

Estudio de la disposición de antenas parabólicas sobre torres autosoportadas

Patricia Martín Rodríguez

correo electrónico: patriciamr@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Artículo Original

Vivian B. Elena Parnás

correo electrónico: vivian@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Ángel Emilio Castañeda Hevia

correo electrónico: ecashevia@civil.cujae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

Resumen

Las torres de telecomunicaciones son estructuras altamente vulnerables a la acción de las cargas de viento, principalmente bajo los efectos de los ciclones. En el período del 1996 al 2012 fallaron en Cuba de 59 torres de telecomunicaciones, y se pudo constatar en algunas de las torres falladas la presencia numerosa de antenas sobre la estructura. Las torres instaladas en Cuba fueron diseñadas en sus inicios para una cierta cantidad de antenas, sin embargo, en la actualidad el desarrollo de las nuevas fuentes de comunicación y el aumento en el número de canales televisivos han generado la colocación de nuevas antenas sobre dichas torres, lo que trae consigo el cambio de las condiciones iniciales de diseño, de ahí la importancia del estudio del efecto de la disposición de las antenas en el comportamiento estructural de las torres autosoportadas de telecomunicaciones. Este trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la disposición de las antenas parabólicas en los parámetros estructurales (fuerzas interiores y desplazamientos) de una torre autosoprtada de telecomunicaciones a través de un diseño de experimentos numérico.

Palabras claves: torres autosoprtadas de telecomunicaciones, paráolas, carga de viento

Recibido: 6 de noviembre de 2014 Aprobado: 8 de junio de 2015

INTRODUCCIÓN

La presencia de antenas en torres de telecomunicaciones, que dan respuesta al desarrollo de la telefonía celular en particular y a las comunicaciones en general, ha producido un aumento de las fuerzas en las estructuras existentes con el consiguiente aumento de la relación demanda-capacidad, toda vez que esta última no ha

sido modificada. Las torres de telecomunicaciones son estructuras altamente vulnerables a la acción de la carga de viento, principalmente bajo los efectos de los ciclones. En el período comprendido entre 1996 y 2012 fallaron en Cuba 59 torres de telecomunicaciones [1-4] y se pudo constatar en algunas de las torres falladas la presencia de numerosa antenas sobre la estructura (figura 1).



Fig. 1. Fallo de torres de telecomunicaciones con presencia de antenas

En Cuba existen tres tipologías fundamentales de antenas de televisión: UHF, VHF y paráboles (figura 2). En función de las características de la forma, peso y disposición de las antenas sobre la torre se modifican las fuerzas interiores de los elementos de la misma, ya que por una parte las antenas actúan como pantalla frente al viento haciendo que se generen fuerzas adicionales sobre la estructura, y por otra, la concentración de la masa en diferentes partes de la estructura, modifica su respuesta dinámica ante los efectos del viento.

