

Comportamiento Dinámico De Torre Autosoportada Modelo Moyano Ante Acciones Sísmicas

Dynamic Behavior Of The Moyano Model Self-Supporting Tower Under Seismic Actions

Autores

Elvia Teresa Castro Figueredo ¹, Eduardo R. Álvarez Deulofeu ²

¹ Ingeniera Civil, Empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA), Rubén Noguera #108^a/ Figueredo y H. Hechavarría, elvia.castro@etecsa.cu

² Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba, Calle 6 #16, entre Garzón y Escario, Rpto: Santa Barbara, Santiago de Cuba, ealvarez@uo.edu.cu

RESUMEN

En Cuba las torres de comunicaciones son fuertemente afectadas por vientos extremos debido al paso de huracanes lo que ha provocado las fallas de estas estructuras. El riesgo hidrometeorológico no es el único que está presente en el país, también existen zonas con distintos grados de sismicidad destacándose la región oriental considerada la de mayor peligro sísmico. En esta zona se encuentran las provincias de Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo, por lo que estudiar el comportamiento de estas estructuras ante las acciones sísmicas es de vital importancia. Esta investigación tiene como objetivo revisar el comportamiento dinámico, chequear el cumplimiento de los requisitos de servicio establecidos por la norma ANSI/TIA-222-H del 2018 y realizar el chequeo estructural de las torres autosoportadas modelo Moyano ubicadas en la provincia de Granma según los requisitos de resistencia establecidos en la norma americana ANSI/AISC341-16. Se realizó el análisis estructural de la torre autosoportada Moyano, ejecutándose el modelo matemático con el Software SAP2000 V22. Las características dinámicas fueron obtenidas mediante Análisis Modal. Se tuvo en cuenta el peso propio, el de las antenas y escalera, así como las fuerzas sísmicas, las que se consideraron a partir del establecimiento de un espectro de respuesta de diseño. El análisis arrojó que las torres autosoportadas modelo Moyano emplazadas en zona de sismicidad 2 según la NC 46 del 2017 en la provincia Granma cumplen con los requisitos de servicios establecidos por la norma americana ANSI/TIA-222-H del 2018 pero incumplen los requisitos de resistencia establecidos por la norma americana ANSI/AISC341-16.

Palabras claves: análisis modal, acciones sísmicas en torres, comportamiento dinámico, requisitos de servicios

ABSTRACT

In Cuba, communications towers are strongly affected by extreme winds due to the passage of hurricanes, which has caused the failures of these structures. The hydrometeorological risk is not the only one that is present in the country, there are also areas with different degrees of seismicity, highlighting the eastern region considered the one with the greatest seismic danger. The provinces of Granma, Santiago de Cuba and Guantánamo are located in this area, so studying the behavior of these structures under seismic actions is of vital importance. This research aims to review the dynamic behavior, check compliance with the service requirements established by the ANSI/TIA-222-H standard of 2018 and perform the structural check of the Moyano model self-supporting towers located in the province of Granma according to the resistance requirements established in the American standard ANSI/AISC341-16. The structural analysis of the Moyano self-supporting tower was carried out, running the mathematical model with the SAP2000 V22 Software. The dynamic characteristics were obtained by modal analysis. The self-weight, the antennas and ladder were taken into account, as well as the seismic forces, which were considered from the establishment of a design response spectrum. The analysis showed that the Moyano model self-supporting towers located in seismicity zone 2 according to NC 46 of 2017 in the province of Granma comply with the service requirements established by the American standard ANSI/TIA-222-H of 2018 but do not meet the resistance requirements established by the American standard ANSI/AISC341-16.

Keywords: dynamic behavior, modal analysis, seismic actions on towers, service requirements

Nota Editorial: Recibido: Agosto 2024 Aceptado: Septiembre 2024

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de telecomunicaciones en la actualidad se han tornado indispensables, por la creciente informatización de la sociedad que obliga a mantenerse conectados, así mismo en caso de desastres naturales son de vital importancia ya que se necesitan para poder brindar una respuesta oportuna, rápida y adecuada a las personas afectadas. Para lograr una red de telecomunicaciones fuerte se debe garantizar que las infraestructuras que se dispongan sean resistentes y perdurables antes las acciones de la naturaleza.

Cuba es afectada por vientos extremos debido al paso de huracanes, lo que ha provocado las fallas de varias torres de celosías, solo de transmisión eléctrica se han reportado 523 desde 1996 al 2017 [1], mientras que de radio y televisión han sido 33 hasta el 2008 [2] y 13 de comunicación hasta el 2020 según reportes de la Empresa de Telecomunicaciones de Cuba (ETECSA). El riesgo hidrometeorológico no es el único que está presente en el país, también existen zonas con distintos grados de sismicidad destacándose la región oriental considerada la de mayor peligro sísmico del país, por su cercanía al límite de la placa de Norteamérica y la microplaca de Gonave. En los últimos 500 años se han reportado varios sismos de intensidades de 8 a 9 grados en la escala MSK [3], encontrándose en esta región las provincias de Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo.

Las torres de comunicación empleadas en la isla son de disímiles modelos, alturas y nacionalidades, como son las TAS, MOYANO, AUX-42 (torres autosoportadas) las GNC y las AT (torres atirantadas), entre otras. A pesar de que no existe una evidencia o registro de daños causados a la infraestructura de los sistemas de telecomunicaciones por ocurrencia de sismos de alta magnitud en el territorio nacional, no significa que ante la ocurrencia de un fenómeno de esta índole no sean afectadas. Razón por la cual la evaluación del comportamiento de estas estructuras, se debe realizar no solo para las cargas de vientos extremos presentes, sino también para las cargas sísmicas, siendo de especial importancia para la región sur oriental del país.

