la determinación del cortante basal.

Tabla 2. Factores y valores para la determinación del cortante basal de diseño (V).

Descripción	Símbolo	Valor
Lugar		Cantón Mocha
Tipo de suelo		C
Aceleración espectral	$\eta =$	2,48
Aceleración máxima	$z =$	0,4
Coefficiente de suelo espectro elástico de aceleraciones	$F_a =$	1,0
Espectro de respuesta elástico	$S_a =$	0,992
Coefficiente de importancia	$I =$	1,0
Factor de reducción	$R =$	3
Cortante Basal	$V =$	0,33 W

2.1.4. Cargas de viento

Las cargas de viento son las cargas con mayor influencia sobre el diseño de las torres, ya que dependen de la velocidad del viento, ubicación, altura, área y posición de la estructura. Por lo que para la presente investigación se aplicó una velocidad de viento recomendada por las normas en estudio.

Estas normas proporcionan métodos y criterios de cargas para dimensionar una estructura segura y estable; a su vez se consideró que la fuerza horizontal (F), que utilizamos en cada sección de la estructura sea según los criterios de la norma ANSI TIA 222-G [6] y la norma ANSI TIA 222-H [7].

2.2. Determinación de la fuerza de viento según la norma ANSI TIA 222-G

Para la determinación de la fuerza de viento según la norma ANSI TIA 222-G [6], se utilizó los siguientes datos de diseño que se muestran a continuación en la Tabla 3:

Tabla 3. Datos de diseño

Estructura	Altura m	Base inferior m	Base superior m	Velocidad de diseño km/h	Velocidad de diseño m/s
Torre triangular	42	4,2	1,7	100	27,78

2.2.1. Fuerza horizontal de viento

La fuerza de viento de diseño (F_{st}), se determinó con la siguiente Ecuación 2:

$$F_{st} = q_z * G_h * (EPA)_S \quad (2)$$

Donde:

q_z = Presión dinámica [N/m^2]

G_h = Factor de ráfaga

$(EPA)_S$ = Área efectiva proyectada de la estructura [m^2]

2.2.2. Presión dinámica

La presión dinámica es un factor importante en las cargas de viento que actúan sobre las torres autoportadas, ya que tiene en cuenta el efecto del movimiento del viento y su interacción con la estructura. Para calcular la presión dinámica, se utilizó la Ecuación 3, la cual se basa en una expresión que incluye coeficientes de presión:

$$q_z = 0,613 * K_z * K_{zt} * K_d * V^2 * I \quad (3)$$

Donde:

K_z = Coeficiente de presión dinámica

K_{zt} = Factor topográfico

K_d = Factor de probabilidad de la dirección del viento

V = Velocidad de diseño en [m/s]

I = Factor de importancia

En la Ecuación 4, el coeficiente de presión dinámica representa la relación entre la presión dinámica del viento y la presión estática; esto puede variar según la forma de la torre, la altura y la velocidad del viento.

$$K_z = 2,01 * \left(\frac{z}{z_g}\right)^{\frac{2}{\alpha}} \quad (4)$$

Donde:

z = Altura sobre el nivel del terreno [m]

z_g = Coeficiente según la exposición [m]

α = Coeficiente alfa se seleccionó de acuerdo a Tabla 4

Condición:

$$K_{z \min} \leq K_z \leq 2,01$$

Tabla 4. Coeficientes en función de la categoría de exposición.

Categoría de exposición	z_g m	α	$K_{z \min}$
B	366	7,0	0,70
C	274	9,5	0,85
D	213	11,5	1,03

La estructura se debe asignar según las categorías topográficas mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías topográficas.

Categoría 1	Sin cambios abruptos en la topografía general, terreno plano y ondulado, no se requerirá consideración de aceleración del viento.
Categoría 2	Estructuras ubicadas en o cerca de la cresta de una inclinación. Se considerará que la aceleración del viento se produce en todas las direcciones. Las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una inclinación u horizontalmente más allá de 8 veces la altura del escarpe, podrán ser consideradas como categoría topográfica 1.
Categoría 3	Estructuras ubicadas en la mitad superior de una colina. Se considerará que la aceleración del viento se produce en todas las direcciones. Se permitirá que las estructuras ubicadas verticalmente en la mitad inferior de una colina se consideren como categoría topográfica 1.
Categoría 4	
Categoría 5	Criterios de aceleración del viento basados en una investigación específica del sitio.

Debido a que el terreno no presenta ningún cambio brusco y es un terreno plano [10], el factor topográfico $K_{zt} = 1$; según la categoría 1 de la norma ANSI TIA 222-G [6].

Mientras que para las demás categorías el factor topográfico K_{zt} , se determina mediante la Ecuación 5 y la Tabla 6.

$$K_{zt} = \left(1 + \frac{K_e * K_t}{K_h}\right)^2 \quad (5)$$

Donde:

K_e = Factor de elevación del suelo

K_t = Coeficiente de topografía

K_h = Factor de reducción de altura de la torre

Tabla 6. Constantes en función de la categoría topográfica.

Categoría topográfica	K_e	K_t	f
2	0,90	0,43	1,25
3	1,00	0,53	2,00
4	1,10	0,72	1,50

La Ecuación 6; el factor de reducción de altura (K_h), se obtiene de la siguiente manera:

$$K_h = e^{\left(\frac{f \cdot z}{H}\right)} \quad (6)$$

Donde:

e = Base de logaritmo natural

f = Factor de atenuación

z = Altura sobre el nivel del terreno

H = Altura de la cresta sobre el terreno

El factor de probabilidad de la dirección del viento (K_d), se estableció mediante la Tabla 7 según el tipo de estructura [11].

Tabla 7. Factor de probabilidad (K_d).

Tipo de estructura	Factor de probabilidad de la dirección del viento K_d
Estructuras de celosía con secciones triangulares, cuadradas o rectangulares incluyendo los accesorios.	0,85
Estructuras tubulares tipo monoposte, de celosía con secciones transversales que no sean triangulares, cuadradas ni rectangulares diseño por resistencia de los accesorios.	0,95

Para la presente investigación, se utilizó una velocidad de diseño máxima de 100 km/h, lo que equivale a 27,78 m/s. Esta velocidad se encuentra en conformidad con la normativa en estudio.

El factor de importancia (I) se determinó mediante la Tabla 8; según la clase de estructura, fenómenos ambientales y geológicos [12].

Tabla 8. Factor de importancia (I).

Clase de estructura	Carga de viento sin hielo glaseado	Carga de viento con hielo glaseado	Sismo
I	0,87	N/A	N/A
II	1	1	1
III	1,15	1	1,5

2.2.3. Factor de ráfaga

El factor de ráfaga es un coeficiente que se aplica a la presión estática del viento para considerar las fluctuaciones de presión causadas por las ráfagas de viento, este factor amplifica la presión estática y se calcula en diferentes áreas de la torre; según la norma ANSI TIA 222-G [6] se determinó mediante la Ecuación 7.

$$G_h = 0,85 + 0,15 * \left(\frac{h}{45,7} - 3,0\right) \quad (7)$$

Donde:

h = Altura de la estructura [m]

Condición:

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

2.2.4. Área efectiva proyectada de la estructura

El área proyectada efectiva (EPA)_S, de los componentes estructurales de una sección se determinó de acuerdo con la Ecuación 8.

$$(EPA)_S = C_f * [D_f * \sum A_f + D_r * \sum (A_r * R_r)] \quad (8)$$

Donde:

C_f = Coeficiente de fuerza

D_f = Factor de dirección de viento elementos planos

D_r = Factor de dirección de viento elementos circulares

A_f = Área proyectada de elementos planos

A_r = Área proyectada de elementos circulares

R_r = Factor de reducción de elementos circulares

En la Ecuación 9, el coeficiente de fuerza se determinó de la siguiente manera:

$$C_f = 3,4\varepsilon^2 - 4,7\varepsilon + 3,4 \quad (9)$$

Donde:

ε = Relación de solidez; se obtiene desde la Ecuación 10

$$\varepsilon = \left(\frac{A_r + A_f}{A_g} \right) \quad (10)$$

Donde:

A_g = Área bruta de una cara solida

El factor de dirección del viento para elementos planos y circulares (D_f) y (D_r), respectivamente; se determinó utilizando la Tabla 9; teniendo en cuenta el tipo de torre, ya sea cuadrada o triangular.