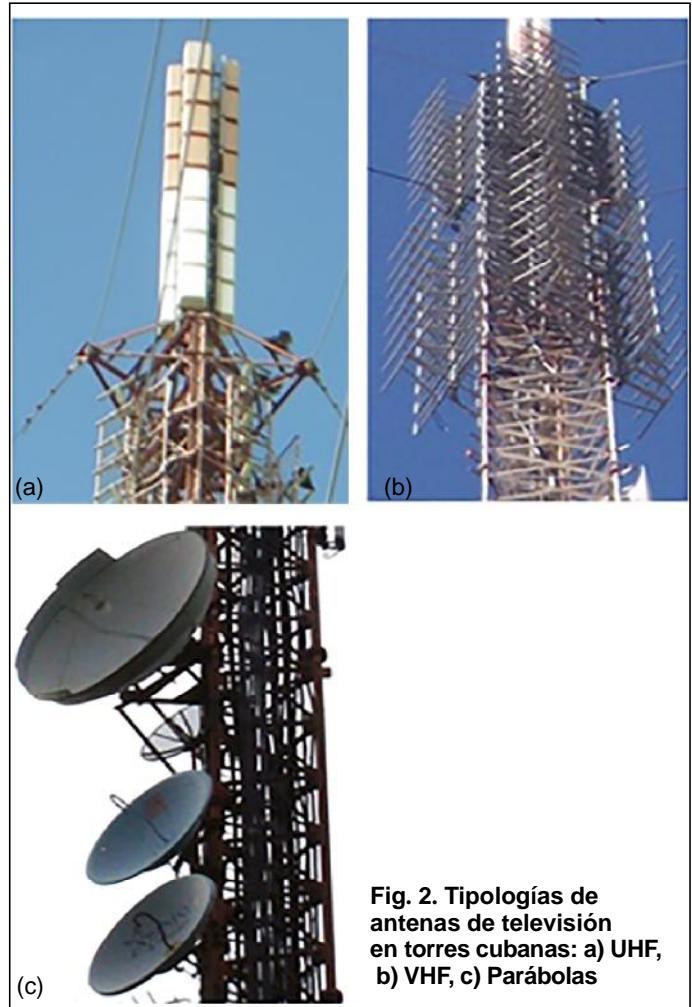


Fig. 2. Tipologías de antenas de televisión en torres cubanas: a) UHF, b) VHF, c) Paráboles

Las torres instaladas en Cuba fueron diseñadas en sus inicios para una cierta cantidad de antenas, sin embargo, en la actualidad el desarrollo de las nuevas fuentes de comunicación y el aumento en el número de canales televisivos han generado la colocación de nuevas antenas sobre las torres existentes, trayendo consigo el cambio de las condiciones iniciales de diseño. Por esta razón, es pertinente el estudio del efecto de la disposición de las antenas en el comportamiento estructural de las torres autosoportadas de telecomunicaciones. Este estudio permitirá tomar medidas de orden práctico en cuanto a la disposición de las antenas sobre la torre, y decidir en conjunto con los especialistas en la transmisión de las comunicaciones, cuáles de las antenas son las que pueden mantenerse sobre la estructura cuando aumenten las velocidades de viento y de cuáles se puede prescindir.

El estudio del efecto de las antenas en el comportamiento aerodinámico de las torres de celosía de telecomunicaciones, se ha concentrado fundamentalmente en la obtención de los coeficientes de fuerza aerodinámicos y factores de interferencia producto de la presencia de las antenas parabólicas [5-7] a través de ensayos en túneles de viento. Sin embargo, el efecto de la disposición de las antenas en el comportamiento estructural de las torres

autoportadas de telecomunicaciones ha sido poco abordado en la literatura. Los trabajos realizados están asociados, principalmente, a la presencia de las antenas en los análisis bajo carga sísmica [8, 9] y no bajo carga de viento.

Este trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto de la disposición de las antenas parabólicas en los parámetros estructurales (fuerzas interiores y desplazamientos) de una torre autoportada de telecomunicaciones a través de un diseño de experimentos numérico.

MATERIALES Y MÉTODOS

La torre autoportada de telecomunicaciones seleccionada es la tipo Najasa de diseño y fabricación nacional (figura 3). En la figura 4 se muestran los elementos que componen la torre.