Esta investigación se enmarcó en la provincia de Granma, en la que están presente zonas de peligrosidad sísmico desde bajas (zona 2) hasta alta (zona 4), según la norma cubana de sismo vigente NC-46 [4]. Esta provincia es después de Santiago de Cuba, la más afectada en frecuencia e intensidad por los terremotos. De los 28 sismos fuertes reportados en la isla con daños en las construcciones y en la población, cinco han tenido su epicentro en esta región [5]. Además, en ella están presente dos de las diez áreas con sismicidad significativa identificadas en el país, Cabo Cruz y Pílon-Baconao [6]. En Granma se encuentran distribuidas 15 torres autosoportadas de las cuales tres son modelo Moyano, siendo las de mayor altura (42 m), son de procedencia española y están emplazadas en zonas de peligrosidad sísmica baja (zona 2) y moderada (zona 3).

El aumento de las torres en altura, trae consigo el aumento de sus períodos de oscilación, lo que las convierte en estructuras sensibles a cargas dinámicas como el sismo y el viento, la instalación de estas en zonas de alta sismicidad, ha provocado que se le preste mayor atención al análisis bajo carga sísmica de estas estructuras. Esto se evidencia en la inserción del análisis sísmico en las últimas ediciones de las normas más avanzadas en el mundo sobre las torres de telecomunicaciones como son: la estadounidense ANSI/TIA-222-H [7], la canadiense CAN-CSA-S37-18 [8] y el Eurocódigo 1998-6:2005 [9], así como las diversas investigaciones en pregrado y posgrado realizadas por estudiantes de varias universidades del mundo. Se destacan los estudios realizados por autores como Ghodrati and Masah [10] en Irán y Mehta and Patel [11] en la India, los que demuestran que las fuerzas predominantes en estas estructuras son las generadas por el viento ya que estas se presentan con mayor frecuencia que las cargas sísmicas, no obstante, coinciden que en zonas de altas sismicidades es necesario evaluar su comportamiento. En estudios propiamente del comportamiento sísmico de las torres autosoportadas, autores como Ghodrati and Masah [10] al investigar las formas modales de la torre, corroboraron que las tres primeras formas modales, más bajas en frecuencia son suficientes para el análisis dinámico de torres de telecomunicaciones autosoportadas. Aunque consideran que tener en cuenta los cinco modos más bajos mejoraría la precisión del análisis, especialmente en el caso de torres más altas. Por otra parte Chandra and Sengupta [12] demuestran cómo la altura de la torre influye en el aumento de los desplazamientos, siendo casi lineal en torres de altura de 30 a 40 m, observándose un fuerte aumento a medida que la altura de la torre se incrementa de 40 a 50 m. Haciendo referencia al tipo de análisis sísmico a utilizar, Saudi and Aly [13] comprueban que el método estático equivalente para el análisis sísmico produce resultados conservadores en comparación con los resultados del análisis del espectro de respuesta; en su estudio obtienen diferencias aproximadas de 38% y 93% en la estimación de las reacciones de apoyo y las tensiones en las columnas principales, respectivamente.

En Cuba los estudios de análisis sísmicos de estas estructuras son reducidos, las investigaciones se han centrado en los estudios del comportamiento ante las acciones del viento, debido a que el territorio nacional es azotado frecuentemente por huracanes. Uno de los primeros reportes de estudios del comportamiento de las torres autoportadas antes las acciones sísmicas es de Oliva, et al. [14] quienes estudian la respuesta sísmica de seis torres autoportadas de comunicación de la provincia Granma en función de la estimación del peligro sísmico puntual del sitio donde estaban ubicadas. La caracterización estructural de las torres y la determinación del período fundamental del suelo y de las torres fueron estimados de forma instrumental. Luego Martín and Elena [15] realizaron estudios de análisis sísmico de modelos cubanos de torres autoportadas de telecomunicaciones (Modelo Versalles y Modelo Najasa) a partir de modelos computacionales. Luis Garcia, et al. [16] realizan una caracterización del comportamiento dinámico de cuatro torres autoportadas de sección triangular a partir de determinar sus períodos naturales, formas modales y el por ciento de participación de la masa. Con estos estudios se disipa el desconocimiento del comportamiento de los modelos cubanos de torres autoportadas instaladas en el país, no así en el caso de la torres autoportadas extranjeras existentes en el territorio nacional de las que no hay registro de estudios, razón por la cual esta investigación tiene como objetivo: revisar el comportamiento dinámico, chequear el cumplimiento de los requisitos de servicio establecidos por la norma ANSI/TIA-222-H del 2018 y realizar el chequeo estructural de las torres autoportadas modelo Moyano ubicadas en la provincia de Granma según los requisitos de resistencia establecidos en la norma americana ANSI/AISC341-16.

2. DESARROLLO

2.1. Materiales Y Métodos

Para dar cumplimiento al objetivo relacionado con el comportamiento dinámico se realizó el análisis estructural de la torre autoportada Moyano, ejecutándose el modelo matemático con la ayuda del Software SAP2000 V22. El procedimiento utilizado fue el Análisis Modal, que establece la realización de un estudio para determinar los modos naturales de vibración de la estructura, incluido el período de cada modo, el vector de forma modal y el factor de participación de masa modal. El análisis incluyó el número suficiente de modos para obtener una participación modal combinada de al menos el 85%. Para desarrollar los objetivos relacionados con los criterios de revisión de servicio y resistencia se consultaron las normas americanas ANSI/TIA-222-H [7] y ANSI/AISC341-16 [17] respectivamente.

2.2. Geometría Y Materiales Componentes De La Estructura

La torre autoportada modelo Moyano, caso de estudio, tiene una altura de 42 m, está anclada en el suelo a través de una cimentación monobloque. Está compuesta de dos tramos prismáticos de distintas secciones cuadradas con estructura de celosía, de 18,70 y 21,25 m de altura con secciones de 1,70 x 1,70 m y 1,25 x 1,25 m respectivamente y un tramo de transición entre ellos de 1,75 m, como se aprecia en la figura 1. Los elementos componentes son perfiles angulares de acero galvanizados en caliente de diferentes secciones transversales y propiedades físico mecánicas. Los montantes están constituidos por perfiles laminados en acero S355 J0 y los restantes elementos son perfiles laminados en acero S 275 JR.