Tabla 9. Factores de la dirección del viento.

Sección transversal de la torre	Triangular		
	Normal	60°	90°
Dirección del viento			
D_f	1	0,8	0,85
D_r	1	1	1

El área proyectada de los elementos planos (A_f) y circulares (A_r), se refiere al cálculo del área frontal expuesta al viento. Para ello, se utilizó métodos de triangulación o trigonometría, tal como se muestra en la siguiente Figura 5.

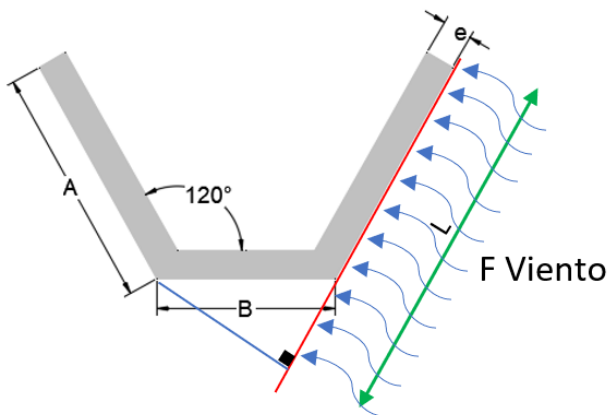


Figura 5. Fuerza de viento en el área proyectada

El factor de reducción de los elementos circulares (R_r), es la disminución de la capacidad de carga debido a la presencia de perforaciones, agujeros o aberturas. Para la determinación del factor depende de la condición que incluya hielo o no; para lo cual se presentan las Ecuaciones 11 y 12, según corresponda:

Condición que incluya el hielo.

$$R_r = 0,57 - 0,14\varepsilon + 0,86\varepsilon^2 - 0,24\varepsilon^3 \quad (11)$$

Condición sin hielo.

$$R_r = 0,36 + 0,26\varepsilon + 0,97\varepsilon^2 - 0,63\varepsilon^3 \quad (12)$$

2.2.5. Determinación de la fuerza de viento sobre los accesorios según la norma ANSI TIA 222-G

La fuerza de viento de diseño sobre los accesorios (F_a), (ya se han puntuales o lineales, pero excluyendo las antenas de microondas); se deberá determinar de acuerdo a la siguiente Ecuación 13.

$$F_a = q_z * G_h * (EPA)_a \quad (13)$$

Donde:

q_z = Presión dinámica [N/m^2]

G_h = Factor de ráfaga

$(EPA)_a$ = Área efectiva proyectada del accesorio

La fuerza de viento de diseño (F_a), se deberá aplicar en el baricentro del área efectiva proyectada del accesorio (Antenas) en la dirección del viento.

La presión dinámica (q_z) se determinó según el ítem 2.2.2 del presente artículo. Del mismo modo el factor de ráfaga (G_h) se calculó según el ítem 2.2.3.

Mientras que el área proyectada efectiva $(EPA)_a$, de los accesorios se determinó de acuerdo con la siguiente Ecuación 14.

$$(EPA)_a = \sum(C_a * A_A) \quad (14)$$

Donde:

C_a = Coeficiente de fuerza que se interpola de acuerdo a la Tabla 10 en función del tipo de elemento; plano o circular

A_A = Área proyectada de un componente del accesorio

Tabla 10. Coeficientes de fuerza (C_a) para accesorios.

Tipo de elemento	Relación aspecto $\leq 2,5$	Relación aspecto $=7$	Relación aspecto ≥ 25
	C_a	C_a	C_a
Plano	1,20	1,40	2,00
Circular	0,70	0,80	1,20
	0,5	0,6	0,6

2.2.6. Determinación de la fuerza de viento sobre las antenas microondas según la norma ANSI TIA 222-G

Los datos de la fuerza de viento para las antenas microondas (incluyendo las antenas de rejilla), se describen en el sistema de coordenadas de la misma; cuyo origen coincide con el vértice del reflector. Se consideran tres componentes de fuerza: la fuerza axial (F_{am}), que actúa a lo largo del eje de la antena, la fuerza lateral (F_{sm}), actúa de forma perpendicular al eje de la antena en el plano; y el momento torsor (M_m), que actúa en el plano que contiene las fuerzas (F_{am}) y (F_{sm}); tal como se muestra en la Figura 6.

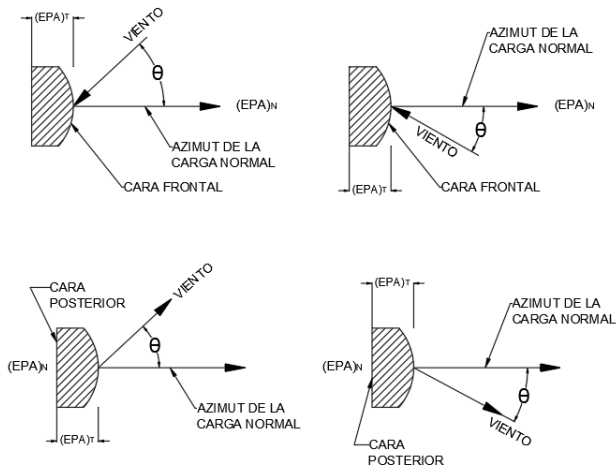


Figura 6. Fuerza de viento en antenas [13]

Para determinar la fuerza que actúa en las antenas microondas, se empleó la siguiente Ecuación 15:

$$F_{am} = q_z * G_h * C_A * A \quad (15)$$

Donde:

q_z = Presión dinámica [N/m^2]

G_h = Factor de ráfaga

C_A = Coeficiente de fuerza en función del ángulo del viento

A = Área de apertura exterior de la antena microondas

La presión dinámica (q_z) se determinó según el ítem 2.2.2 del presente artículo. Del mismo modo, el factor de ráfaga (G_h) se calculó según el ítem 2.2.3.

Para el coeficiente de fuerza (C_A), se seleccionó en función del tipo de antena microondas y ángulo del viento. Existen ábacos disponibles en la norma ANSI TIA 222-G [6], [14, pp. 41–43], donde se puede obtener el valor del coeficiente de fuerza (C_A).

2.3. Determinación de la fuerza de viento según la norma ANSI TIA 222-H

Para calcular la fuerza de viento según la norma ANSI TIA 222-H [7], el proceso es similar al de la norma ANSI TIA 222-G [6]; sin embargo, en la versión actualizada del año 2017, se introdujeron nuevos coeficientes que afectan al cálculo de las fuerzas de viento. Esta actualización mejoró la precisión de los criterios de diseño y análisis de las estructuras tipo torres, así como la interacción con el análisis suelo-estructura.