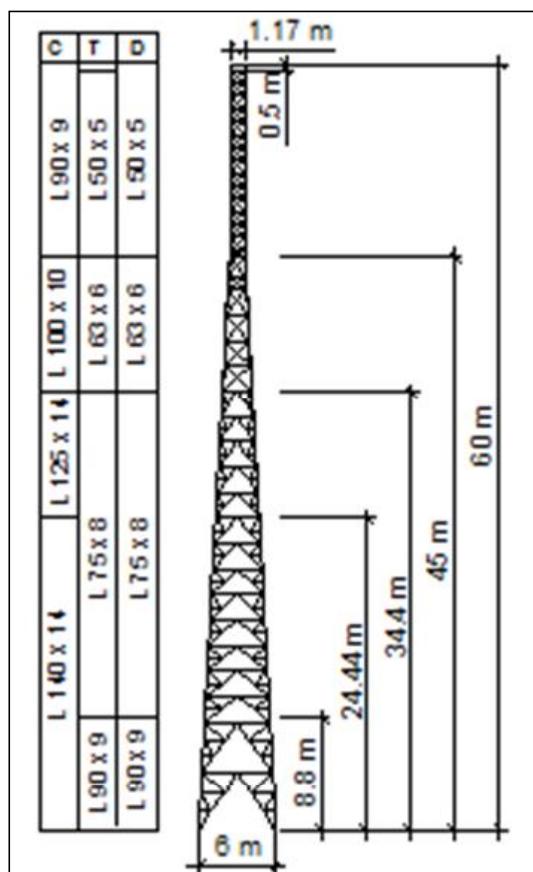


Fig. 3.
Dimensiones
geométricas

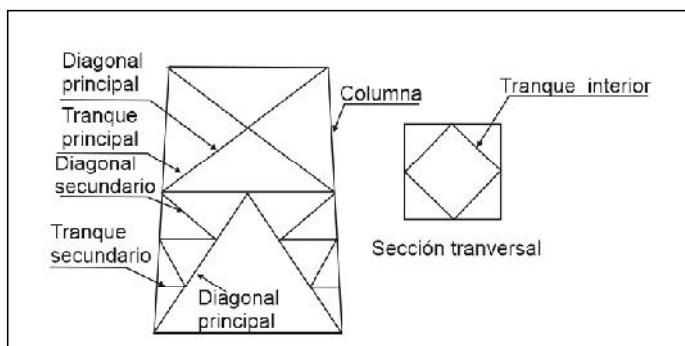


Fig. 4. Elementos componentes de las torres autoportadas

Para realizar el análisis del efecto de la disposición de las antenas en el comportamiento estructural de las torres autoportadas bajo carga de viento, fue necesario realizar inicialmente un estudio de campo de las tipologías y características de las antenas de telecomunicaciones sobre las torres autoportadas existentes en Cuba. Una base de datos de 26 torres autoportadas ubicadas en el país fue confeccionada con la información recolectada donde se pudieron identificar tres tipologías fundamentales de antenas: UHF, VHF y paráboles. El estudio de campo mostró que existe una repetición de las características de las antenas UHF y VHF en cuanto a ubicación y disposición sobre la torre, cantidad y forma de las antenas, sin embargo, con respecto a las paráboles se observa una gran aleatoriedad en sus características de distribución topológica sobre las torres. Con el fin de determinar cuáles de las posiciones de paráboles son los que producen mayor y menor aumento de la carga de viento sobre las diferentes partes de la torre, se realizó un estudio preliminar en el túnel de viento. Los resultados del estudio se muestran en el trabajo realizado por los autores [10].

El diseño de experimentos para el estudio de la influencia de la disposición de las antenas en el comportamiento estructural de la torre Najasa fue el diseño de experimento factorial 2³. En este diseño existen tres variables independientes con dos niveles cada una, un nivel representativo de los valores máximos y otro nivel representativo de los valores mínimos de las variables. Las variables independientes seleccionadas fueron: cantidad de paráboles, posición horizontal y posición vertical de las paráboles, ya que las variables diámetro y tipología de antenas fueron fijadas según los criterios propuestos por las entidades encargadas de la construcción, explotación y mantenimiento de las torres en Cuba.

Se realizaron dos diseños de experimentos factoriales 2³ paralelos y formalmente independientes. El diseño de experimentos 1 (DE1) se realizó con el número máximo de antenas UHF y VHF dispuestas sobre los niveles superiores de la torre (24 y 12 paneles respectivamente) con el objetivo de identificar la influencia de las variables independientes asociadas a las paráboles cuando la torre se encuentra cargada en su parte superior con las tipologías de antenas UHF y VHF. El diseño de experimentos 2 (DE2), por el contrario, no presenta antenas UHF y VHF sobre la torre y solo tiene como carga de antena las paráboles, que pueden estar ubicadas en cualquier altura de la torre.

Basado en los resultados obtenidos del estudio en túnel de viento [10] se seleccionaron los niveles de la variable independiente *posición horizontal* y con los datos proporcionados del estudio de campo se seleccionaron los niveles de las variables independientes: *cantidad* y *posición vertical* de las paráboles sobre la torre. En la definición de los niveles de la variable independiente *cantidad* se seleccionó como nivel mínimo una parábola y el valor representativo del nivel máximo fue de seis paráboles. En la definición de los niveles de la variable independiente *posición vertical* se escogió como nivel mínimo que las paráboles estuvieran colocadas en el

primer tercio de la altura de la torre (entre 0 y 20 m), y como nivel máximo que estuvieran ubicadas en el segundo tercio de la altura de la torre (entre 20 y 40 m) para el diseño de experimentos 1 (DE1) y en el último tercio de la altura de la torre (entre 40 y 60 m) para el diseño de experimentos 2 (DE2). En la variable *posición horizontal* los niveles fueron determinados a partir de los resultados de los incrementos en el coeficiente de arrastre según los casos de posiciones horizontales ensayados en el túnel de viento, para lo cual se escogió como nivel mínimo el caso 1 y como nivel máximo el caso 3 para los experimentos que presenten una sola parábola y el caso 6 para los experimentos donde existen más de una parábola. En el esquema de la figura 5 se muestran las variables independientes y los niveles de cada una.