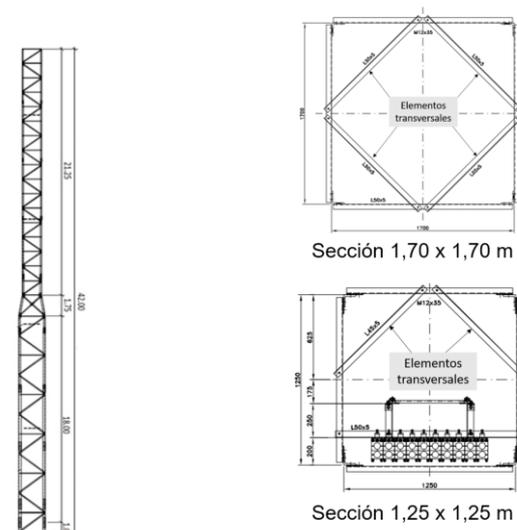


Figura 1. Elevación y secciones de torre Moyano. Fuente: Adaptado del fabricante, 2024

2.3. Norma De Revisión Aplicada

El reglamento cubano de construcción sismorresistente NC-46 [4] (Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción), establece en su alcance los requerimientos mínimos para el diseño y construcción de edificaciones; sin embargo, el diseño de torres de celosía no está contemplado en este documento ya que no entra dentro de las clasificaciones de los sistemas sismorresistentes (E1, hasta E6). Sobre la base de lo anterior, es necesario utilizar una norma extranjera para evaluar el comportamiento de estas estructuras ante cargas sísmicas. En este caso se utilizó la norma americana ANSI/TIA-222-H [7] (Structural standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures) adaptándolas a las condiciones nacionales, con el fin de evaluar si la torre en estudio cumple con los criterios de servicios que establece esta norma para resistir los efectos de los movimientos sísmicos del suelo. Para chequear la resistencia y estabilidad se empleó la norma americana de diseño ANSI/AISC341-16 [17] (Seismic Provisions for Structural Steel Buildings), ya que esta aborda el diseño y la construcción de sistemas constructivos de acero estructural específicamente detallados para la resistencia sísmica. La norma cubana se utilizó para la clasificación del tipo de suelo en el que se encuentra emplazada la torre y para la obtención del espectro elástico de diseño.

2.4. Cargas

2.4.1. Cargas Permanentes, Muertas O De Gravedad (G)

Se consideró 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, según los datos del fabricante. Además, se incluyó el peso de los elementos no estructurales como: escalera de acceso, escalerilla de cables, plataforma de trabajo, de antenas y radios.

Se consideró el peso de tres antenas tipo Kathrein ubicadas a 40,00 m de altura, 3 radios 3 RRU 5904 (4G) emplazados a 37,00 m de altura y una antena parabólica UKY 210 95/DC12 colocada a 20,00 m (Tabla 1).

Tabla 1. Cargas permanentes que soporta la torre por concepto de accesorios.

Catálogo	Accesorios	Dimensiones (m)	Cant.(u)	Posición (m)	Peso Unit. (kg)	Peso Total (kg)
UKY 210 95/DC12	Parábola	0,79 x 0,79 x 0,64	1	20,00	28,70	28,70
RRU 5904 (4G)	Radio	0,40 x 0,30 x 0,15	3	37,00	22,00	66,00
Kathrein XXXPol Panel 80010864	Antena	1,40 x 0,37 x 0,16	3	40,00	27,2	81,60
	Escalera	0,54 x 42,00	1	42,00	546,00	546,00
Sumatoria						722,30

2.4.2. Consideraciones Estructurales Y Procedimiento De Análisis

Las torres de telecomunicaciones y transmisión asumen un comportamiento de celosía simple, donde todas las conexiones diseñadas se consideran articuladas, excepto las de columna-columna que se consideran continuas. El análisis general de la estructura se realizó como una viga en voladizo y los elementos que la conforman trabajan similar a una cercha, es decir, a esfuerzos de tracción y compresión únicamente. La norma ANSI/TIA-222-H [7] complementa esta idea, establece 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. La norma establece las limitaciones de uso de cada procedimiento de análisis sísmico según las alturas de las estructuras. En este caso se seleccionó el método de procedimiento de análisis sísmico No. 3: Procedimiento de Análisis Modal, ya que no presenta límite de altura para torres autosoportadas. Plantea que se debe construir un modelo matemático que represente la distribución espacial de masa y rigidez en toda la estructura, y luego realizar una evaluación del comportamiento dinámico de la torre basado en los modos de oscilación de la estructura, que incluye período de oscilación de cada modo, el vector de forma modal y el factor de participación de masa modal. Se recomienda incluir un número suficiente de modos de oscilación para obtener una participación masiva modal combinada de al menos el 85%. Además, orienta establecer un espectro de respuesta de diseño.

El espectro de respuesta de diseño se determinó de acuerdo con las ecuaciones y criterios planteados en la norma cubana NC-46 [4], luego de definido los factores necesarios se obtuvo el espectro de respuesta para un sismo ordinario en la zona de peligrosidad 2 en el municipio Yara de la provincia Granma, en un perfil de suelo clasificado como tipo E, y un coeficiente de disipación de energía $R=3$, valor recomendado por la normativa norteamericana ANSI/TIA-222-H [7], el que se muestra en la figura 2.