La fuerza del viento de diseño (F_{st}), se determinó siguiendo el mismo procedimiento del ítem 2.2.1 del presente artículo, utilizando la Ecuación 2. Del mismo modo la presión dinámica según la norma ANSI TIA 222-H [7], se calculó utilizando la Ecuaciones 16 de la siguiente manera:

$$q_z = 0,613 * K_z * K_{zt} * K_s * K_e * K_d * V^2 \quad (16)$$

Donde:

K_z = Coeficiente de presión dinámica

- K_{zt} = Factor topográfico
- K_s = Factor de aceleración del viento en la terraza
- K_e = Factor de elevación del suelo
- K_d = Factor de probabilidad de la dirección del viento
- V = Velocidad de diseño en [m/s]

Los coeficientes (K_z), (K_{zt}), y (K_d); se calcularon del mismo modo que la sección 2.2.2 del presente documento.

El factor de aceleración del viento en la terraza $K_s = 1$, ya que la estructura estudiada inicia desde el nivel de terreno natural (suelo) y no en terraza o azotea.

El factor de elevación del suelo (K_e), se determinó con la siguiente Ecuación 17.

$$K_e = e^{-0.000119 \cdot Z_s} \quad (17)$$

Donde:

Z_s = Elevación media de la estructura sobre el nivel del mar [msnm]

A su vez el factor de elevación del suelo (Z_s) se pudo determinar mediante la Tabla 11.

Tabla 11. Factor de elevación del suelo [msnm].

Elevación del suelo		Factor de elevación del suelo
Pies (ft)	Metros (m)	
< 0	< 0	1
0	0	1
1000	305	0,96
2000	610	0,93
3000	914	0,9
4000	1219	0,86
5000	1524	0,83
6000	1829	0,8
> 6000	> 1829	Interpolar

El factor de ráfaga y el área efectiva proyectada de la estructura se calculó según los ítems 2.2.3 y 2.2.4 respectivamente; como se manifiesta en el presente artículo.

2.3.1. Determinación de la fuerza de viento sobre los accesorios según la norma ANSI TIA 222-H

Para el cálculo de la fuerza de los accesorios (antenas), de acuerdo con la norma ANSI TIA 222-H [7], se siguieron los procedimientos descritos en la sección 2.2.5 y se utilizaron las ecuaciones 13 y 14 del presente artículo. Asimismo, la determinación de la fuerza de viento en las antenas microondas se realizó según el ítem 2.2.6.

Es importante destacar que la norma ANSI TIA 222-H [7] utiliza coeficientes importantes, como es el factor de elevación (K_e); este factor no se consideró en la versión anterior de la norma ANSI TIA 222-G [6], realizada en el año 2005. Debido a esta mejora, los resultados obtenidos en la versión actualizada son significativamente más precisos.

Por otro lado, la obtención de las fuerzas del viento hacia la estructura se basó en las ecuaciones mencionadas en las secciones 2.2 y 2.3.

3. Resultados y Discusión

Con el propósito de llevar a cabo un análisis técnico comparativo entre las dos normas mencionadas en la sección anterior, se obtuvieron los resultados de los principales parámetros, tales como la fuerza de viento aplicada a la estructura, las deflexiones, reacciones y momentos máximos. Además, se realizó un análisis demanda-capacidad de la estructura.

A continuación, se exhibirá cada uno de ellos.

3.1. Fuerza de viento (F_{st}) aplicada a la estructura

Para la determinación de la fuerza de viento y comparación, se debe seguir los parámetros establecidos por la norma ANSI TIA 222-G [6] y la norma ANSI TIA 222-H [7]; como se detalla en la sección 2.2. y 2.3 del presente artículo. En dicho apartado, indica que la altura total de la estructura debe dividirse en secciones iguales; siendo recomendable tomar distancias de 6 m. En nuestro diseño, se ha dividido en 7 tramos, y cada tramo se ha realizado conforme a la Tabla 12 que se presenta a continuación.

Tabla 12. Determinación de la fuerza de viento según norma ANSI TIA 222-G [6], por tramos.

Tramo 1												
<i>L</i>	<i>L</i> <i>Proyectada</i> (Cara del elemento)	<i>z</i>	<i>K_h</i>	<i>K_{zt}</i>	<i>K_z</i>	<i>q_z</i>	<i>A_f</i>	<i>(EPA)_s</i>	<i>F</i>	<i>F</i>	<i>q_f</i>	<i>M_p</i>
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>				<i>N/m²</i>	<i>m²</i>	<i>m²</i>	<i>N</i>	<i>kgf</i>	<i>kgf/m</i>	<i>kgf*m</i>
3,66	0,075	1,5	1,06	1	0,85	393,00	0,275	0,721	240,72	24,54	6,70	36,808
3,66	0,075	1,5	1,06	1	0,85	393,00	0,275	0,721	240,72	24,54	6,70	36,808
1,76	0,05	2,25	1,08	1	0,85	393,00	0,088	0,231	77,17	7,87	4,47	17,700
1,76	0,05	2,25	1,08	1	0,85	393,00	0,088	0,231	77,17	7,87	4,47	17,700
6,01	0,21	3	1,11	1	0,85	393,00	1,262	3,313	1.106,80	112,82	18,77	338,472
6,01	0,21	3	1,11	1	0,85	393,00	1,262	3,313	1.106,80	112,82	18,77	338,472
3,95	0,075	3	1,11	1	0,85	393,00	0,296	0,778	259,80	26,48	6,70	79,449
3,59	0,075	4,5	1,17	1	0,85	393,00	0,269	0,707	236,12	24,07	6,70	108,312
3,59	0,075	4,5	1,17	1	0,85	393,00	0,269	0,707	236,12	24,07	6,70	108,312
1,73	0,05	5,25	1,21	1	0,87	404,18	0,087	0,227	78,01	7,95	4,60	41,751
1,73	0,05	5,25	1,21	1	0,87	404,18	0,087	0,227	78,01	7,95	4,60	41,751
3,7	0,075	6	1,24	1	0,90	415,70	0,278	0,728	257,41	26,24	7,09	157,438
Σ							4,534	11,904		407,224		1.322,970

En la Tabla 12 muestra la longitud de cada elemento que conforma el tramo; así como la longitud proyectada, que representa la cara del elemento expuesta a la fuerza de viento y el valor “z” para indicar la distancia en altura desde el suelo hasta el centro de cada elemento, tal como se ilustra en la Figura 7.

Una vez obtenido todos los tramos, fue posible resumir las longitudes de toda la estructura; junto con su configuración y dimensiones correspondientes, como se muestra en la Tabla 13 [15].