Al combinar los niveles de cada una de las variables independientes surgen ocho experimentos para cada uno de los diseños de experimento. Las características de cada uno se muestran en la matriz de experimentación de las tablas 1 y 2.

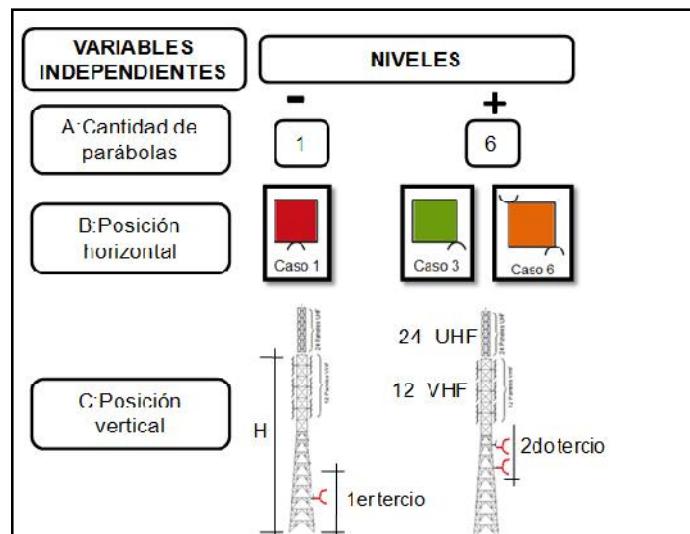
Los diseños de experimento descritos anteriormente tienen dos objetivos fundamentales: 1. Identificar la influencia de las variables y la interacción doble entre ellas en los valores de las variables dependientes; 2. Determinar el peso de las variables y de sus interacciones en los valores de las variables dependientes.

Para realizar el primer objetivo se plantearon las siguientes hipótesis para cada una de las variables dependientes obtenidas:

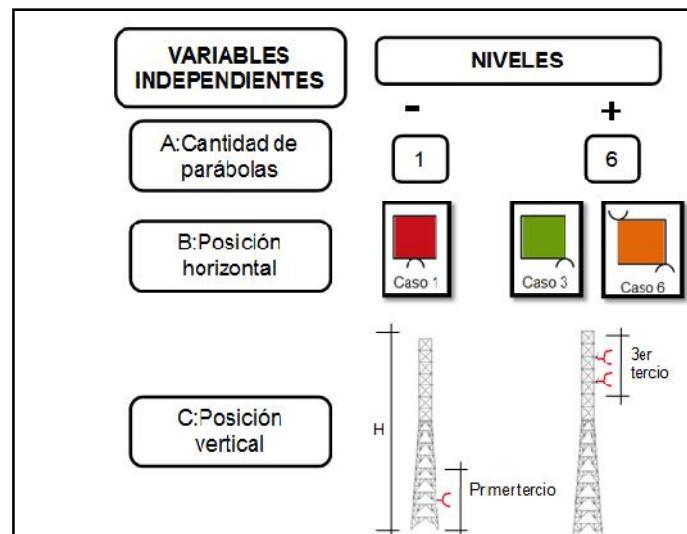
H_0 : La variable independiente (A, B o C) o la interacción de las variables (AB, BCo AC) (según corresponda en cada caso) *no influye* en el valor de la variables dependiente x.

H_1 : La variable independiente (A, B o C) o la interacción de las variables (AB, BC o AC) (según corresponda en cada caso) *influye* en el valor de la variables dependiente x.