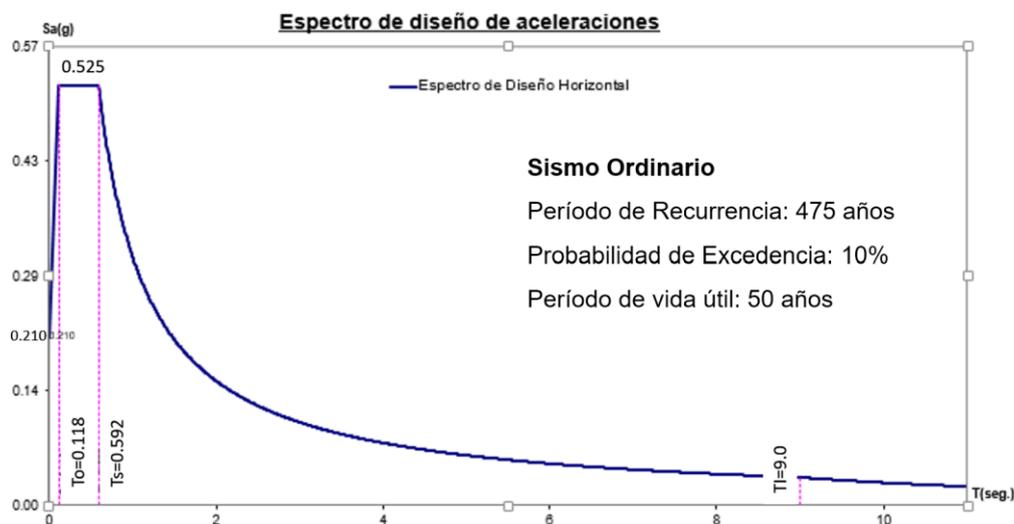


Figura 2. Espectro de respuesta elástico de diseño (Municipio Yara, Provincia Granma, Tipo de Suelo E).

2.4.3. Combinaciones De Carga De Estado Límite De Resistencia

Atendiendo a las especificaciones de la norma americana ANSI/TIA-222-H [7] y las recomendaciones de la norma cubana para construcciones sismorresistente NC-46 [4] se plantearon las siguientes combinaciones de carga:

$G + 100\% S_x + 30\% S_y$	(1)	$0.9G + 30\% S_x + 100\% S_y$	(5)
$G + 30\% S_x + 100\% S_y$	(2)	$0.9G + 100\% S_x + 30\% S_y$	(6)
$1.2G + 100\% S_x + 30\% S_y$	(3)	$0.9G - 30\% S_x + 100\% S_y$	(7)
$1.2G + 30\% S_x + 100\% S_y$	(4)	$0.9G - 100\% S_x + 30\% S_y$	(8)

Donde:

G : Cargas permanentes, muertas o de gravedad.

S_x : Cargas sísmicas en X.

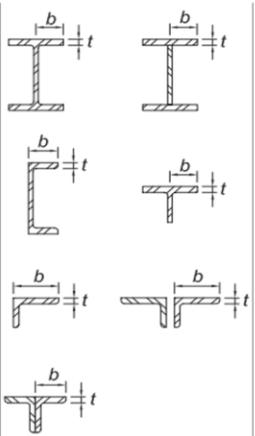
S_y : Cargas sísmica en Y.

La modelación de la torre se realizó mediante el uso del Software SAP2000 V22, el cual permite evaluar las solicitaciones en cada uno de los elementos que componen la torre, para las combinaciones de cargas especificadas. Esto permite generar el reporte para efectuar la revisión de los criterios de resistencia y estabilidad establecidos por las normativas ANSI/AISC341-16 [17] y los de servicio establecidos por la norma ANSI/TIA-222-H [7], al chequear los desplazamientos máximos y la rotación de la torre causada por el sismo.

2.4.4. Análisis Estructural

La norma americana de diseño ANSI/AISC341-16 [17] (Seismic Provisions for Structural Steel Buildings) plantea entre sus especificaciones a cumplir por las estructuras metálicas en zonas sísmicas: que las secciones de acero estructural para miembros moderadamente dúctiles y miembros altamente dúctiles deben tener bridas conectadas continuamente al alma o almas. Además, establece que los elementos de compresión no deben exceder las relaciones límite de ancho a espesor (λ_{md}), ver Tabla 2.

Tabla 2. Limitación de las relaciones entre anchura y espesor para elementos de compresión para miembros moderadamente dúctiles y muy dúctiles. Fuente: Adaptado de [17]

Descripción de los elementos	Relación ancho-espesor	Limitación de la relación ancho-espesor		Ejemplo
		λ_{hd} Miembros altamente dúctiles	λ_{md} Miembros moderadamente dúctiles	
Bridas de laminado o Construido en forma de L Secciones, canales y tees; piernas de ángulos simples o de doble ángulo miembros con separadores; Piernas sobresalientes de pares de ángulos en Contacto continuo.	$\frac{b}{t}$	$0,32 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	$0,40 \sqrt{\frac{E}{R_y F_y}}$	

Plantea que siempre que se requiera se proporcionarán arriostramientos de estabilidad para restringir el pandeo lateral de vigas de acero estructural y designadas como miembros moderadamente dúctiles o miembros altamente dúctiles, para estos establece un espaciamiento máximo del arriostramiento de los miembros de viga altamente dúctiles según la ecuación 9.

$$Lb = \frac{0,095 * r_y * E}{(R_y * F_y)} \quad (9)$$

Donde:

Lb = Longitud entre puntos que están arriostrados contra el desplazamiento lateral de la brida de compresión o arriostrados contra la torsión de la sección transversal, en milímetros.

La relación entre demanda y capacidad se estableció óptima para valores inferiores a 1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Revisión De Los Parámetros De Control Fundamentales. Participación Modal De La Masa.

En este caso se fijó el análisis para 30 modos de oscilación, lográndose la participación modal de las masas requerida por el código americano a partir del modo 28 en la dirección (x) y del modo 27 en la dirección (y) (Tabla 3). Estos resultados no se corresponden con los obtenidos por Ghodrati and Masah [10], los que demuestran que a medida que aumenta la altura de la torre, el porcentaje de participación modal de masa disminuye; sus estudios demostraron que la participación modal de más del 90 % para torres de 40,00 m de altura se alcanza a partir del modo 19.