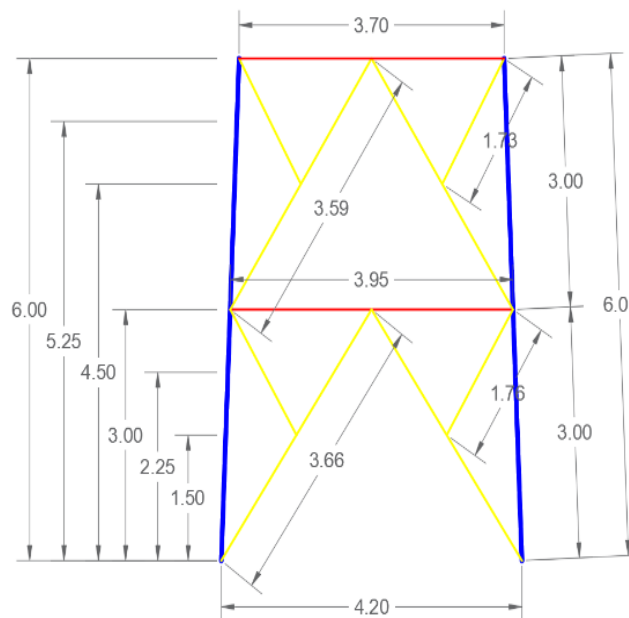


Figura 7. Longitudes del tramo 1

Tabla 13. Configuración y dimensiones de la estructura tipo torre autoportada

Elevación sección	Montantes		Diagonales		Horizontales		Área plana A_f	Área redonda A_r
	Cara del elemento	Longitud	Cara del elemento	Longitud	Cara del elemento	Longitud		
<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>mm</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ²	<i>m</i> ²
42	120	12,00	60	18,16	50	6,80	2,870	0,00
36	140	12,00	60	18,16	50	6,80	3,110	0,00
30	170	12,02	65	13,46	65	5,60	3,282	0,00
24	170	12,02	65	14,20	65	7,10	3,428	0,00
18	190	12,02	65	19,13	50	6,54	3,854	0,00
12	190	12,02	75	20,63	50	6,74	4,168	0,00
6	210	12,02	75	22,15	50	6,98	4,534	0,00

La Tabla 14 presenta un resumen de los principales parámetros de la estructura por tramos, utilizados para la determinación de la fuerza de viento (F_{st}), según la norma ANSI TIA 222-G [6].

Tabla 14. Parámetros principales para la determinación de la fuerza de viento según norma ANSI TIA 222-G [6].

Elevación sección	<i>z</i>	K_z	Presión de velocidad	Presión de velocidad	Presión de velocidad	Área gruesa A_g	Área plana A_f	Radio de solidez	Coficiente de fuerza C_f	(EPA) _s
<i>m</i>	<i>m</i>		<i>N/m</i> ²	<i>kN/m</i> ²	<i>kgf/m</i> ²	<i>m</i> ²	<i>m</i> ²			<i>m</i> ²
42	39	1,33	616,479	0,62	62,842	10,2	2,870	0,281	2,347	6,734
36	33	1,29	595,175	0,60	60,670	10,2	3,110	0,305	2,283	7,100
30	27	1,23	570,555	0,57	58,161	11,7	3,282	0,281	2,349	7,710
24	21	1,17	541,152	0,54	55,163	14,7	3,428	0,233	2,489	8,532
18	15	1,09	504,145	0,50	51,391	17,7	3,854	0,218	2,538	9,781
12	9	0,98	452,742	0,45	46,151	20,7	4,168	0,201	2,591	10,801
6	3	0,85	392,999	0,39	40,061	23,7	4,534	0,191	2,625	11,904

En la Tabla 15, se exhibe la fuerza de viento aplicada a la estructura, considerando los factores de dirección del viento (D_f); de acuerdo a los criterios de la norma ANSI TIA 222-G [6]. Como resultado, se obtiene una fuerza total aplicada de 2,77 T.

Tabla 15. Fuerza de viento que actúa en la estructura según norma ANSI TIA 222-G [6].

Elevación sección	Factor de dirección del viento D_f			Área efectiva proyectada (EPA) _s			Fuerza sobre la estructura kgf			
	Torre triangular			Torre triangular			Torre triangular			
	<i>m</i>	Normal	60°	90°	Normal	60°	90°	Normal	60°	90°
42	1	0,8	0,85	6,734	5,388	5,724	359,871	287,782	305,768	
36	1	0,8	0,85	7,100	5,680	6,035	366,334	292,902	311,209	
30	1	0,8	0,85	7,710	6,168	6,554	381,398	304,936	323,995	
24	1	0,8	0,85	8,532	6,825	7,252	400,415	320,032	340,034	
18	1	0,8	0,85	9,781	7,825	8,314	428,268	341,813	363,176	
12	1	0,8	0,85	10,801	8,641	9,181	425,462	338,978	360,164	
6	1	0,8	0,85	11,904	9,523	10,118	407,224	324,281	344,549	
							Σ	2.768,971	2.210,724	2.348,894
								2,77 T.	2,21 T.	2,35 T.

De igual manera, para determinar la fuerza de viento según la norma ANSI TIA 222-H [7]; se deben seguir los criterios estipulados en la sección 2.3. Esto permite obtener los parámetros principales de la fuerza de viento, los cuales se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Parámetros principales para la determinación de la fuerza de viento según norma ANSI TIA 222-H [7].

Elevación sección	z	K_z	Presión de velocidad	Presión de velocidad	Presión de velocidad	Área gruesa A_g	Área plana A_f	Radio de solidez	Coefficiente de fuerza C_f	$(EPA)_s$
m	m		N/m^2	kN/m^2	kgf/m^2	m^2	m^2			m^2
42	39	1,33	345,967	0,35	35,267	10,2	2,870	0,281	2,347	6,734
36	33	1,29	334,011	0,33	34,048	10,2	3,110	0,305	2,283	7,100
30	27	1,23	320,194	0,32	32,640	11,7	3,282	0,281	2,349	7,710
24	21	1,17	303,694	0,30	30,958	14,7	3,428	0,233	2,489	8,532
18	15	1,09	282,925	0,28	28,840	17,7	3,854	0,218	2,538	9,781
12	9	0,98	254,078	0,25	25,900	20,7	4,168	0,201	2,591	10,801
6	3	0,85	220,550	0,22	22,482	23,7	4,534	0,191	2,625	11,904

En la Tabla 17, se exhibe la fuerza de viento aplicada a la estructura, considerando los factores de dirección del viento (D_f); de acuerdo a los criterios de la norma ANSI TIA 222-H [7]. Como resultado, se obtiene una fuerza total aplicada de 1,55 T.

Tabla 17. Fuerza de viento que actúa en la estructura según norma ANSI TIA 222-H [7].

Elevación sección	Factor de dirección del viento D_f			Área efectiva proyectada (EPA) _s			Fuerza sobre la estructura kgf		
	Torre triangular			Torre triangular			Torre triangular		
	m	Normal	60°	90°	Normal	60°	90°	Normal	60°
42	1	0,8	0,85	6,734	5,388	5,724	201,959	161,502	171,596
36	1	0,8	0,85	7,100	5,680	6,035	205,586	164,376	174,650
30	1	0,8	0,85	7,710	6,168	6,554	214,040	171,129	181,825
24	1	0,8	0,85	8,532	6,825	7,252	224,712	179,601	190,826
18	1	0,8	0,85	9,781	7,825	8,314	240,343	191,825	203,814
12	1	0,8	0,85	10,801	8,641	9,181	238,768	190,234	202,123
6	1	0,8	0,85	11,904	9,523	10,118	228,533	181,986	193,360
Σ							1.553,941	1.240,653	1.318,194
							1,55 T.	1,24 T.	1,32 T.

Si se realiza un análisis comparativo entre las dos normas respecto a la fuerza de viento (F_{st}), se obtiene un valor de 2,77 T. según la norma ANSI TIA 222-G [6] y 1,55 T. según la norma ANSI TIA 222-H [7]; esto representa una reducción del 55,96 %, lo cual indica que la estructura tiene una mayor capacidad de resistencia ante las fuerzas de viento actuantes.