Los resultados de este análisis están basados en la obtención del *p*-valor que indica la probabilidad (*P*) de rechazar H_0 cuando H_0 es cierta para un nivel de significación de un 5 %. Ver ecuación (1).



a) Diseño de Experimentos DE1



b) Diseño de Experimentos DE2

Fig. 5. Variables independientes y niveles de cada una en los diseños de experimento

Matriz de experimentación – DE1						
No	A	B	C	Cant	Posición horizontal	Posición vertical DE1
E1.1	-	-	-	1	caso 1	Primer tercio de H
E2.1	-	+	-	1	caso 3	Primer tercio de H
E3.1	-	-	+	1	caso 1	Segundo tercio de H
E4.1	-	+	+	1	caso 3	Segundo tercio de H
E5.1	+	-	-	6	caso 1	Primer tercio de H
E6.1	+	-	+	6	caso 1	Segundo tercio de H
E7.1	+	+	-	6	caso 6	Primer tercio de H
E8.1	+	+	+	6	caso 6	Segundo tercio de H

Matriz de experimentación – DE2						
No	A	B	C	Cant	Posición Horizontal	Posición Vertical DE2
E1.2	-	-	-	1	caso 1	Primer tercio de H
E2.2	-	+	-	1	caso 3	Primer tercio de H
E3.2	-	-	+	1	caso 1	Tercer tercio de H
E4.2	-	+	+	1	caso 3	Tercer tercio de H
E5.2	+	-	-	6	caso 1	Primer tercio de H
E6.2	+	-	+	6	caso 1	Tercer tercio de H
E7.2	+	+	-	6	caso 6	Primer tercio de H
E8.2	+	+	+	6	caso 6	Tercer tercio de H

Para realizar el segundo objetivo se realizó una regresión para cada una de las variables dependientes donde se obtuvo una ecuación del tipo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_4 AB + \beta_5 AC + \beta_6 BC \quad (2)$$

Donde los coeficientes $1^1, 2^2, 3^3$ representan los coeficientes de ajuste de la regresión y evidencian el peso de cada una de las variables independientes y $4^4, 5^5, 6^6$ representan la interacción entre las variables independientes en los valores de las variables dependientes. De esta forma se puede identificar cuál de las variables o cuál de las interacciones entre ellas es la que mayor influencia presenta en los resultados de cada una de las variables dependientes. El análisis del peso de las variables independientes solo será realizado para las variables dependientes que presenten *p*-valores menores que 0,08 en alguna de las variables independientes.

Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó como herramienta el software Statgraphics [11].

Las variables dependientes seleccionadas son fuerzas axiales en los elementos columnas, trancos y diagonales, desplazamientos lineales y angulares. Ellas fueron determinadas en cada uno de los experimentos numéricos y se hallaron los incrementos de cada una con relación a la torre que no presenta ninguna antena parabólica (figuras 6 y 7).

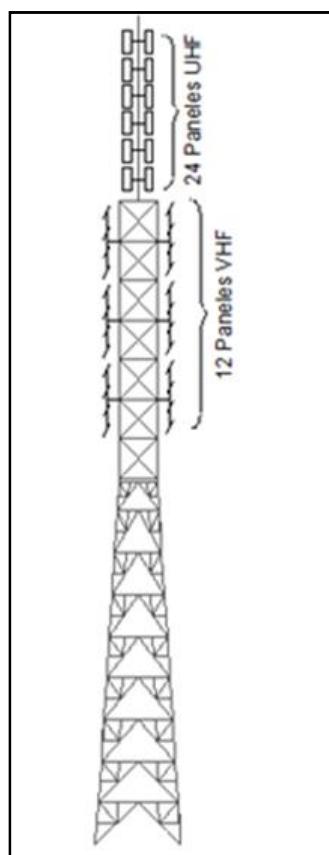


Fig. 6. Modelo sin antenas parabólicas E0.1 del DE1

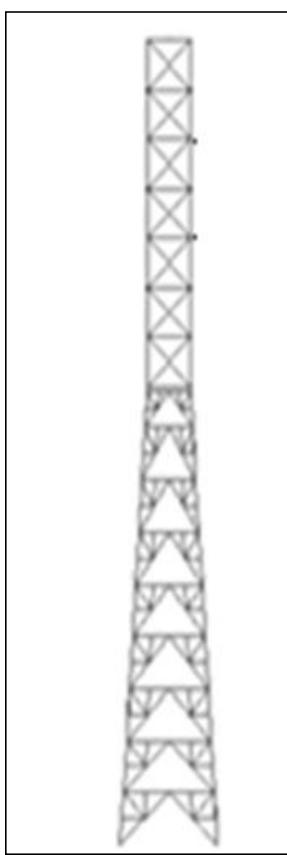


Fig. 7. Modelo sin antenas parabólicas E0.2 del DE2

Para la obtención de las variables dependientes definidas en los diseños de experimentos numéricos se realizó la modelación y análisis de los experimentos utilizando como herramienta el programa de análisis estructural SAP 2000 (versión 14) [12, 13] basado en el método de elementos finitos. Fue realizado un análisis lineal geométrico para todos los experimentos.