Los primeros cuatro modos de vibración que arroja el programa conforman los dos primeros modos a flexión de la estructura (figura 3) produciéndose en pares con frecuencias naturales y formas de modales ortogonales muy parecidas, como lo corroboran Luis García, et al. [18] al realizar el análisis modal de torres autosoportadas. A partir del quinto modo de vibración hasta el séptimo aparecen los modos a torsión, los que se presentan con periodos y frecuencias muy parecidos, resultado que coincide con el obtenido por Luis, et al. [19] los que corroboran que, en el caso de torres de 30,00 m de altura y más, el primer modo de torsión tiene lugar después del segundo modo de flexión.

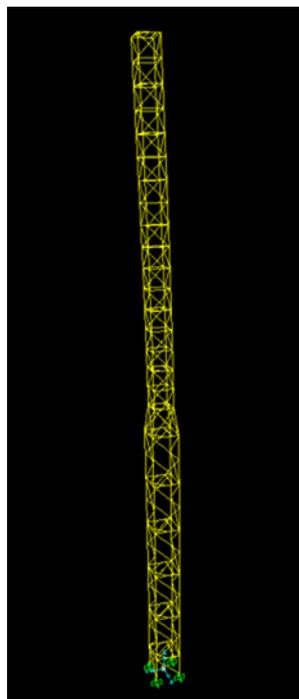
En el primer modo a flexión la participación de masas no superó el 50%, valor que concuerda con el obtenido por Ghodrati and Masah [10], los que obtuvieron para todas las torres estudiadas valores de participación de las masas superiores a 50% para el primer modo de flexión. Sin embargo, el 90 % aproximadamente de la participación total de la masa lo encontraron en los tres primeros modos de flexión. En el caso de estudio el 85% de la participación de las masas no se encontró en los dos primeros modos de flexión, lo que muestra que no es suficiente solo tener en cuenta estos modos de flexión para la realización de un análisis dinámico.

En la tabla 3 se muestra un fragmento de los resultados arrojados del análisis en el que se expresa el periodo de oscilación en cada modo y la participación modal.

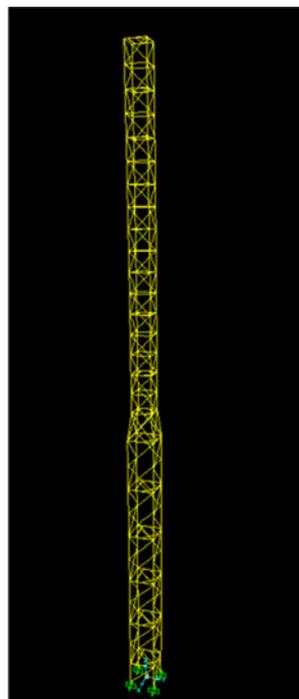
Tabla 3. Periodos de oscilación en cada modo y participación modal de la masa.

Fuente: Software SAP2000 V22.

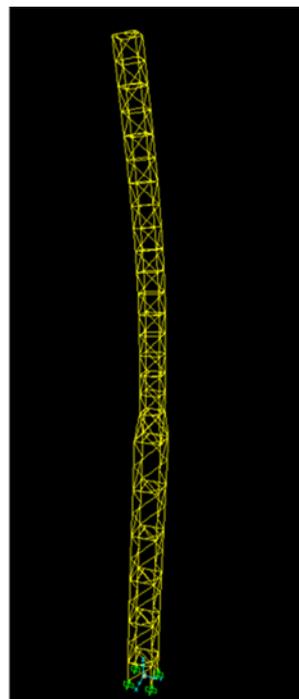
Número Modos	Periodo Sec.	UX Sin unidades	UY Sin unidades	SumUX Sin unidades	SumUY Sin unidades
MODAL 1	0,8515	0,1732	0,2774	0,1732	0,2774
MODAL 2	0,8509	0,2773	0,1728	0,4505	0,4502
MODAL 3	0,2348	0,0003	0,2530	0,4508	0,7031
MODAL 4	0,2341	0,2535	0,0003	0,7043	0,7034
MODAL 5	0,1459	0,0001	0,0000	0,7044	0,7034
MODAL 6	0,1241	0,0000	0,0000	0,7044	0,7034
MODAL 7	0,1035	0,0076	0,0030	0,7120	0,7065
MODAL 27	0,0574	0,0010	0,0449	0,8342	0,8763
MODAL 28	0,0556	0,0489	0,0005	0,8831	0,8768
MODAL 29	0,0516	0,0000	0,0020	0,8832	0,8788
MODAL 30	0,0514	0,0000	0,0014	0,8832	0,8802



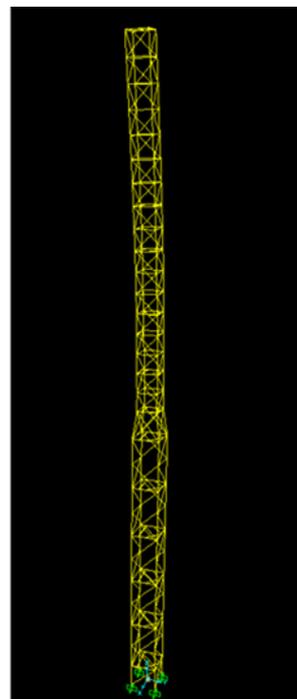
Modo 1: Flexión en X.
T=0,8515 ; F=1,17435