En la Figura 8, se observa las dos modelaciones, cada una según su norma correspondiente y con su respectiva carga de viento distribuida en toda la estructura. Por otro lado, en la Figura 9 ilustra la forma en que la fuerza de viento vertical actúa sobre la estructura, permitiendo identificar las zonas más crítica de cada norma.

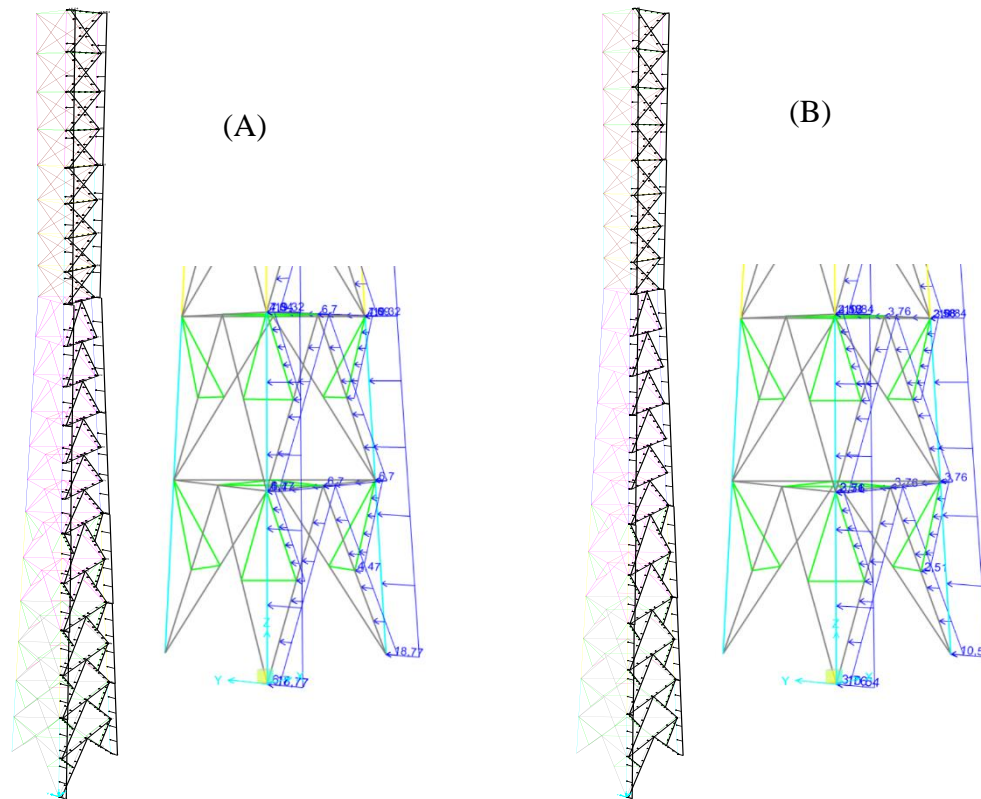


Figura 8. Fuerza de viento en la estructura, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

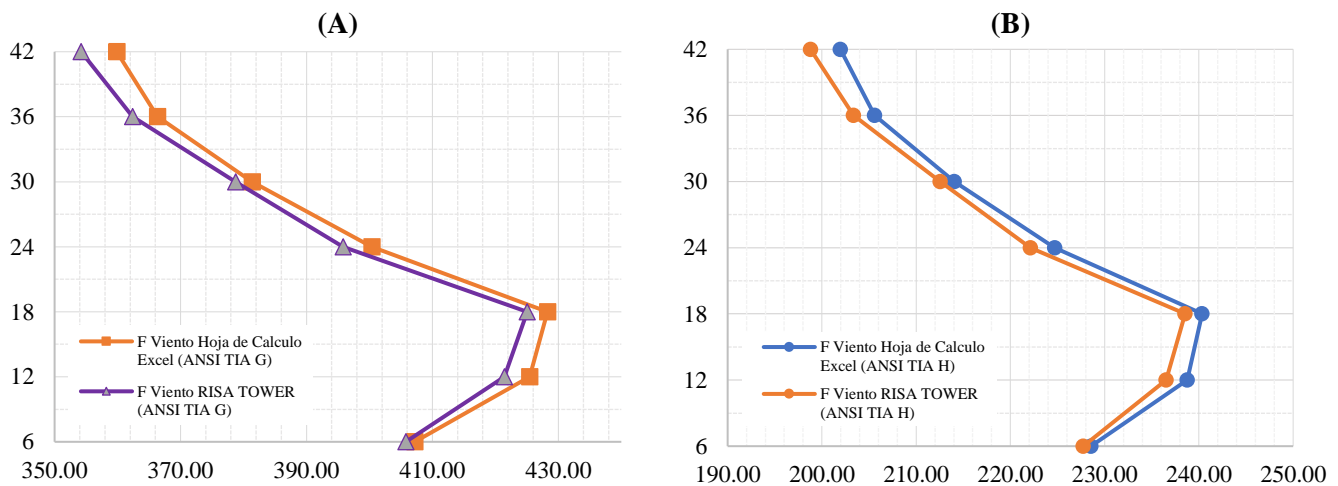


Figura 9. Fuerza de viento vertical, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

3.2. Deflexiones Máximas

Las deflexiones máximas son los desplazamientos máximos que puede experimentar la torre cuando está sujeta a cargas o fuerzas externas. Estas deflexiones son indicativas de la flexibilidad o rigidez estructural de la torre y se refieren a cuanto se desliza en relación a su posición original.

Según lo establecido por las normas en mención [16]; para estructuras de celosía, las deflexiones no deben exceder el 1,50 % de la altura total de la torre. El control de las deflexiones máximas resulta fundamental para garantizar la seguridad, funcionalidad y estabilidad de la torre.

En la Tabla 18 se presentan las deflexiones máximas según cada norma; por lo tanto en la Figura 10 se muestra que el desplazamiento máximo según la norma ANSI TIA 222-G [6], es de 353,64 mm.; mientras que en la norma ANSI TIA 222-H [7] es de 196,97 mm. En consecuencia, se obtiene una reducción del 55,70 %.

Tabla 18. Deflexiones máximas según norma ANSI TIA 222-G y norma ANSI TIA 222-H

Elevación sección <i>m</i>	Deflexiones en SAP norma ANSI TIA 222-G <i>mm</i>	Deflexiones en SAP norma ANSI TIA 222-H <i>mm</i>
42	353,64	196,97
36	263,48	146,31
30	180,09	100,13
24	112,18	62,43
18	60,86	33,90
12	25,44	14,18
6	5,71	3,19
0	0	0

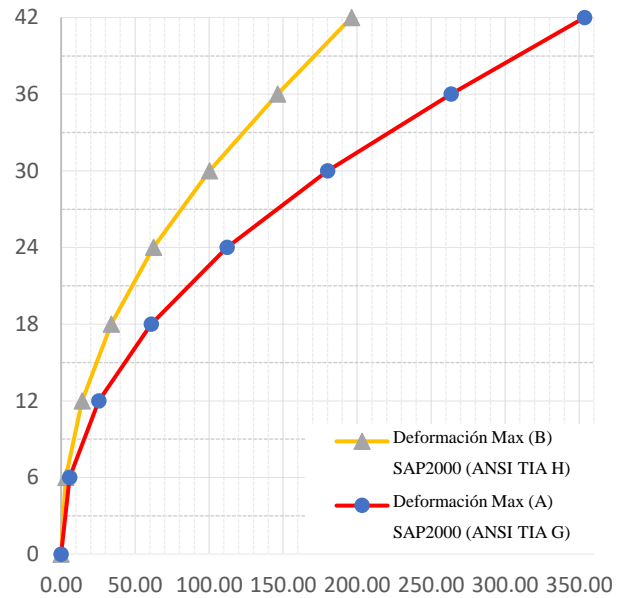


Figura 10. Deflexiones máximas, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

