

DUODÉCIMO COLOQUIO DE ANÁLISIS, DISEÑO Y MONITOREO ESTRUCTURAL

Influencia de la tensión de tesado y la presencia de antenas en los estudios de sensibilidad para torres atirantadas

Influence of guy initial stress and antenna masses on sensitivity analysis for latticed guy towers

Bruno J. Clavelo Elena¹, Osmany Hernández Cruz², Patricia Martín Rodríguez³, Vivian Beatriz
Elena Parnás⁴

- 1- Bruno J. Clavelo Elena. Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Cuba. E-mail: brunoclaveloe@civil.cujae.edu.cu
- 2- Osmany Hernández Cruz. Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Cuba. E-mail: hernandez.osmany@gmail.com
- 3- Patricia Martín Rodríguez. Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Cuba. E-mail: patriciamr@civil.cujae.edu.cu
- 4- Vivian Beatriz Elena Parnás. Universidad Tecnológica de la Habana CUJAE, Cuba. E-mail: vivian@civil.cujae.edu.cu

Resumen: Las torres atirantadas son estructuras de vital importancia para la transmisión de señales de radio y televisión en el país. Por sus características, son particularmente susceptibles a las cargas de viento, lo cual ha ocasionado el colapso de varias de estas estructuras. A causa de esto surge la necesidad de profundizar en el estudio de los modelos computacionales empleados para su diseño. La técnica de Análisis Modal Operacional (OMA) es una de las herramientas utilizadas en la actualidad para calibrar los modelos computacionales a partir de la instrumentación de las estructuras con acelerómetros. En este trabajo se realiza el estudio de sensibilidad de una torre atirantada para determinar la cantidad de sensores mínimos a colocar para la caracterización dinámica. El estudio se realiza a partir de la variación de la cantidad de antenas sobre la estructura y la tensión inicial de tesado, parámetros que influyen significativamente en el comportamiento dinámico de estas estructuras. El estudio se realiza mediante la modelación computacional empleando un software de elementos finitos y su interacción con el asistente matemático MatLab.

Abstract: *Latticed guy towers are structures of vital importance for radio and television broadcasting in the country. Due to their characteristics, these are particularly vulnerable to wind loads, leading to the partial or total collapse of several of these constructions. Therefore, there is a need to deepen the study of the computational models used in its design. Operational Modal Analysis technique is one of the current methods employed to calibrate the computational models from real structures measurements using accelerometers. In this investigation, sensitivity studies are applied to a guyed mast in order to determinate*

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



the minimal amount of sensors required for dynamic characterization. The study is performed while varying the amount of antennas on the structure and the initial guy tension, parameters that influence significantly the dynamic behavior of such constructions. The study is performed using finite elements models and their interaction with mathematical assistant MatLab.

Palabras claves: Análisis Modal Operacional; Elementos Finitos; Dinámica; Torres atirantadas; Cables.

Keywords: Operational Modal Analysis; Finite Elements; Dynamics; Latticed guy towers; Guys.

1. Introducción

Las torres atirantadas son un tipo especial de estructura de uso común en la industria de la radiodifusión y como soporte de antenas para la televisión y la telefonía. Por sus características, son particularmente susceptibles a las cargas de viento, lo cual ha ocasionado el colapso de varias de estas estructuras. A causa de esto surge la necesidad de profundizar en el estudio de los modelos computacionales empleados para su diseño. La técnica de Análisis Modal Operacional (OMA) es una de las herramientas utilizadas en la actualidad para calibrar los modelos computacionales a partir de la instrumentación de las estructuras con acelerómetros (Friswell, Mottershead, & Ahmadian, 2001; Jaishi, Kim, Kyum Kim, Ren, & Lee, 2007; Simoen, 2013). El primer paso para la realización de esta técnica es la obtención de las características dinámicas de la estructura a partir de realizar un análisis modal al modelo computacional, por esta razón es de gran importancia la identificación de las características modales de las torres atirantadas antes de la realización de los ensayos a escala real.

La caracterización dinámica de las torres atirantadas ha sido investigado por varios autores (M. K. S. Madugula, 2002) (Blachowski, September 2-5, 2003.). (M. Madugula, Wahba, & Monforton, 1998) (G.G Amiri, 1997) (Grey, 2006). Estos autores coinciden que las torres atirantadas, a diferencia de las estructuras convencionales, presentan veinte o más modos activos cuando son excitadas por los vientos turbulentos y/o sismo debido a la presencia de los cables que le confieren un alto comportamiento no lineal geométrico.

Las formas de los modos de una torre atirantada, se pueden clasificar en dos grupos: el primer grupo incluye formas de modo que involucran solamente vibraciones de los cables y el segundo grupo incluye formas de modo que involucran vibraciones del mástil y los cables (Blachowski, September 2-5, 2003.) Según Amiri (G.G Amiri, 1997), las formas de los modos dominantes de una torre atirantada están fuertemente influenciadas por la configuración del arriostramiento y la rigidez lateral relativa de los distintos niveles de cables.

Madugula, Wahba and Monforton (M. Madugula et al., 1998) investigaron las frecuencias naturales de seis torres atirantadas, utilizando el método de elementos finitos considerando el efecto no lineal. El estudio

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



consistió en el análisis de la influencia de la formación de hielo, la tensión inicial del cable y la presencia de antitorsos en las frecuencias naturales de estas estructuras. Las torres fueron modeladas utilizando el programa computacional ABAQUS y las masas de las antenas y parábolas fueron aplicadas como masas agrupadas adicionales, situadas en su posición de montaje en el fuste. Las tensiones iniciales de los cables de las seis torres atirantadas fueron variadas de 8% a 15% y se mostró que un cambio en la tensión inicial de los cables afecta las frecuencias naturales de la torre hasta un 35%. Para la verificación de los modelos de elementos finitos fueron fabricados dos modelos de torres de celosía a escala y probados en una mesa de vibración, especialmente diseñada para examinar torres atirantadas. Los resultados experimentales estuvieron acordes con los resultados del análisis de elementos finitos. Las principales conclusiones obtenidas fueron que la altura del fuste tiene mayor efecto sobre la frecuencia natural más baja de las torres atirantadas; un aumento de la tensión inicial de los cables resulta en un aumento significativo en sus frecuencias naturales; y el efecto de los antitorsos sobre el comportamiento dinámico general de las torres es insignificante, menos del 5%.

Amiri (G. G. Amiri, 1997) realizó un análisis de las frecuencias de ocho torres atirantadas de diferentes alturas a partir de la deformación debido al peso propio y pretensado del cable (tensión inicial). Entre las conclusiones del trabajo de Amiri estuvo que la torre de 200 m de altura tiene más modos torsionales que las otras torres en sus cinco modos más bajos. Según Amiri, esto ocurre porque la torre es más flexible, debido a que la tensión inicial de los cables es relativamente pequeña, comparadas con las tensiones de las demás torres.