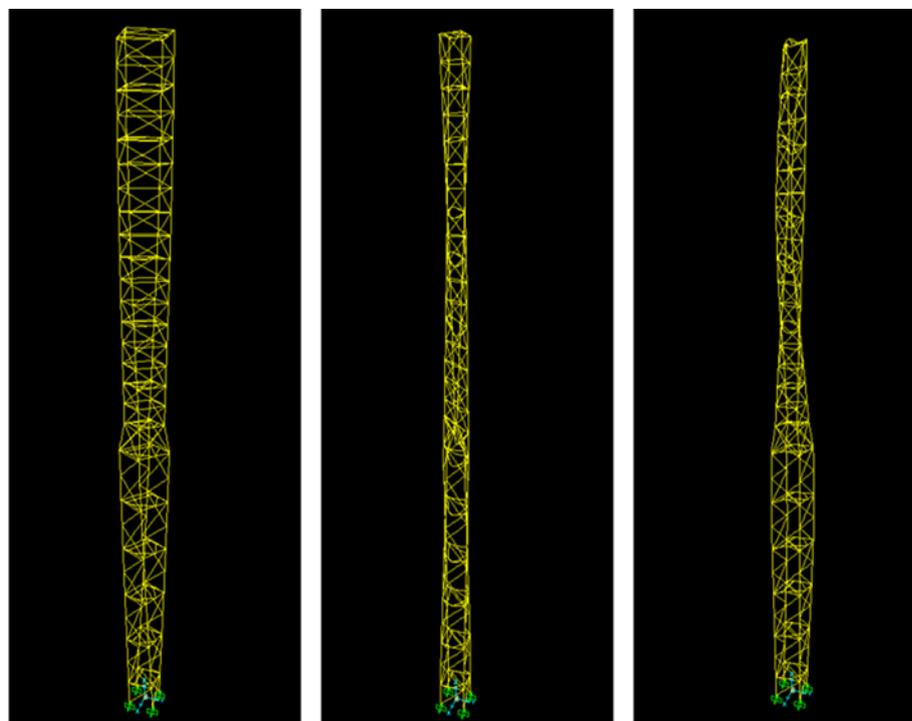
Modo 2: Flexión en Y.
T=0,8509 ; F=1,17529



Modo 3: Flexión en X.
T=0,2348 ; F=4,25867



Modo 4: Flexión en Y.
T=0,2341 ; F=4,2708



Modo 5: Torsión

T=0,1459 ; F=6,85344

Modo 6: Torsión

T=0,1241 ; F=8,0592

Modo 7: Torsión

T=0,1035 ; F=9,6601

Figura 3. Formas modales obtenidas y características (*T* es periodo en segundos y *F* es frecuencia en Hz).

3.1.1. Período Fundamental De Vibración Y Frecuencias Naturales

El análisis dinámico de la torre con antenas arroja que el periodo fundamental de vibración del modo 1 es igual a 0,8515 s, valor que se asemeja a los obtenidos por Chaudhary and Pujari [20]. Sharma, et al. [21] aseguran que a medida que aumenta la altura de la torre, la masa comienza a desempeñar un papel más importante que la rigidez de la estructura al reducir la frecuencia natural de la misma. Shwetha Shetty, et al. [22] concuerdan con esta afirmación al comprobarlo en sus estudios. Las frecuencias obtenidas se asemejan a las alcanzadas por Sharma, et al. [21] para torres de 45 m, siendo las frecuencias de los modos de torsión las más elevadas.

Al analizar la torre sin antenas se comprueba que el periodo fundamental de vibración del modo 1 disminuye hasta 0,7967 s y las frecuencias aumentan (Tabla 4); lo que significa que las antenas tienen influencia en el comportamiento dinámico de estas estructuras. López, et al. [23] corroboran este resultado cuando comprueban que las antenas definidas provocan aumentos significativos en los períodos de oscilación de los modos flectores de las cinco torres autosoportadas analizadas. El resultado obtenido confirma lo planteado por Sharma, et al. [21] y Shwetha Shetty, et al. [22], pues aumentaron las frecuencias al disminuir la masa por no considerarse el peso de las antenas.

Tabla 4. Periodos de oscilación y frecuencia naturales en los primeros modos de vibración

Número de Modos		Periodos	Frecuencia
		Sec.	Cyc/sec.
MODAL	1	0,7967	1,2551
MODAL	2	0,7959	1,2563
MODAL	3	0,2274	4,3961
MODAL	4	0,2266	4,4127
MODAL	5	0,1400	7,1401
MODAL	6	0,1227	8,1455
MODAL	7	0,1015	9,8518

3.2. Revisión De Los Requisitos De Servicios

El código americano ANSI/TIA-222-H [7] platea que las deformaciones bajo cargas de servicio en cualquier punto de una estructura, a menos que se requiera lo contrario, no deberán exceder lo siguiente:

- Un desplazamiento horizontal del 3 % de la altura de la estructura.
- Rotación de 4 grados sobre el eje vertical (giro) o cualquier eje horizontal (balanceo) de la estructura.

3.2.1. Desplazamientos Máximos

Los desplazamientos máximos de la estructura para la combinación de servicio de cargas (1) y (2), se muestran en la Tabla 5, los que corresponden a los puntos más elevados de la torre, los mismos están en el orden de 0,036 m (36 mm). Sharma, et al. [21] y Chaudhary and Pujari [20] comprueban que existe un fuerte aumento en el desplazamiento en zonas sísmicas según sea la altura de las torres, el arriostamiento de la misma y el tipo de suelo en la que esté emplazada. Sin embargo, los valores obtenidos por estos para torres de 45 y 60 m son inferiores (19,10 mm y 27,10 mm respectivamente) a las obtenidas en este estudio para una torre de 42 m. En cambio, los desplazamientos obtenidos por estos para torres de 30 m son inferiores a los obtenidos para la torre caso de estudio Moyano de 42 m.