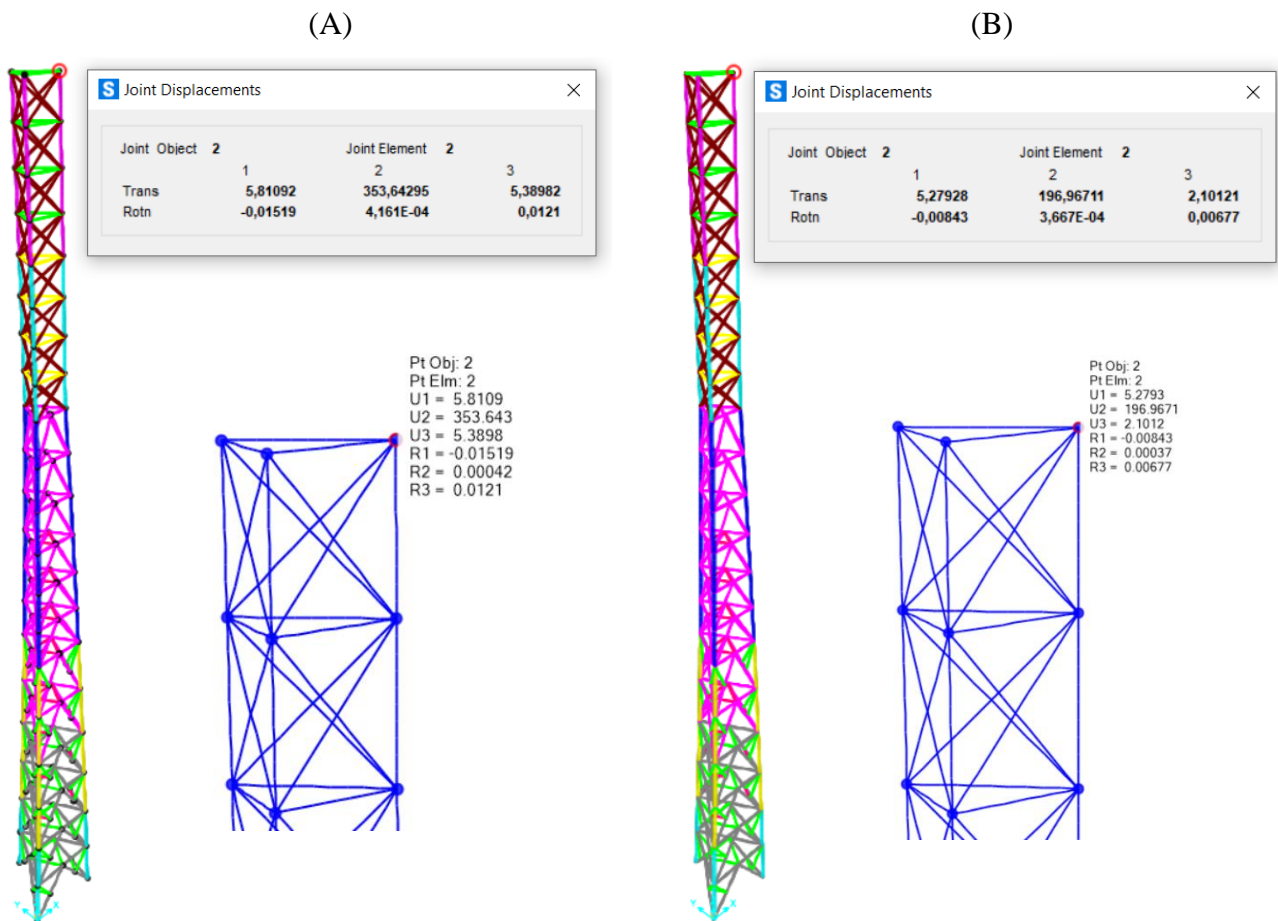


Figura 11. Fuerza de viento en la estructura, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

En la Figura 11, se presentan los resultados obtenidos de los desplazamientos máximos utilizando un software de cálculo estructural.

3.3. Reacciones Máximas

En cuanto a las reacciones máximas, estas representan las fuerzas que se transmiten a la base de la torre como consecuencia de las cargas y acciones aplicadas sobre la estructura [17]. La Tabla 19 y la Figura 12, muestran las reacciones máximas de sismo, corte y de carga axial (vertical) aplicadas al montante crítico, que en este estudio corresponde al mótate opuesto a la aplicación de la fuerza del viento.

Tabla 19. Reacciones máximas según norma ANSI TIA 222-G y norma ANSI TIA 222-H

Sentido	Reacciones	Máximas reacciones según SAP ANSI/TIA 222-G (kgf)	Máximas reacciones según SAP ANSI/TIA 222-H (kgf)
X	Sismo	1.322,84	671,11
Y	Cortante	4.170,96	2.419,65
Z	Axial	52.833,40	31.189,29

Descripción	kgf
Peso de la Estructura	5.444,96
Peso de los accesorios	1.440,00
Peso de las antenas microondas	900,00
Σ	7.784,96

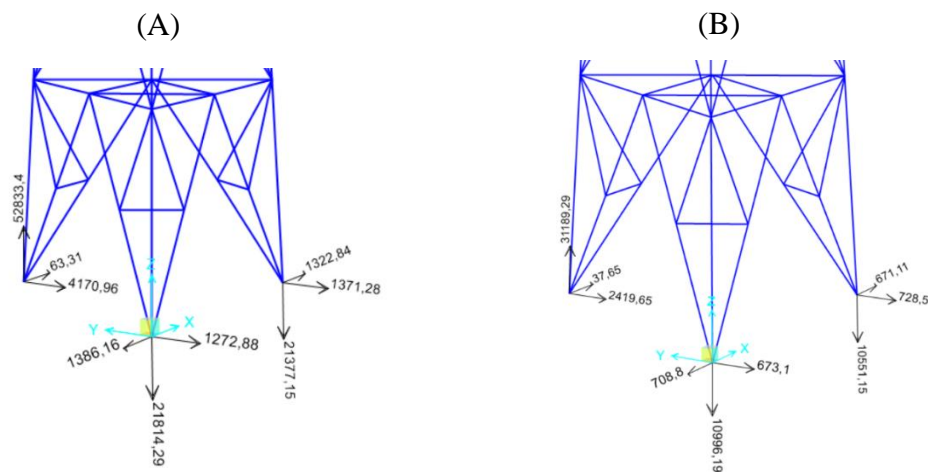


Figura 12. Reacciones máximas en la base de la torre, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