Grey (Grey, 2006) realizó un estudio similar al de Amiri (G. G. Amiri, 1997), acerca del análisis modal para cuatro modelos de torres basado en la rigidez a partir del análisis no lineal alcanzado, considerando el peso propio de la torre y la tensión inicial de los cables, el programa de análisis estructural utilizado fue el SAP-2000. Las alturas de las torres eran entre 99.88m y 313.6m, las masas de los cables oscilaban entre el 15% y 30% de la masa total de la estructura. Grey [6] graficó los períodos flectores más significativos contra las alturas de las torres y trazó la línea de tendencia de los puntos (trend line). En el mismo gráfico añadió la línea de tendencia de Amiri (G. G. Amiri, 1997) que fue determinada en un estudio similar para poder hacer una comparación de los resultados. La línea obtenida por Grey, tenía una diferencia en comparación con la de Amiri, según Grey esto se debió a que Amiri no incluyó las masas auxiliares. Grey, indicó que la masa adicional causó el aumento en el período natural de la estructura y eso provocó las diferencias.

Luego de identificadas las características modales iniciales de la estructura a través de la utilización de un modelo computacional es necesario realizar un estudio para la colocación de los sensores sobre la estructura. Los sensores pueden ser acelerómetros y/o *strain gauges* los cuales deben estar correctamente ubicados para cumplir con la buena observación en el momento de la realización del ensayo a escala real. Cuando se colocan los sensores en puntos nodales, definiendo estos como puntos donde las formas modales presentan cruces, los datos registrados no proveen información válida para algunos modos, específicamente

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



para los modos donde los nodos coincidieron con la posición de los sensores. Otra razón para elegir adecuadamente la posición de los sensores es que su realización incorrecta puede llevar a obtener modos muy similares debido a la pobre distribución espacial de los sensores. La elección de la posición de los sensores depende de la cantidad de sensores disponibles y la información de las formas modales que se quiere investigar. Existen algunos criterios básicos para la instalación de los sensores a priori. Rainieri en su libro (Rainieri and Fabbrocino 2014) plantea que, si se asume que al menos existen un par de modos cercanos espaciados, en particular en el caso de estructuras débilmente excitadas, los modos fundamentales pueden ser adecuadamente identificados con al menos 6-8 sensores. Una de las técnicas que permite verificar la ubicación de los sensores son los valores AutoMAC. La matriz AutoMAC permite relacionar las formas modales obtenidas en diferentes puntos de la torre, para lo cual es necesario realizar inicialmente la caracterización dinámica en cuanto a frecuencias y formas modales de oscilación (Maes et al., 2016).

En este trabajo se realiza el estudio de sensibilidad de una torre atirantada para determinar la cantidad de sensores mínimos a colocar para la caracterización dinámica utilizando la técnica de AutoMAC. El estudio se realiza a partir de la variación de la cantidad de antenas sobre la estructura y la tensión inicial de tesado, parámetros que influyen significativamente en el comportamiento dinámico de estas estructuras.

2. Metodología

Características de la estructura estudiada y detalles de la modelación computacional.

La torre seleccionada para el estudio fue el modelo "Santa Clara" el cual corresponde a una torre atirantada de telecomunicaciones existente en Cuba y ubicada en la provincia de Villa Clara. La torre posee un fuste vertical de 198 m de altura, el cual se encuentra arriostrado mediante cuatro niveles de cables espaciados radialmente cada 120° . El fuste tiene sección triangular equilátera de 2.1 m de lado compuesta por tranques y diagonales constituidos por perfiles angulares; y columnas redondas macizas de sección variable. Se eleva a una altura total de 215.1 m sobre el nivel de terreno y presenta en el tope una torreta de sección transversal cuadrada de 0.7 m de lado, compuesta por columnas, diagonales cruzadas y tranques espaciados cada 0.81 m, en todos los casos perfiles angulares L60x60x6. Las características geométricas de la estructura y la distribución de los cables se representan en la fig. 1.

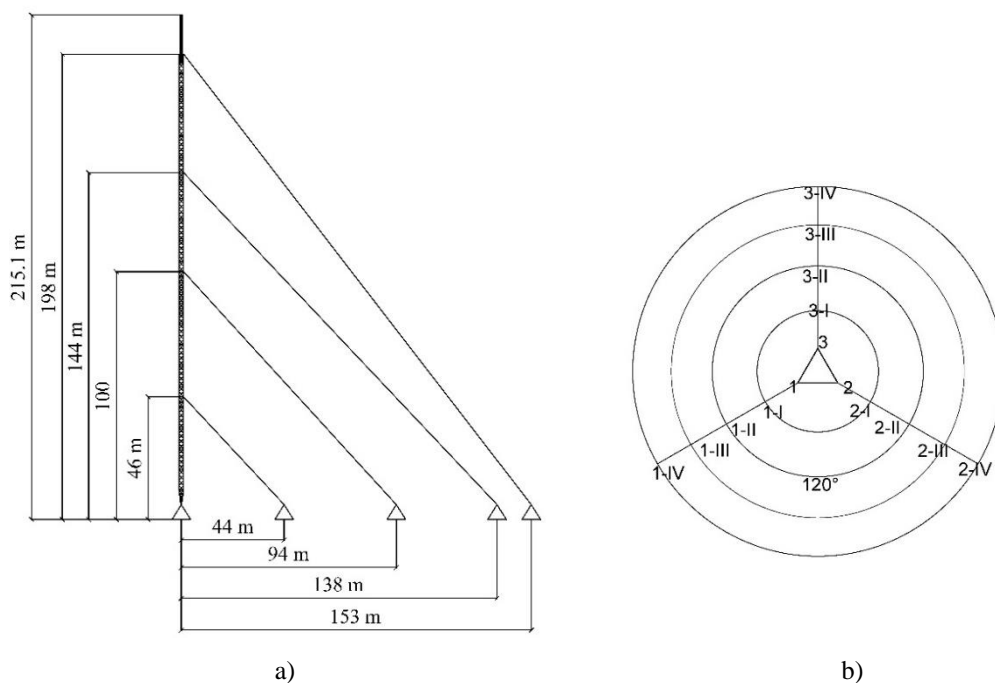


Figura 1. Torre Santa Clara. a) Elevación de la torre b) Disposición de los cables

El fuste posee sección transversal con forma de triángulo equilátero constante en toda su altura a excepción de los seis primeros metros en la zona más cercana a la base, donde la sección transversal comienza a reducirse hasta convertirse en una sección triangular de lado 0.32 m, la cual se encuentra articulada al suelo en sus tres vértices.

El fuste está compuesto por tres columnas circulares macizas continuas desde la base hasta el tope y arriostradas por diagonales cruzadas en ambos sentidos y tranques horizontales espaciados cada 9.12 m en cada una de las caras. En las zonas cercanas a los niveles de anclaje de los cables, el fuste está reforzado mediante tranques adicionales espaciados cada 2.28 m; mientras que cada la sección transversal en cada nivel de cable se encuentra reforzada con un tranque compuesto por un perfil doble angular 2x L105x80. En la tabla 1 se muestran las características de los elementos que conforman el fuste para las diferentes alturas.