Tabla 5. Desplazamientos máximos por las combinaciones de carga (1) y (2) con presencia de antenas. Fuente: Elaboración propia, 2024

Puntos	Combinaciones	Tipo	U1 (m)	U2 (m)
243	Comb1 Sin Mayorar 100%Sx	Máx	0,03488	0,01066
133	Comb 2 Sin Mayorar 100%Sy	Máx	0,01069	0,03495

El desplazamiento permisible de la torre autoportada modelo Moyano de 42 m es 1,26 m, valor que es superior al desplazamiento calculado, por lo que, la estructura cumple con el requerimiento de servicio de la norma ANSI/TIA-222-H [7]. Este requisito también se cumple en el estudio realizado por Saudi and Aly [13] los que realizaron un análisis dinámico detallado para investigar la respuesta estructural de torres autoportantes bajo cargas sísmicas existente en Egipto según las disposiciones de ANSI/TIA-222-G-2005, para la evaluación estructural adoptaron los métodos estático equivalente, el espectro de respuesta y los métodos de historia temporal. El estudio proporcionó una investigación exhaustiva del comportamiento dinámico de las torres autoportadas existentes ya que utilizaron un modelo numérico validado preciso de la torre para realizar de manera confiable los análisis dinámicos.

3.2.2. Rotación Sobre Los Ejes

Las rotaciones horizontales y verticales de la estructura para la combinación de servicio de cargas (1) y (2), con presencia de antenas se muestran en la tabla 7, las mismas no llegan a un 1 grado, valor inferior al máximo establecido en el requisito de servicio de la norma ANSI/TIA-222-H [7] por lo que la torre caso de estudio cumple con las especificaciones de servicio de esta norma.

Tabla 7. Rotaciones horizontales y verticales por las combinaciones de carga (1) y (2) con presencia de antenas. Fuente: Elaboración propia, 2024.

Puntos	Combinaciones	Tipo	R1 Grados	R2 Grados
133	Comb 1 Sin Mayorar 100%Sx	Máx	0,0135	0,1074
134	Comb 2 Sin Mayorar 100%Sy	Máx	0,0694	0,0431

3.3. Chequeo De Resistencia De Los Elementos Componentes De La Torre

El chequeo de la estructura arroja que sus elementos no fallan por demanda de capacidad; sin embargo, incumplen los requisitos para zonas sísmica que establece la norma ANSI/AISC341-16 [17] para este tipo de estructuras. Como se observa en la tabla 8, todos de los elementos incumplen la relación de ancho - espesor para varias combinaciones, incluso con distintas secciones. El criterio de arriostramiento, aunque en menor medida también es infringido, coincidiendo la mayoría de los elementos con los que incumplen el primer criterio. Los elementos que más incumplen ambos criterios son los tranques, teniendo una mayor incidencia en ellos la combinación 3. La combinación 1 es la que más influye en los elementos de columna y la combinación 3 en los elementos diagonales.

Tabla 8. Elementos estructurales que incumplen los criterios establecidos por la norma americana ANSI/AISC341-16 para estructuras metálicas en zona sísmica.

Combinaciones	Elementos	Sección	Cantidad en Falla	Criterio de Falla	
				Espaciamiento máximo de arriostramiento $Lb/ry > 0.095 * E / (Ry * Fy)$	Relación ancho - espesor (λ_{md})
Comb. 1	Columnas	L 100 x10	3	Incumplen	Incumplen
		C L120x12	5	Incumplen	Incumplen
		C L150x15	4	Incumplen	Incumplen
		C L60x6	2	Incumplen	Incumplen
		CL 70x7	9	Incumplen	Incumplen
Comb. 3		C L90x10	3	Incumplen	Incumplen
		C L150x15	3	Incumplen	Incumplen
Comb. 4		C L150x18	3	Incumplen	Incumplen
		C L150x15	1	Incumplen	Incumplen
		C L150x18	1	Incumplen	Incumplen

Combinaciones	Elementos	Sección	Cantidad en Falla	Criterio de Falla	
				Espaciamiento máximo de arriostramiento $Lb/ry > 0.095 * E / (Ry * Fy)$	Relación ancho - espesor (λ_{md})
Comb. 3	Tranques		26		Incumplen
		L 45x5	41	Incumplen	Incumplen
			4		Incumplen
		L 50x5	13	Incumplen	Incumplen
			2		Incumplen
		L 60x6	6	Incumplen	Incumplen
Comb. 4		L 45x5	14	Incumplen	Incumplen
			30	Incumplen	Incumplen
			5		Incumplen
Comb. 5			1		Incumplen
		L 50x5	7	Incumplen	Incumplen
Comb. 6			1	Incumplen	Incumplen
		L 45x5	2	Incumplen	Incumplen

Combinaciones	Elementos	Sección	Cantidad en Falla	Criterio de Falla	
				Espaciamiento máximo de arriostramiento $L_b/r_y > 0.095 \cdot E / (R_y \cdot F_y)$	Relación ancho - espesor (λ_{md})
Comb.3	Diagonales	D L 60x6	18	Incumplen	Incumplen
			18		Incumplen
			7	Incumplen	Incumplen
		D L 70x7	1		Incumplen
			1		Incumplen
			2	Incumplen	Incumplen
Comb.4		D L 80x8	16	Incumplen	Incumplen
			18		Incumplen
			1		Incumplen
			1		Incumplen
			1	Incumplen	Incumplen

4. CONCLUSIONES

La torre autosoportada modelo moyano de 42 m de altura ubicada en el municipio de yara provincia de granma, localizado en zona sísmica 2 y con una categoría de suelo E según la clasificación de la norma sísmica cubana NC 46, 2017 cumple con las especificaciones de servicio del código americano ANSI/TIA-222-H, pero incumple con los requisitos de resistencia establecido por la norma americana ANSI/AISC341-16 para estructuras de acero. Sin embargo, los elementos no fallan por demanda de capacidad. El 85% de la participación modal de las masas no se encontró en el número de modos estimados por investigaciones internacionales. Se comprobó que la existencia de antenas influye en el comportamiento dinámico de las torres autosoportadas modelo MOYANO aumentando su periodo fundamental de vibración; sin embargo, no tienen la misma influencia en los desplazamientos ya que estos no se modifican significativamente con su presencia.