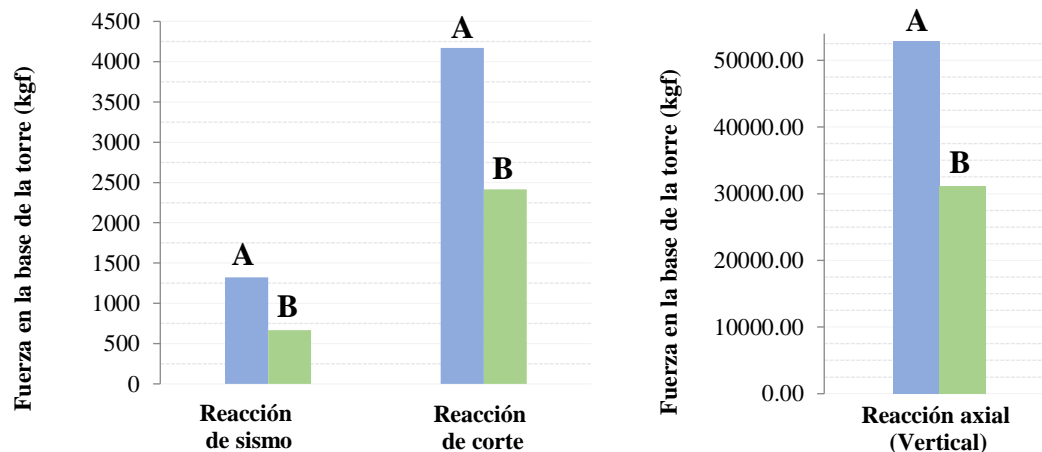


Figura 13. Reacciones máximas, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

En la Figura 13, se presentan los valores obtenidos de la norma ANSI TIA 222-G (A); los cuales son notablemente mayores que los de la otra norma. En este caso la reacción sísmica tiene un valor de 1.322,84 kg., la reacción de corte es de 4.170,96 kg., y la carga axial alcanza un valor de 52.833,40 kg. Por otro lado, en la norma ANSI TIA 222-H (B), las reacciones disminuyen, siendo la reacción sísmica es de 671,11 kg., la reacción del corte de 2.419,65 kg., y en la carga axial de 31.189,29 kg. En cuestión de porcentajes obtuvimos el 50,73 %, 58,01 % y 59,03 % respectivamente para cada reacción obtenida por la estructura.

3.4. Momentos Máximos

En relación a los momentos máximos, estos representan las fuerzas de flexión que actúan sobre la estructura debido a las cargas laterales. Como diseñadores, es necesario garantizar que los momentos máximos generados por las cargas se mantengan dentro de los límites de resistencia del material y las normas aplicadas [18]. Por lo tanto, en la Figura 14 se muestra los momentos máximos que se producen en la base de la torre según las dos normas.

En la Figura 15 se presenta el análisis de demanda – capacidad, con respecto a la combinación crítica; lo que para este estudio fue el Comb 4. ($1,2D + 1,6W_o + 1,0L$).

3.5. Análisis Demanda - Capacidad

El análisis de demanda – capacidad es un proceso utilizado para evaluar la capacidad de la estructura y para resistir las demandas generadas por las cargas y fuerzas a las que está sometida la estructura [19]. Este análisis implica comparar las demandas estructurales, como los momentos, fuerzas y deflexiones; con la capacidad resistente de los elementos estructurales de la torre.

El análisis de capacidad implica el cálculo de la resistencia a la compresión, tracción y flexión de los elementos estructurales; así como el análisis de la estabilidad y rigidez global de la torre [20]. En este análisis se consideran factores de seguridad y criterios de diseño para garantizar que la capacidad resistente sea adecuada para resistir las demandas estructurales [21]. Para la determinación de este análisis las combinaciones de carga asumidas son las siguientes:

- Comb 1. 1,4D
- Comb 2. 1,2D + 1,6L
- Comb 3. 1,2D + 1,6W_o
- Comb 4. 1,2D + 1,6W_o + 1,0L
- Comb 5. 1,2D + 1,0E + 1,0L

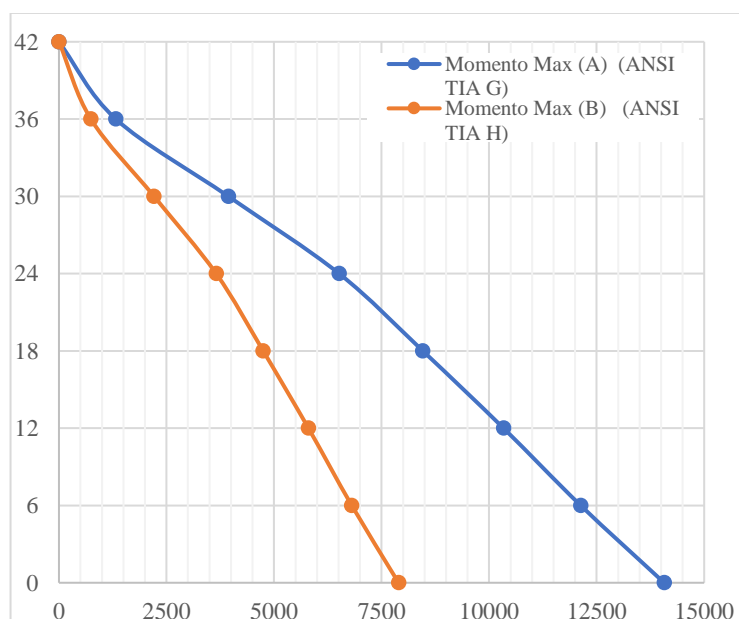


Figura 14. Momentos máximos, norma ANSI TIA 222-G (A); norma ANSI TIA 222-H (B).