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



Tabla 1. Características de los elementos que conforman el fuste para los diferentes tramos.

Elementos componentes.				
Alturas (m)	Columnas (mm)	Diagonales (mm)	Tranques (mm)	Tranques adicionales (mm)
0.0-6.13	Ø125	L65x55x8	L65x55x6 espaciados cada 9.12 m	-
6.13-101.89	Ø 108			L80x90x6 (42.61m, 47.17m, 83.65m, 85.93m, 90.49m, 92.77m, 95.05m, 101.89m)
101.89-198	Ø 130			L80x90x6 (140.65m, 117.13m, 181.69m, 193.09m, 194.19m, 195.69m)
Torreta (198-215.1)	L60x60x6	L60x60x6	L60x60x6	-

La estructura está rigidizada lateralmente por la presencia de 4 niveles de cables distribuidos en tres direcciones radiales, espaciados cada 120° entre sí. Los cables están anclados a tierra mediante cimentaciones ubicadas a 44 m, 98 m, 138 m y 153 m de la base del fuste. Las características de los cables se exponen en la tabla 2.

Tabla 2. Características de los cables

Viento	Altura	Dist. horiz. metros	Angulo con la torre		Tipo de cable	Diámetro mm	Carga de Rotura, Fu* kN
	m		radianes	grados			
1	46,01	45	0,77	44,36	1x30+0	30	1000
2	100,73	94	0,75	43,02	1x30+0	30	1000
3	144,05	138	0,76	43,77	1x30+0	30	1000
4	198,07	153	0,66	37,68	1x37+0	38	1406

*Los datos de carga de rotura son proporcionados por el fabricante.

La descripción de las tipologías de antenas y su ubicación sobre la torre Santa Clara se muestran a continuación:

Antenas UHF: 56 antenas, ubicadas en la torreta en voladizo, direccionadas en las cuatro caras. En cada cara hay ubicadas 14 antenas y los puntos de arriostre entre las antenas y el mástil están espaciados cada 2.43 m. Las antenas son de tipo Eckträger, Kantenmaß 670 mm de ancho y de 900 mm de altura, 17 kg de peso.

Antenas VHF: 18 antenas de 100 kg de peso, ubicadas en las alturas correspondientes de la torre, ubicadas en los vértices de la torre (Ver fig. 2). Las antenas son de tipo Dos Dipolos Band AT13-243 (RYMSA) y tiene un ancho de 1000 mm, altura de 2900 mm y espesor de 530 mm.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
 "II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
 CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

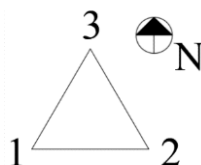


Figura 2. Vértices y posicionamiento de la torre respecto al norte geográfico

Los detalles de la ubicación y peso de las antenas sobre la estructura se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Posición y distribución en altura de las antenas.

Antenas	Peso (kg)	Cantidad	Altura (m)	Vértice
UHF	17	8	201,5000	-
UHF	17	8	203,9300	-
UHF	17	8	206,3600	-
UHF	17	8	208,7900	-
UHF	17	8	211,2200	-
UHF	17	8	213,6500	-
UHF	17	8	215,1	-
VHF	100	2	92,77	1 y 2
VHF	100	3	95,05	1,2 y 3
VHF	100	3	97,33	1,2 y 3
VHF	100	1	161,17	3
VHF	100	13	165,73 – 193.09 (cada 2.28m)	3
VHF	100	1	177,13	3
VHF	100	1	194,19	3
VHF	100	1	195,69	3
VHF	100	1	197,05	3

La modelación y análisis de las torres se llevó a cabo a través del programa de análisis estructural SAP 2000 (versión 16) basado en el método de elementos finitos. Las torres fueron modeladas como una armadura espacial, reproduciendo de forma detallada cada miembro de la armadura conformando la estructura tridimensional de sección triangular equilátera. La estructura en su conjunto se consideró con 6 grados de libertad. Los elementos de la armadura fueron modelados como barras, elementos lineales con dos nudos extremos. Las características de la sección de los elementos de la armadura se introducen en el programa, el cual de forma automática determina las propiedades geométricas (área, inercia, etc.).

Las columnas se consideraron continuas desde la base hasta la cima, debido a que las uniones entre ellas son a tope con doble plancha y ocho pernos en el sentido longitudinal, lo cual permite considerar una adecuada transmisión de los momentos flectores. Las columnas se encuentran arriostradas por los tranques los cuales disminuyen la longitud de pandeo del elemento y rigidizan la estructura. Las uniones entre tranques y columnas, diagonales y columnas y diagonales y tranques se consideró articulada, debido a que en todos los casos la unión entre estos elementos se realiza mediante uno o dos pernos en dependencia de la torre en cuestión. Las condiciones de apoyo fueron consideradas articuladas, debido a que las columnas

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



en la base presentan una unión mediante pasadores a un soporte metálico anclado a la base de hormigón, la cual permite el giro respecto al eje vertical.

El material que conforma los elementos de todas las torres es acero de calidad A-36 (Tensión de fluencia 250 MPa, Tensión de rotura 310 MPa), el módulo de elasticidad del material o módulo de Young (E) es de $2 * 10^5$ MPa); sus propiedades se consideraron linealmente elásticas y constantes en el tiempo. El valor de la resistencia del acero no es significativo en el análisis del estudio realizado.

En el caso de los cables, los mismos fueron modelados siguiendo la formulación elástica catenaria que representa el cable bajo las cargas de peso propio y fuerzas impuestas de pretensado. Los cables se representan como elementos lineales entre dos puntos (anclaje a tierra y amarre a la torre) cuyo peso propio es automáticamente determinado por el programa y calculada la flecha correspondiente de acuerdo a este valor y al pretensado sobre el mismo. A partir de esta fuerza impuesta y considerando el peso propio de los elementos, el programa genera la geometría inicial de la estructura para obtener la matriz rigidez inicial del conjunto a partir de la cual se desarrolla el análisis. Para ello se impone una fuerza en el extremo del cable que se encuentra unido al anclaje, de igual valor a la fuerza de tesado inicial, 10% de la carga de rotura, valor medio que recomienda Smith (Smith, 2007). Esta fuerza se aplica de manera iterativa mediante un análisis no lineal hasta alcanzar el equilibrio entre la deformada y la tensión fijada en el extremo. De esta manera se obtiene un estado inicial de equilibrio de la estructura a partir del tesado de los cables y el peso propio de los elementos de la torre. El tesado (tensión inicial) de los cables, se consideró como una fuerza impuesta (pretensado) y se definieron 3 valores diferentes: 5%, 10% y 15% de la carga de rotura especificada por el fabricante, para cada modelo, con el objetivo de tener en cuenta la variación de las formas modales de la estructura producto de la relajación gradual de los cables con el tiempo, o un sobretesado de los cables durante la etapa constructiva de la torre, respectivamente.