El proceso de modelación se efectuó a partir de definir las características de cada una de las invariantes del proceso de modelación: forma, material, condiciones de apoyo y cargas. La torre autosostentada de telecomunicaciones tipo Najasa fue modelada para los fines de esta investigación como una armadura espacial. Los elementos de la armadura fueron modelados como barras, elementos lineales con dos nudos extremos. Las columnas se consideraron continuas desde la base hasta la cima y la unión de los elementos trancos a la columna, se consideró articulada al igual que las diagonales y diagonales secundarias, trancos interiores, trancos y trancos secundarios. El material que conforma los elementos de la torre es acero de calidad A-36 (tensión de fluencia 250 MPa, tensión de rotura 400 MPa); sus propiedades se consideraron linealmente elásticas y constantes en el tiempo. Las condiciones de apoyo de la torre en su conjunto fueron consideradas empotradas.

En el diseño de las torres de celosía las principales cargas analizadas fueron: cargas permanentes y cargas ecológicas. Las cargas permanentes consideradas fueron el peso propio de los elementos estructurales y el peso propio de las antenas y los elementos accesorios, como son las escaleras y balcones. Los cálculos para la obtención del valor de la carga de viento sobre los experimentos, se realizaron de acuerdo con lo establecido en la norma cubana de viento NC:285-2003 [14] para reticulados espaciales aplicando el valor de viento extremo, excepto los valores de coeficientes de forma que se emplearon los obtenidos en los ensayos experimentales en el túnel de viento [10]. Las direcciones de viento a analizar en función de los casos seleccionados para los diseños de experimentos fueron 0, 45 y 135° (figura 8). La dirección 135° fue escogida porque para el caso 3 y 6 de posición horizontal de las paráolas se obtuvieron mayores valores de incremento que para la dirección de 45°.

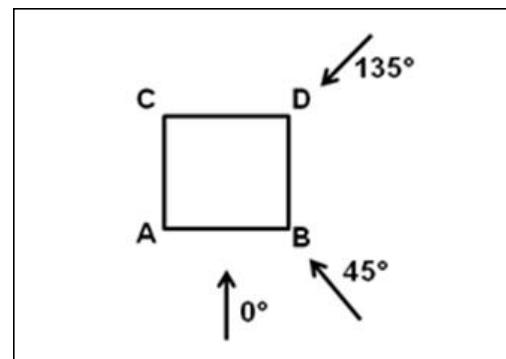


Fig. 8. Direcciones de viento

El análisis de los experimentos bajo carga de viento fue realizado a partir de lo planteado en la norma cubana de viento NC:285-2003 [14], donde se consideró la componente estática de la carga de viento en todos los casos y la componente dinámica de la carga de viento en los experimentos que presentaron períodos de oscilaciones propios mayores de un segundo ($T=1,0$ s), para lo cual se realizó el análisis modal de cada uno de los experimentos. Los experimentos que presentaron períodos de oscilación mayores de un segundo fueron los correspondientes al diseño de experimento 1.

Las combinaciones de cargas utilizadas son las establecidas en la NC 450:2006 [15]: a) 0,9 G + 1,4 W, b) 1,2 G + 1,4 W, donde: G: Carga permanente, W: Carga de viento.

RESULTADOS

Las variables dependientes fueron procesadas en cada experimento para cada combinación de carga y dirección de viento, donde se obtuvieron los valores máximos de fuerzas axiales en los elementos columnas, traveses y diagonales, desplazamientos máximos lineales y angulares. Estos valores máximos fueron comparados con los valores máximos de fuerzas axiales y desplazamientos obtenidos en los experimentos que no presentan paráolas E0.1 y E0.2 para el diseño de experimentos 1 y 2, respectivamente. Los valores de los p -valor y los coeficientes de la ecuación de la regresión

conforman los resultados que se muestran a continuación para cada una de las variables dependientes.

La torre fue dividida en sus tres elementos principales: columnas, traveses y diagonales para el procesamiento de los datos. Los elementos de la torre fueron subdivididos en varios tramos según variaban las dimensiones de las secciones de los perfiles con la altura, según se muestra en la figura 4 referenciada anteriormente en el texto, tomando como tramo 1, el más cercano a la base de la torre.