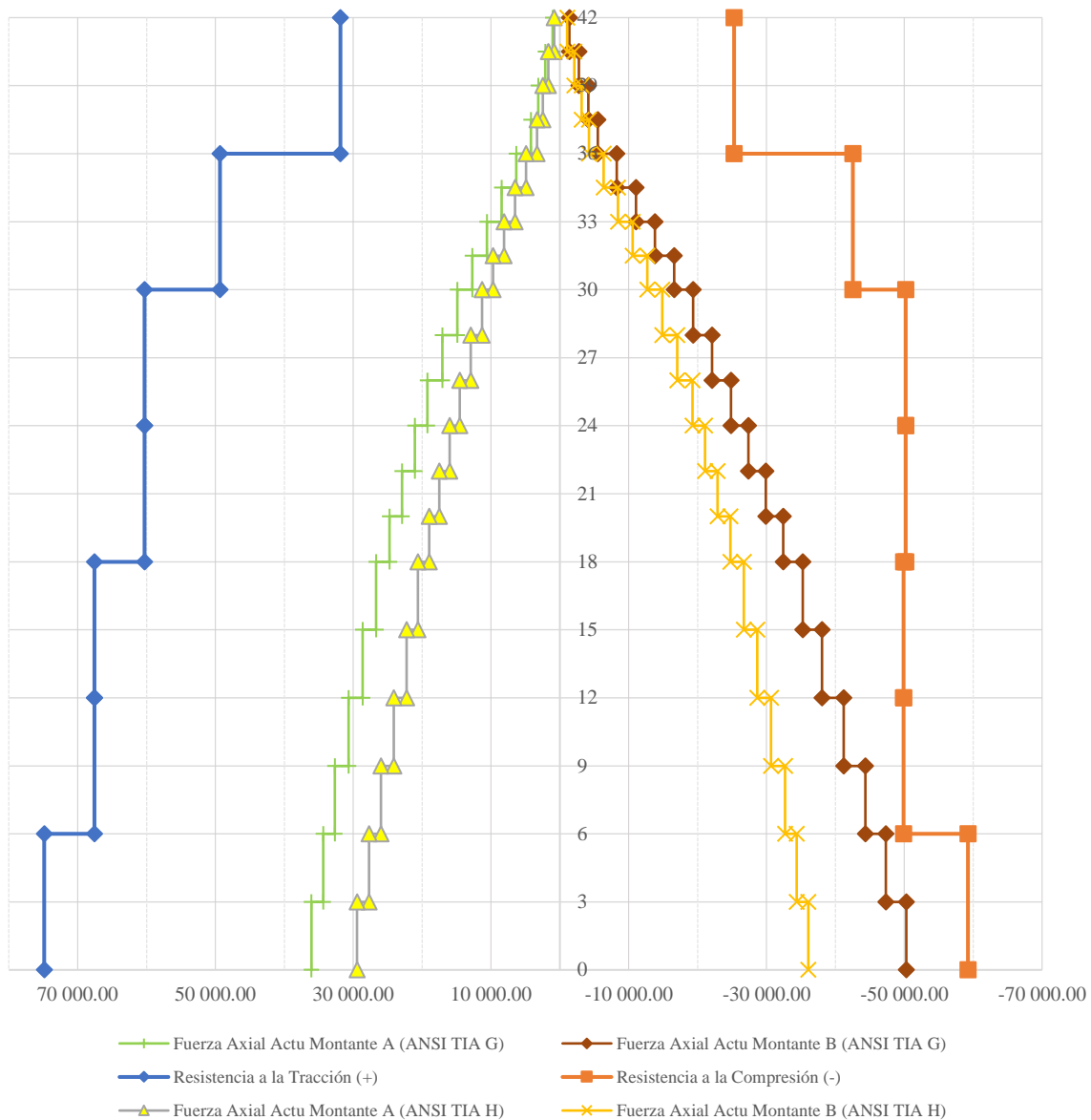


Figura 15. Análisis demanda - capacidad

En la Figura 15, se observa que la fuerza axial la norma ANSI TIA 222-G [6]; que actúa en el montante B de la torre triangular, se acerca al límite de la resistencia a la compresión en un 94,89 % a una altura de 6 m. Esto indica que los elementos en ese tramo están trabajando cerca del límite permisible, pero aún cumplen con los requisitos establecidos. Es importante destacar que, para determinar las fuerzas axiales, fue necesario realizar el diseño de los elementos sujetos a tracción y a compresión; utilizando los cálculos establecidos en la norma ANSI/AISC 360-16 [22].

4. Conclusiones

El análisis técnico comparativo realizado en esta investigación ha generado resultados que permiten verificar la mejor norma de diseño para la construcción de una torre autosoportada de 42 m. de altura; este análisis ha considerado diversos parámetros de diseño y criterios establecidos en las normas estudiadas.

Se ha comprobado que tanto la norma ANSI TIA 222-G [6] como la norma ANSI TIA 222-H [7], permiten realizar un buen diseño y modelado, cumpliendo con todos los parámetros establecidos

en ambas normas. Sin embargo, se concluye que la opción más óptima para el diseño y construcción es la norma ANSI TIA 222-H [7]; esta norma se destaca por incrementar los coeficientes de reducción en ciertos parámetros, lo que brinda al diseñador la posibilidad de realizar ajustes y modificaciones en la configuración y dimensionamiento de los elementos de la torre, según su criterio.

Con base en estos hallazgos, se concluye que la norma ANSI TIA 222-H [7], proporciona una mejor opción para el diseño de la torre, al garantizar el cumplimiento de todos los parámetros normativos; permitir ajustes y optimizaciones que maximizan la eficiencia estructural.

Referencias

- [1] J. López, “La maraña de cables que oscurecía el cielo de Estocolmo,” [online]. Dec. 06, 2022. Disponible en: <https://hipertextual.com/2022/12/telefonor-net-torre-telefonía>
- [2] A. Aguirre, “Diseño de una Torre autosoportada triangular de 60 metros portadora de antenas,” Proyecto de titulación, Universidad Nacional de Piura, Piura - Perú, 2017.
- [3] V. B. E. Parnás and K. L. García, “Análisis estructural de torre autosoportada con modificaciones en sus elementos bajo la acción del viento.,” *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 13, 2019. [online]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa>
- [4] “Next Steel Tower.” [online]. Disponible en: <https://www.nextsteeltower.com/post/torre-autosoportada> (accessed May 30, 2023).
- [5] N. Garzón, “Análisis torre de comunicación auto soportada,” Trabajo de grado, Universidad la Gran Colombia, Bogotá D.C., 2020.
- [6] ANSI and TIA 222-G, *Structural Standard for antenna Supporting Structures and antennas*. 2005.
- [7] ANSI and TIA 222-H, *Structural Standard for antenna Supporting Structures and antennas and small Wind Turbine support Structures*. 2017.
- [8] C. Pareja, “Diseño óptimo de cimentaciones superficiales para estructuras de Acero ligeras,” Proyecto de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador, 2022.
- [9] Miduvi and Camicon, *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DS, Peligro Sísmico*. Quito - Ecuador, 2014, pp. 5–25.
- [10] Y. Quiñones, “Aplicación del tipo de material en la respuesta estructural y económica con la norma ANSI/TIA 222-G en la torre de telecomunicaciones de 30 m.,” Tesis, Universidad Privada del Norte, Lima - Perú, 2020.
- [11] ASCE and SEI 7-16, *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 2017, pp. 1–889.
- [12] W. Cangás and C. Apolo, “Análisis estructural de las torres de telecomunicación para antenas de última Tecnología,” Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2014.
- [13] L. Alay, “Estudio de deformaciones laterales debido al viento en torre telefónica autosoportada de 48 metros, ubicada en la parroquia Chongón del cantón Guayaquil,” Proyecto de titulación, Universidad de Guayaquil, Guayaquil - Ecuador, 2016.
- [14] O. García, “Análisis y diseño de una torre autosoportada de comunicación,” Teiss, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2001.
- [15] A. Diaz, “Diseño de una torre de Telecomunicaciones autosoportada de 42mde altura y su chequeo en el rango Inelástico del comportamiento (procedimiento Estático no Lineal),” Trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato - Ecuador, 2015.
- [16] D. Almeida and C. López, “Diseño y simulación de una torre de transmisión

- Eléctrica tipo AR2-C4,” Tesis, Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador, 2013.
- [17] F. Acebedo, “Diseño y cálculo de una torre metálica autosoportada de telecomunicaciones en Paterna (Valencia),” Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Valencia, 2018.
- [18] P. Martín, I. Fernández, and V. B. E. Parnás, “Estudio comparativo de normas para el análisis dinámico de una torre autosoportada bajo carga de viento,” *Informes de la Construcción*, vol. 70, no. 552, p. 274, Jan. 2019.
- [19] V. Larriva, “Diseño y evaluación estructural de las torres autosoportadas de telecomunicaciones de 20, 30 y 40 metros de altura de etapa EP, de acuerdo a la norma NEC-SE, para dispositivos con tecnología CDMA,” Proyecto de titulación, Universidad del Azuay, Cuenca - Ecuador, 2016.
- [20] D. Chullo and S. Mayorca, “Metodología del análisis y diseño de una torre tipo ‘S’ de transmisión de energía eléctrica autosoportada para una línea de 60kv., en el distrito de San Juan de Lurigancho,” Tesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Perú, 2020.
- [21] S. Ibarra, “Comportamiento de torres de transmisión ante patrones de carga Eólica reglamentaria,” Tesis, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México D.F., 2014.
- [22] ANSI and AISC 360-16, *Specification for Structural Steel Buildings*. 2016.