Los estados iniciales establecidos para todas las torres en el análisis modal son:

- Estado inicial # 1 (5% Tensión Inicial - Sin Antenas)
- Estado inicial # 2 (10% Tensión Inicial - Sin Antenas)
- Estado inicial # 3 (10% Tensión Inicial - Sin Antenas)
- Estado inicial # 4 (5% Tensión Inicial - Con Antenas)
- Estado inicial # 5 (10% Tensión Inicial - Con Antenas)
- Estado inicial # 6 (15% Tensión Inicial - Con Antenas)

Análisis Modal

El análisis modal fue realizado a la torre objeto de estudio con el objetivo de obtener sus características dinámicas e identificar la influencia que poseen en estas características la presencia de antenas y la variación de la tensión inicial en los cables. El análisis modal está basado en la rigidez, el amortiguamiento y la masa de la estructura, se basa en el hecho de que las respuestas de las vibraciones de un sistema dinámico invariante en el tiempo pueden ser expresadas como la combinación lineal de un conjunto de movimientos armónicos simples llamados modos naturales de vibración. Los modos naturales de vibración son inherentes

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



a un sistema dinámico y son determinados completamente por sus propiedades físicas (masa, amortiguamiento y rigidez) y su distribución espacial (He & Zhi-Fang, 2001).

El análisis modal fue realizado empleando como herramienta el software de análisis de estructuras SAP-2000 versión 16. Este software proporciona dos métodos para la realización de análisis modal: el método de Eigenvectors (Vectores Propios) y el Método de Ritz. En este trabajo se utilizó el método de Eigenvectors, debido a que el mismo determina la forma de los modos de vibraciones libres sin amortiguamiento (vectores propios) y las frecuencias propias (valores propios) de la estructura. Las masas de cada elemento y de las antenas fueron concentradas en los puntos de intersección de las columnas de la torre con los tranques y las diagonales, para evitar la formación de modos locales que no aportan información de la estructura en su conjunto.

Fueron seleccionados dos aspectos fundamentales que permiten caracterizar el comportamiento dinámico de las torres: períodos de oscilación y por ciento de participación de las masas según cada modo. Los porcentajes de participación de la masa están determinados por la importancia relativa de cada modo en la respuesta dinámica de la estructura (Computers and Structures, 2007). Estos valores representan el grado en que la respuesta dinámica es excitada por un modo específico. El factor de participación (L_i) y la masa modal (M_i) se definen según las ecuaciones 1 y 2.

$$L_i = \sum_j^n m_j a_{ij}$$

Ecuación 1

$$M_i = \sum_j^n m_j a_{ij}^2$$

Ecuación 2

Donde:

m_j = masas concentradas

a_{ij} = desplazamiento de la masa j en el modo i

La relación $\frac{L_i^2}{M_i}$ puede entenderse como la cantidad de masa que tiene participación en una respuesta modal específica. La relación de participación de la masa para un modo dado se calcula con la expresión de la ecuación 3.

$$r_i = \frac{L_i^2 / M_i}{M_{\text{total}}}$$

Ecuación 3

Donde M_{total} es la masa total del sistema. Estas relaciones son expresadas en porcentaje.

La herramienta SAP 2000 utilizada para este análisis, permite fijar la cantidad de modos de vibración que se requieran analizar, logrando la obtención de los períodos de oscilación y el por ciento de participación

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



de la masa que involucra cada uno de los modos. El análisis modal de las torres fue considerado hasta el modo número 15.

Definición de parámetros para estudio de sensibilidad en la colocación de los acelerómetros

En la segunda parte del trabajo se realiza un estudio de sensibilidad para la colocación de acelerómetros utilizando la técnica de los valores AutoMAC con el objetivo de determinar la cantidad mínima de sensores a colocar en esta estructura al variar la tensión de los cables en 5%, 10% y 15%, considerando la carga de antenas sobre la estructura.

La ubicación de los sensores es un aspecto fundamental para el procesamiento de las señales y la identificación de parámetros modales cuando se realiza un ensayo a escala real. Cuando se colocan los sensores en puntos nodales, definiendo estos como puntos donde las formas modales presentan cruces, los datos registrados no proveen información válida para algunos modos, específicamente para los modos donde los nodos coincidieron con la posición de los sensores. Otra razón para elegir adecuadamente la posición de los sensores es que un posicionamiento incorrecto puede llevar a obtener modos muy similares debido a la pobre distribución espacial de los sensores. La elección de la posición de los sensores depende de la cantidad de sensores disponibles y la información de las formas modales que se quiere investigar. Existen algunos criterios básicos para la instalación de los sensores a priori. Rainieri en su libro (Rainieri and Fabbrocino 2014) plantea que, si se asume que al menos existen un par de modos cercanos espaciados, en particular en el caso de estructuras débilmente excitadas, los modos fundamentales pueden ser adecuadamente identificados con al menos 6-8 sensores.

La determinación de los valores de AutoMAC está basada en los conceptos de Criterio de Garantía Modal (MAC, siglas en inglés) definida como la forma numérica más usada para cuantificar la correlación entre modos (Allemang & Brown, 1982; Marwala, 2010; Simoen, 2013). Se puede emplear para relacionar formas modales medidas $\bar{\phi}_j$ y formas modales obtenidas computacionalmente ϕ_i , como una herramienta en la calibración de modelos.

$$MAC(\phi_i, \bar{\phi}_j) = \frac{|(\mathbf{L}\phi_i)^T \bar{\phi}_j|^2}{\|\mathbf{L}\phi_i\|_2^2 \bar{\phi}_j^2}$$

Ecuación 4

En la expresión 4 el vector \mathbf{L} se encarga de seleccionar los mismos grados de libertad de las formas modales medidas y las computacionales para poder comparar. Los valores MAC brindan una medida de la consistencia entre dos vectores, es decir ofrecen un criterio de la linealidad entre estos. Sus valores se encuentran entre 0 y 1, representando una inconsistente o perfecta consistencia entre los vectores, respectivamente. Por otra parte, los valores AutoMAC permiten verificar si es correcta la elección de la posición de los sensores. Dichos valores relacionan dos posiciones medidas, de ahí el término Auto. La matriz AutoMAC es una matriz simétrica caracterizada por valores iguales a la unidad en su diagonal. Si se seleccionan dos puntos y su valor AutoMAC es cercano a la unidad significa que los puntos

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



seleccionados están captando el mismo modo, lo cual no es conveniente. De forma inversa, si los valores son cercanos a cero significa que los puntos están captando modos diferentes, siendo esta una buena selección de puntos para la colocación de los acelerómetros. De forma general, se dice que cuando se obtienen valores AutoMAC menores a 0.5 las posiciones son correctas (Maes et al., 2016). Este criterio fue adoptado en el trabajo para el estudio de la sensibilidad de sensores en la torre estudiada. El criterio inicial para la colocación de los acelerómetros estuvo basado en la ubicación equidistante de los sensores en función de la altura de las torres y en las formas modales. La obtención de valores de AutoMAC se realizó usando el programa MatLab y su interacción con SAP 2000.