Resultados del diseño de experimentos 1

En las variables dependientes fuerza axial a tracción y a compresión de los elementos del DE1 se obtuvieron los siguientes resultados:

En las fuerzas de los elementos columnas solo presentaron influencia las variables independientes en los dos primeros tramos de las columnas. Las variables independientes que tienen influencia son la posición vertical y la cantidad de paráolas, la interacción entre estas dos variables también tiene influencia según se muestra en la tabla 3. En el primer tramo de columna, la variable independiente de mayor peso, es decir, la de mayor influencia es la cantidad y en el segundo tramo es la posición vertical (tabla 4). En las tablas 3 y 4, T indica tracción y C compresión.

En las fuerzas de los elementos diagonales se obtuvo que estos no tienen influencia ninguna de las variables independientes para un nivel de significación del 5 %, por tanto, no se obtuvo el peso de las variables independientes.

Tabla 3
P-valor para los tramos de columna DE1

Variables independientes		Variable dependiente: Fuerza axial en tramos de columna							
		1		2		3		4	
		T	C	T	C	T	C	T	C
A:Cantidad		0,04	0,01	0,03	0,03	0,40	0,37	0,67	0,85
B:Posición horizontal		0,17	0,06	0,43	0,38	0,64	0,62	0,52	0,53
C:Posición vertical		0,04	0,01	0,02	0,02	0,17	0,15	0,40	0,35
AB		0,25	0,10	0,42	0,40	0,47	0,46	0,46	0,43
AC		0,07	0,02	0,03	0,03	0,42	0,40	0,74	0,99
BC		0,80	0,20	0,37	0,31	0,69	0,68	0,57	0,62

Tabla 4
Peso de las variables independientes y de sus interacciones en columna del DE1

Tramos de col.	Fuerza	Coeficientes y error										
		Media	A:Cantidad		B:Posición horizontal		C:Posición vertical		AB		AC	
		0	1	Error	2	Error	3	Error	4	Error	5	Error
1	T	1141,1	40,2	4,6	-8,6	4,6	38,0	4,6	-5,7	4,6	22,3	4,6
	C	-1232,1	-42,7	1,4	7,1	1,4	-36,7	1,4	4,5	1,4	-20,7	1,4
2	T	821,5	16,7	1,7	-1,1	1,7	28,4	1,7	1,1	1,7	16,4	1,7
	C	-868,6	-17,1	1,4	1,1	1,4	-29,1	1,4	-1,0	1,4	-16,8	1,4

En las fuerzas de los elementos tranques se obtuvo que estos no tienen influencia ninguna de las variables independientes para un nivel de significación del 5 %. No obstante, el peso de las variables independientes fue obtenido para la variable dependiente fuerza axial a tracción en los tranques del tramo 2, ya que presentaban *p*-valores menores que 0,08 en la variable cantidad (*p*-valor igual a 0,061) y en la variable posición vertical (*p*-valor igual a 0,055). La variable independiente de mayor peso es la posición vertical según se muestra en la tabla 5.

En la variable dependiente desplazamientos para el DE1 se obtuvo que tiene influencia la variable independiente posición vertical para los desplazamientos lineales de la dirección 45° con un nivel de significación del 5 % (tabla 6). La variable independiente de mayor peso en los desplazamientos lineales fue la posición vertical y en

los desplazamientos angulares la variable independiente de mayor influencia fue la cantidad de paráolas (tabla 7).

Resultados del diseño de experimentos 2

En las variables dependientes fuerza axial a tracción y a compresión de los elementos del DE2 se obtuvieron los siguientes resultados:

En las fuerzas de los elementos columnas solo presentaron influencia la variable independiente posición vertical en el primer tramo de columnas para un nivel de significación del 5 % (tabla 8). El peso de las variables independientes fue obtenido para las variables dependientes fuerza axial a tracción y a compresión de los tramos 1, 2 y 3 y fuerza axial a tracción del tramo 4, ya que presentaban *p*-valores menores que 0,08. La variable independiente que presenta el mayor peso fue la posición vertical para todas las variables dependientes (tabla 9).