1. G. P. Martínez, A. H. Hernández, P. M. Rodríguez, and V. E. Parnás, "Revisión de las investigaciones del colapso progresivo.," Revista ciencia y construcción, vol. 2, no. 4, pp. 06-20, 2021. [Online]. Available: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/77>
2. V. E. Parnás, "Fallas estructurales en torres reticuladas para telecomunicaciones.," Revista científica de Arquitectura y Urbanismo, vol. 29, no. 2-3, pp. 57-63, 2008. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/3768/376839855008.pdf>
3. E. D. A. Arias, M. A. P. Flores, L. Á. Barrientos, and J. A. B. Rodríguez, "Nueva valoración sismotectónica de la Región Oriental de Cuba en el contexto geodinámico del Norte del Caribe.," Sexta Convención Cubana de Ciencias de la tierra, GEOCIENCIAS 2015., 2015.
4. NC46. Construcciones sismorresistentes — Requisitos básicos para el diseño y construcción. , O. N. d. N. (NC), 2017.
5. M. A. Iturralde Vinent and E. D. Arango Arias, "Ciudades de Cuba en alerta sísmica," Minería y Geología, vol. 36, no. 4, pp. 366-376, 2020. [Online]. Available: <http://scielo.sld.cu/pdf/mg/v36n4/1993-8012-mg-36-04-366.pdf>
6. M. O. C. Rodríguez, D. C. Barba, and L. Á. Gómez, "Características de las principales áreas sísmicas de Cuba," GEOS, vol. 40, no. 2, 2020. [Online]. Available: <https://geos.cicese.mx/index.php/geos/article/view/60>
7. ANSI/TIA-222-H. Structural Standard for Antenna and Supporting Structures and Antennas, 2018.
8. CAN-CSA-S37-18. Antennas, towers, and antennasupporting structures, N. S. o. Canada, 2020.
9. Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismorresistentes. Parte 6: Torres, mástiles y chimeneas., 2005.
10. G. A. Ghodrati and S. R. Masah, "Seismic response of 4-legged self-supporting telecommunication towers," IJE Transactions B: Applications, vol. 20, no. 2, pp. 107-126, 2007. [Online]. Available: https://www.sid.ir/en/vewssid/j_pdf/85620072b01.pdf
11. N. S. Mehta and H. V. Patel, "Performance of Telecommunications Tower During Seismic and Wind Loading Condition," International Journal of Scientific Research & Engineering Trends, vol. 7, no. 4, 2021. [Online]. Available: https://ijsret.com/wp-content/uploads/2021/07/IJSRET_V7_issue4_509.pdf
12. T. Chandra and S. Sengupta, "Dynamic Analysis of Telecommunication Tower for Optimum Modal Combination and Elemental Discretization," Int. J. Eng. Adv. Technol, vol. 9, pp. 2229-2237, 2019, doi: 10.35940/ijeat.A9720.109119
13. G. N. E. Saudi and E. Aly, "Structural response of a self-supporting tower under seismic loads," Al-Azhar University Civil Engineering Research Magazine (CERM), vol. 39, no. 1, 2017. [Online]. Available: <http://www.azharcermjournal.com/CERMF1701/P17-01-11.pdf>
14. R. A. Oliva et al., "Respuesta sísmica de las torres de comunicación de la provincia Granma, Cuba.," in Nuevas Investigaciones sismológicas en Cuba. , T. J. C. R. L. A. Gómez Ed. La Habana. Cuba: Academia, 2002, p. 37.
15. P. M. Rodríguez and V. E. Parnás, "Análisis sísmico de modelos cubanos de torres autoportadas de telecomunicaciones," Revista Cubana de Ingeniería, vol. 3, no. 2, pp. 25-34, 2012. [Online]. Available: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/86>
16. K. L. García, P. M. Rodríguez, and V. E. Parnás, "Comportamiento dinámico de torres autoportadas.," Revista Ciencia y Construcción, vol. 2, no. 3, pp. 40-51, 2021. [Online]. Available: <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/50>
17. ANSI/AISC341-16. Seismic provisions for structural steel buildings., 2016.
18. K. L. García, K. Maes, V. E. Parnás, and G. Lombaert, "Operational modal analysis of a self-supporting antenna mast," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 209, p. 104490, 2021, doi: 10.1016/j.jweia.2020.104490
19. K. L. García, V. E. Parnás, K. Maes, and G. Lombaert, "Mediciones a escala real de torre autoportada empleando acelerómetros y strain gauges," Ingeniería y Desarrollo, vol. 38, no. 1, pp. 259-278, 2020, doi: <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.531.38>
20. G. Chaudhary and A. Pujari, "Wind and non linear dynamic analysis of self supporting telecommunication tower.," OAIJSE.COM, pp. 93-99, 2021, doi: DOI 10.51397/OAIJSE07.2021.0014
21. K. K. Sharma, S. Duggal, D. K. Singh, and A. Sachan, "Comparative analysis of steel telecommunication tower subjected to seismic & wind loading," Civil Engineering and Urban Planning: An International Journal (CIVEJ), vol. 2, no. 3, pp. 15-17, 2015. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/283850292>
22. M. Shwetha Shetty, M. Anusha, A. Ashwini, and T. Rajiv, "Dynamic analysis of 4-legged steel telecommunication tower," IJCIET, vol. 10, pp. 1535-1550, 2019. [Online]. Available: <http://www.iaeme.com/ijciyet/issues.asp?JType=IJCIET&VType=10&IType=01>
23. V. E. Parnás, A. C. Luzardo, I. F. Lorenzo, A. L. Llanusa, and P. M. Rodríguez. Monografía Metodología de cálculo para torres Atirantada. (2012). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería Civil. Cuba. [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56921377/MonografiaMetodologadecalculoparatorresAtirantada-libre.pdf>