3. Resultados y discusión

El estudio realizado se dividió en dos partes; en la primera se realizó una caracterización dinámica de la estructura, a partir de los valores de períodos de oscilación, el porcentaje de masa involucrado en la respuesta y las características de los modos. El análisis modal fue realizado a la torre objeto de estudio, con la finalidad de obtener sus características dinámicas generales y establecer criterios en cuanto a su comportamiento, a partir de la comparación de los resultados obtenidos en estudios internacionales. Además, se evaluó la influencia de la presencia de antenas, a través de la comparación con los modelos sin considerar las antenas (SA) y la influencia de la variación de las tensiones iniciales (5, 10, y 15%) de los cables en el comportamiento dinámico de las torres estudiadas para poder determinar el grado en que estas variaciones afectan su respuesta dinámica.

La segunda parte del estudio consiste en la realización de un análisis de sensibilidad a partir de las características modales identificadas, con el objetivo de determinar la cantidad mínima de sensores a colocar sobre la estructura, así como su posición, para obtener una adecuada identificación de los modos naturales de vibración. Para este estudio se consideró en todos los casos la presencia de antenas sobre la estructura, debido a que el objetivo es utilizar estos resultados para perfeccionar la instrumentación de estructuras reales, las cuales presentan antenas en todos los casos.

Caracterización dinámica

Para las 6 variantes consideradas, se realizó un análisis modal basado en la rigidez obtenida del estado inicial. Este análisis permite obtener las características generales del comportamiento dinámico de la torre a partir de sus frecuencias, formas modales y la participación de la masa. En la tabla 4 se muestra un ejemplo de los datos generales de los períodos de oscilaciones y porcentos de participación de la masa, empleados en el estudio.

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



Tabla 4. Características modales para el Estado Inicial No. 2 (10% T.I – SA)

Tipo de Modo	Modo	Período (s)	% participación			Suma % participación			% participación			Suma % participación		
			UX	UY	UZ	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ	RX	RY	RZ
1F	1	1,21413	37%	0%	0%	37%	0%	0%	1%	51%	0%	1%	51%	0%
	2	1,20376	0%	39%	0%	38%	40%	0%	52%	1%	0%	52%	52%	0%
1T	3	1,07988	1%	0%	0%	38%	40%	0%	0%	0%	90%	52%	52%	91%
2F	4	0,96434	13%	0%	0%	51%	40%	0%	0%	0%	0%	52%	52%	91%
	5	0,93356	0%	15%	0%	51%	54%	0%	0%	0%	0%	53%	52%	91%
3F	6	0,81977	26%	1%	0%	77%	55%	0%	0%	6%	0%	53%	58%	91%
	7	0,8054	0%	24%	0%	77%	79%	0%	6%	0%	0%	58%	58%	91%
4F	8	0,65984	6%	0%	0%	83%	79%	0%	0%	4%	0%	58%	62%	91%
	9	0,63655	0%	4%	0%	83%	83%	0%	4%	0%	0%	63%	62%	91%
5F	10	0,4876	5%	0%	0%	88%	83%	0%	0%	13%	2%	63%	75%	94%
2T	11	0,48382	3%	1%	0%	91%	84%	0%	2%	8%	3%	65%	83%	97%
6F	12	0,4798	0%	8%	0%	92%	92%	0%	20%	1%	0%	85%	84%	97%

Se puede observar como los dos primeros modos de vibración conforman el primer modo a flexión de la estructura, siendo estos modos acoplados y cada uno actúa en una de las direcciones “x” o “y”. Luego se observa un modo a torsión, con el 90% de la masa involucrada en la rotación alrededor del eje vertical “z” los siguientes 6 modos de la estructura conforman modos acoplados bien definidos con flexión predominante en “x” o “y”. El 90% de participación de la masa en todos los sentidos se logra al alcanzar los 12 modos, de los cuales los modos 10 y 11 son modos flexotorsores.

En la fig. 3 y 4 se aprecia como al considerar la presencia de antenas como masas concentradas sobre la estructura durante el análisis modal, aumentan los valores del período tanto para los modos flectores como para los modos torsores, siendo mayor la variación en los primeros modos y disminuyendo hacia los últimos modos flectores y torsores. Esto se debe a que los primeros modos involucran un mayor porcentaje de la masa en la respuesta estructural, lo que ocasiona mayor variación de la respuesta a medida que aumenta la masa. Las mayores variaciones obtenidas en los períodos de vibración fueron del 4,7% y del 3,7% para los primeros modos flector y torsor, respectivamente.

Independientemente de la variación de los períodos, tanto considerando como no considerando la presencia de antenas sobre la estructura, en ambos casos fue necesario considerar 12 modos en total para lograr involucrar más del 90% de la masa en la respuesta dinámica de la torre.

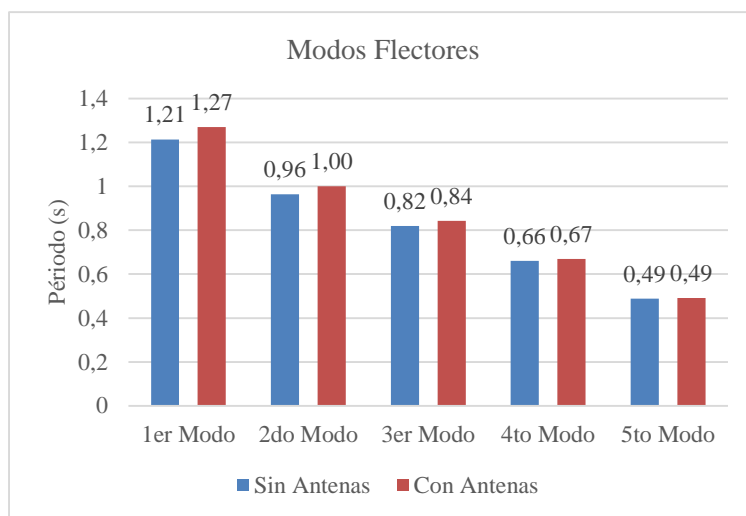


Figura 3. Períodos de los modos a flexión para 10% Tensión Inicial en los cables

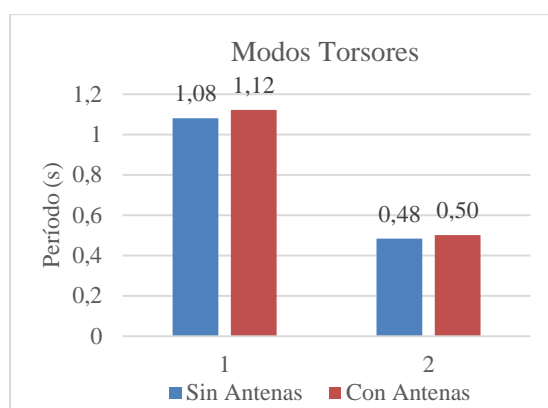


Figura 4. Períodos de los modos a torsión para 10% Tensión Inicial en los cables

En las fig. 5 y 6 se reflejan los valores de los períodos y el porcentaje acumulado de participación de la masa, obtenidos para los cinco primeros modos flectores al variar la tensión inicial en los cables empleando los valores de 5, 10 y 15%. Se puede apreciar como en los dos primeros modos, que presentan mayor porcentaje de masa involucrada, a medida que aumenta la tensión en los cables se reducen los períodos de los modos flectores; mientras que en los tres restantes modos flectores, al aumentar la tensión de 5% a 10% ocurre una disminución de los períodos, pero al aumentar la tensión de 10 a 15% el valor de los períodos vuelve a aumentar. Este comportamiento puede estar debido a que, al aumentar la tensión en los cables aumenta la rigidez al desplazamiento lateral de la estructura, lo cual ocasiona una disminución de los períodos en los modos más generales de la estructura, sin embargo, los modos con menor porcentaje de participación de la masa, se ven afectados de forma diferente por el aumento de rigidez. En todos los casos el mayor valor de períodos se obtuvo para el 5% de tensión inicial en los cables, a excepción del 5to modo flector, donde esto

**II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



ocurre para el 15% de tensión inicial. A partir de la fig. 6 podemos observar que los mayores porcentos de participación de la masa se obtienen para el valor de tensión inicial del 5%, mientras que los menores valores se obtienen igualmente en todos los casos para el 15% de tensión inicial. No obstante este comportamiento en el porcentaje de participación de la masa, en ningún caso se observó una variación superior al 5% en los valores observados, por lo que se puede afirmar que no hay variación significativa en la masa involucrada en la respuesta dinámica de la estructura al variar la tensión inicial en los cables.

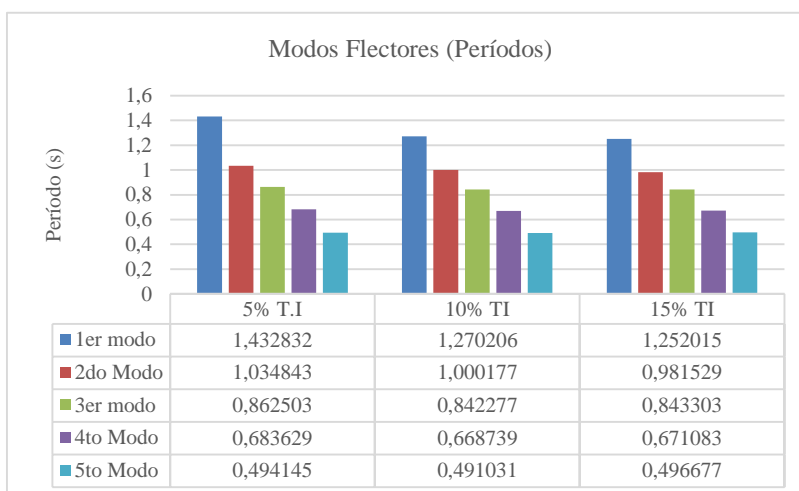


Figura 5. Períodos de oscilación de los cinco primeros modos flectores para diferente valor de la tensión inicial.

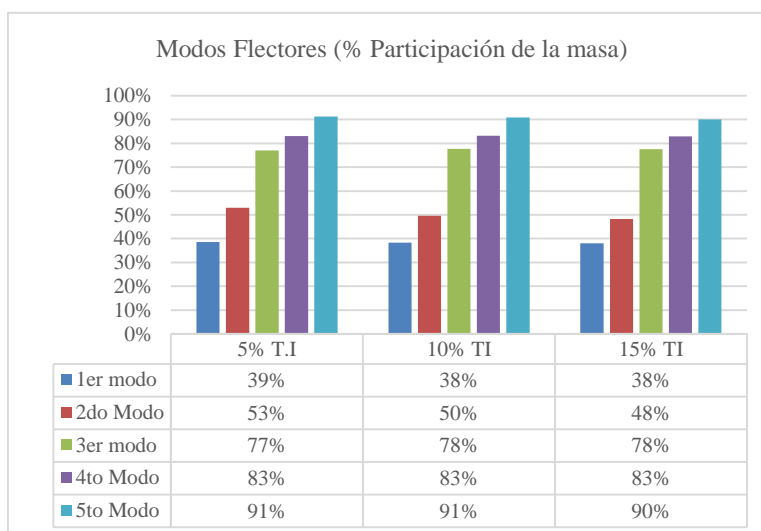


Figura 6. Porcentaje de participación de la masa en los cinco primeros modos flectores para diferente valor de la tensión inicial.

Estudio de sensibilidad para colocación de acelerómetros

Para el estudio de la posición y cantidad de sensores a ubicar en la estructura para lograr una adecuada identificación de sus formas modales, se utilizó la variante de Estado Inicial #5, la cual contempla la estructura con la carga de tesado de diseño (10% de la Tensión Inicial de rotura de los cables) y con presencia de antenas como masas concentradas en el fuste y en el mástil. Esta variante se corresponde con la condición de diseño recomendada para tensión en el cable (Smith, 2007); así como la condición real de masas concentradas en la estructura real, producto de la presencia de las antenas.

La fig. 7 muestra las formas modales para este Estado Inicial, tanto para los modos flectores en "x" y "y", como para los modos torsores. Las líneas rojas discontinuas representan la altura a la que se encuentran ubicados los niveles de cable sobre el fuste de la torre. A partir del estudio de las formas modales se seleccionaron aquellas alturas donde los modos flectores no presentaran cruces con el eje vertical de la torre, así como aquellas alturas donde no se interceptaran las formas modales entre sí, debido a que podría obtenerse demasiada correspondencia entre dichos modos y por ende, dificultarse su identificación. Otro de los parámetros considerados para la selección de los puntos sobre la estructura fue el espaciamiento equidistante entre los puntos y que los puntos se encontraran ubicados en nodos de la estructura donde coincidieran columnas con diagonales y/o tranques.

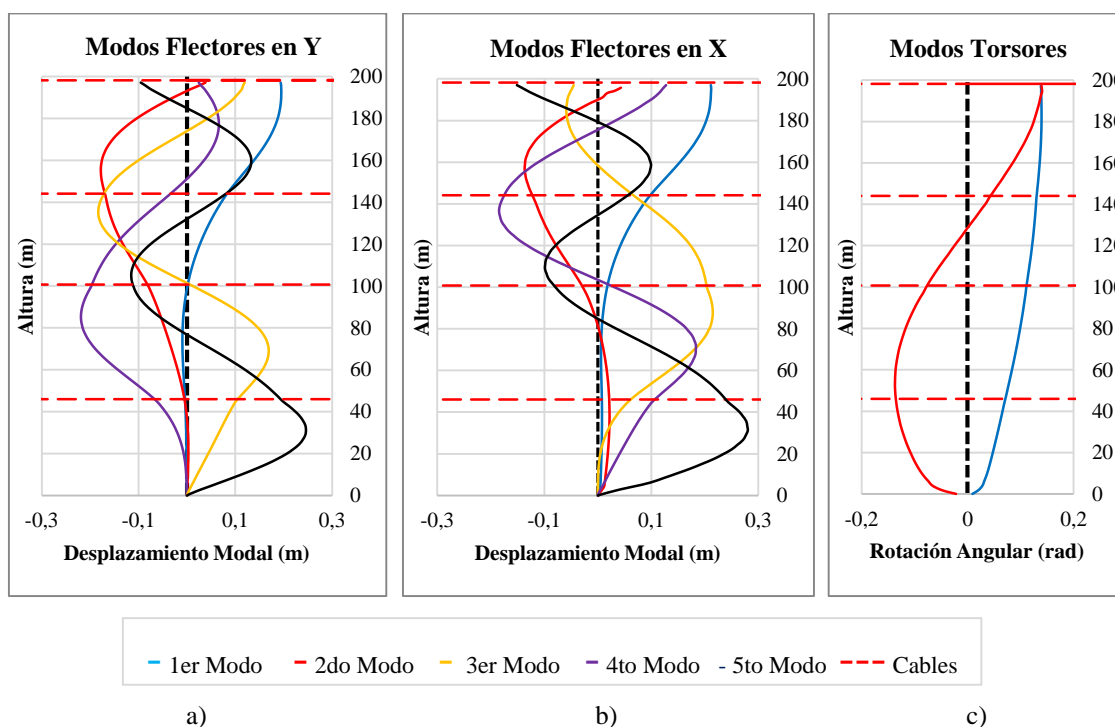


Figura 7. Formas modales obtenidas para el Estado Inicial #5 (10% TI - CA). a) Modos flectores en "y", b) Modos flectores en "x", c) Modos torsores.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
 "II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
 CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Como se puede observar, en los dos niveles de cables intermedios se aprecia una intercepción de las formas modales, así como cruces en algunos casos, por lo que se evitarán estas alturas en la selección de los puntos. En el caso del primer nivel de cable (46.00 m) los modos flectores sí se aprecian bien diferenciados, tanto para la torsión como para la flexión. El tope de la estructura (198.00 m) presenta de manera general modos bien diferenciados entre sí para los modos flectores principales. A partir del estudio se identificaron las alturas de 198.00 m, 165.73 m, 136.09 m, 95.05 m y 46.00 m como puntos adecuados para la colocación de sensores. En cada una de estas alturas se consideró un total de tres sensores: un sensor en el vértice 2, en la dirección del eje "x", y dos sensores en la dirección del eje "y", ubicados en los vértices 1 y 2 respectivamente, con el objetivo de poder registrar además la torsión en las secciones. Las alturas escogidas para la posición de los sensores y la cantidad total de puntos de medición para cada variante analizada se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Valores de AutoMAC para distintas variantes de configuración de sensores.

Variante	Cantidad de alturas medidas	Alturas medidas (m)	Cantidad de acelerómetros	Mayor valor de AutoMAC obtenido
1	5	46 - 95.05 - 136.09 - 165.73 - 198	15	0,41
2	4	46 - 136.09 - 165.73 - 198	12	0,56
3	4	46 - 95.05 - 165.73 - 198	12	0,31
4	4	46 - 95.05 - 136.09 - 198	12	0,49
5	4	95.05 - 136.09 - 165.73 - 198	12	0,45
6	3	95.05 - 136.09 - 198	9	0,70
7	3	95.05 - 165.73 - 198	9	0,80
8	3	46 - 165.73 - 198	9	0,42
9	3	95.05 - 136.09 - 198	9	0,55
10	3	95.05 - 165.73 - 198	9	0,80
11	3	136.09 - 165.73 - 198	9	0,76

A partir del análisis de los resultados obtenidos, se identificaron como las mejores variantes las variantes 3 y 8, al ser las variantes para las cuáles se obtienen valores de AutoMAC inferiores a 0,5 para configuraciones de 12 y 9 sensores, respectivamente. La figura 8 muestra las matrices AutoMAC obtenidas en ambos casos.

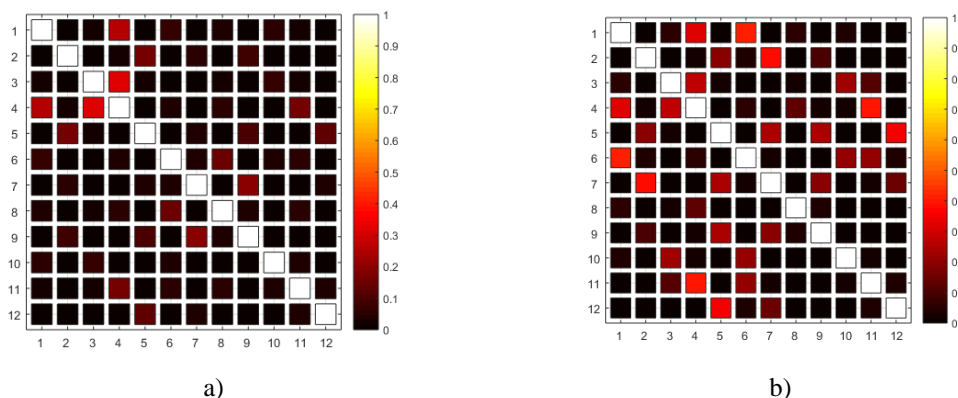


Figura 8. Matrices AutoMAC obtenidas para la configuración de sensores. a) 12 sensores b) 8 sensores

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

De estas variantes se decidió trabajar con la variante 3, debido a que se logran de manera general menores valores de AutoMAC, además de poseer un mejor espaciamiento de los puntos de colocación de sensores. Esta distribución más equidistante de los sensores en altura, permite obtener una mejor caracterización de las formas modales, dado que los valores AutoMAC funcionan solamente como indicadores de la correlación entre los modos identificados, pero no indican necesariamente una adecuada identificación de la deformada global de cada modo. Para esta configuración, mostrada en la fig. 9, se realizó el estudio al variar la tensión inicial en los cables a 5% y 15%, con el objetivo de determinar la influencia de este parámetro en las matrices AutoMAC obtenidas.

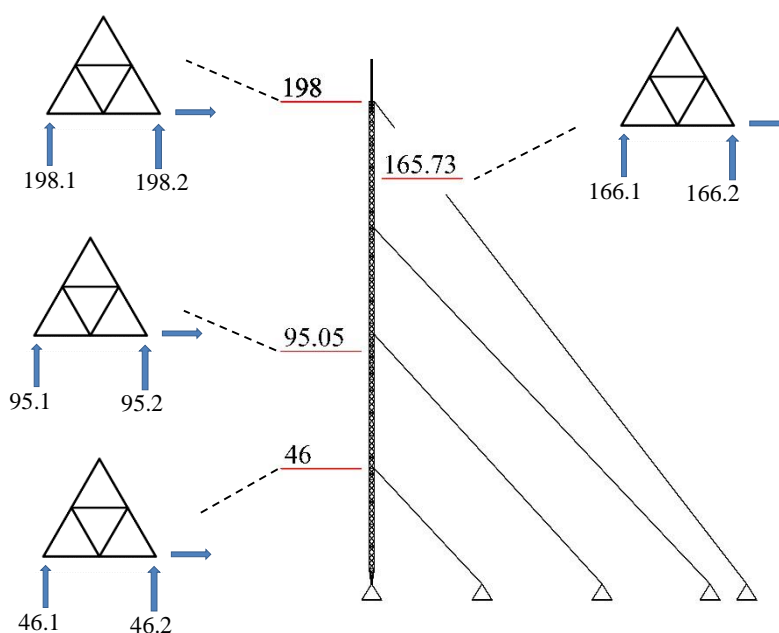
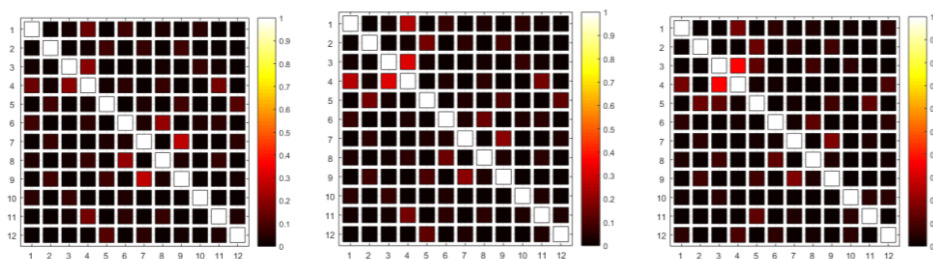


Figura 9. Distribución de acelerómetros en la torre Santa Clara. La numeración identifica nivel del punto y ubicación en vértice de la sección transversal.

La fig. 10 representa las matrices AutoMAC obtenidas para las tres tensiones iniciales analizadas, así como el máximo valor obtenido en cada matriz AutoMAC. Se observa como al aumentar la tensión inicial, aumentan los máximos valores obtenidos en la matriz, aunque en ningún caso se supera el valor de 0,5; por lo que no representa una variación en la cantidad de sensores necesarios para una correcta identificación de las formas modales.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



Tensión Inicial	5%	10%	15%
Mayor valor AutoMAC	0,28	0,31	0,36

Figura 10. Valores AutoMAC obtenidos al variar la tensión inicial en los cables para la torre Santa Clara.

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1. Al considerar la presencia de antenas como masas concentradas sobre la estructura, aumentan los valores del período tanto para los modos flectores como para los modos torsores, siendo mayor la variación en los primeros modos, que involucran un mayor porcentaje de la masa total en la respuesta dinámica.
2. Independientemente de la consideración o no de las antenas en la estructura y de la tensión inicial en los cables aplicada, fue necesario tener en cuenta los 12 primeros modos de la estructura para involucrar al menos el 90% de la masa total en la respuesta.
3. El estudio de los valores AutoMAC a partir de las diferentes configuraciones de sensores sobre la torre permitió optimizar la cantidad de sensores a utilizar, logrando obtener una buena diferenciación de los modos para una cantidad total de 9 sensores; sin embargo, fue necesario usar una configuración de 12 sensores con una distribución más equidistante en la altura, para garantizar una correcta identificación de cada modo de forma individual.
4. A medida que aumenta la tensión inicial en los cables, aumentan los máximos valores obtenidos en la matriz AutoMAC, pero esta variación no representa un aumento en la cantidad necesaria de sensores a utilizar, dado que no se obtienen en ningún caso valores superiores a 0,5.

II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
"II CCI UCLV 2019"

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



5. Referencias bibliográficas

- Allemang, R. J., & Brown, D. L. (1982). *A correlation coefficient for modal vector analysis*. Paper presented at the 1st international modal analysis conference.
- Amiri, G. G. (1997). *Seismic sensibility of tall guyed telecommunication towers*. (Ph D Thesis), McGill University, Montreal. Canada.
- Amiri, G. G. (1997). *Seismic sensibility of tall guyed telecommunication towers*. McGill University, Montreal. Canada.
- Blachowski, B. D. (September 2-5, 2003.). *Active vibration control of guyed mast*. Paper presented at the AMAS Workshop on Smart Materials and Structures. SMART'03.
- Computers and Structures, I. (2007). *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000®, ETABS®, and SAFE™*. Retrieved from Berkeley, California, USA:
- Friswell, Mottershead, J., & Ahmadian, H. (2001). Finite-element model updating using experimental test data: parametrization and regularization. *Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 359, 169-186. doi:10.1098/rsta.2000.0719
- Grey, M. (2006). *Finite Element Seismic Analysis of Guyed Masts*. (Master of Science), University of Oxford, UK, Oxford,.
- He, J., & Zhi-Fang, F. (2001). *Modal Analysis*: Butterworth-Heinemann, Elsevier.
- Jaishi, B., Kim, H., Kyum Kim, M., Ren, W., & Lee, S. (2007). Finite element model updating of concrete-filled steel tubular arch bridge under operational condition using modal flexibility. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21, 2406–2426. doi:10.1016/j.ymsp.2007.01.003
- Madugula, M., Wahba, Y., & Monforton, G. (1998). Dynamic Response of guyed masts. *Engineering Structures*, Vol 20,(No 12), 1097-1101.
- Madugula, M. K. S. (2002). *Dynamic Response of Lattice Towers and Guyed Masts*. Reston, Virginia, United States of America.
- Maes, K., Van Nimmen, K., Lourens, E., Rezayat, A., Guillaume, P., De Roeck, G., & Lombaert, G. (2016). Verification of joint input-state estimation for force identification by means of in situ measurements on a footbridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 75, 245–260. doi:10.1016/j.ymsp.2015.12.017
- Marwala, T. (2010). *Finite-element-model Updating using computational Intelligence techniques. Applications to Structural Dynamics*.
- Simoen, E. (2013). *UNCERTAINTY QUANTIFICATION IN FINITE ELEMENT MODEL UPDATING*. (PhD), Leuven, Belgium.
- Smith, B. W. (2007). *Communication structures* (First ed.). London, Great Britain.