Tabla 5
Peso de las variables independientes y de sus interacciones en tranques DE1

Tramos	Fuerza	Coeficientes y error												
		Media	A:Cantidad		B:Posición horizontal		C:Posición vertical		AB		AC			
			0	1	Error	2	Error	3	Error	4	Error	5	Error	6
2	T	38,80	0,98	0,19	-0,26	0,19	1,08	0,19	-0,41	0,19	0,59	0,19	0,05	0,19

Tabla 6
P-valor en desplazamientos DE1

Variables independientes	Variable dependiente: Desplazamientos				
	Lineales				Angulares (giro alrededor de z)
	Dirección 0	Dirección 45	Dirección 135	Máximo	Máximo
A:Cantidad	0,30	0,06	0,32	0,12	0,06
B:Posición horizontal	0,37	0,17	0,39	0,64	0,98
C:Posición vertical	0,18	0,03	0,23	0,08	0,17
AB	0,54	0,33	0,45	0,40	0,51
AC	0,42	0,09	0,41	0,14	0,45
BC	0,35	0,20	0,43	0,83	0,30

Tabla 7
Peso de las variables independientes y de sus interacciones en desplazamientos DE1

Tipo de desplazamiento	Coeficientes y error													
	Media	A:Cantidad		B:Posición Horizontal		C:Posición Vertical		AB		AC				
		0	1	Error	2	Error	3	Error	4	Error	5	Error	6	Error
Lineal	Dirección 45°	1,10	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
	Máximo	1,10	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01
Angular	Máximo	15,47	10,6	1,94	-0,02	1,94	3,60	1,94	-0,93	1,94	1,12	1,94	-1,9	1,94

Tabla 8

P-valor para los tramos de columna DE2

Variables independientes	Variable dependiente: Fuerza axial en tramos de columna							
	1		2		3		4	
	T	C	T	C	T	C	T	C
A: Cantidad	0,09	0,08	0,21	0,20	0,33	0,32	0,93	0,68
B: Posición horizontal	0,42	0,36	0,68	0,61	0,68	0,62	0,75	0,59
C: Posición vertical	0,04	0,04	0,06	0,05	0,07	0,06	0,08	0,15
AB	0,30	0,28	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
AC	0,17	0,16	0,21	0,20	0,33	0,32	0,93	0,68
BC	0,79	0,68	0,68	0,61	0,68	0,62	0,75	0,59

Tabla 9

Peso de las variables independientes y de sus interacciones en columna DE2

Tramos de col.	Fuerza	Coeficientes y error												
		Media	A:Cantidad		B: Posición horizontal		C:Posición vertical		AB		AC		BC	
			0	1	Error	2	Error	3	Error	4	Error	5	Error	6
1	T	830,5	41,2	11,5	-7,4	11,5	87,9	11,5	-11,4	11,5	20,7	11,5	-2,0	11,5
	C	-907,9	-41,6	10,3	8,2	10,3	-88,7	10,3	10,8	10,3	-19,8	10,3	2,8	10,3
2	T	524,8	24,0	16,8	-4,7	16,8	88,8	16,8	-8,4	16,8	24,0	16,8	-4,7	16,8
	C	-560,1	-23,8	15,6	5,4	15,6	-90,2	15,6	7,8	15,6	-23,8	15,6	5,4	15,6
3	T	369,4	14,4	16,4	-4,5	16,4	74,3	16,4	-8,2	16,4	14,4	16,4	-4,5	16,4
	C	-386,5	-14,2	15,3	5,2	15,3	-75,7	15,3	7,7	15,3	-14,2	15,3	5,2	15,3
4	T	271,1	-0,8	15,0	-3,1	15,0	56,8	15,0	-7,5	15,0	-0,8	15,0	-3,1	15,0

En las fuerzas de los elementos diagonales se obtuvo que no tienen influencia ninguna de las variables independientes para un nivel de significación del 5 %. El peso de las variables fue obtenido para las variables dependientes fuerza axial a tracción y a compresión en el tramo 3 y 4 de las diagonales, debido a que presentan valores de *p*-valores próximos a 0,05 (menores que 0,08). La variable independiente que presenta el mayor peso fue la posición vertical para todas las variables dependientes según se muestra en la tabla 10.

En las fuerzas de los elementos tranques se obtuvo que no tienen influencia ninguna de las variables independientes para un nivel de significación del 5 %, por tanto, no se obtuvo el peso de las variables independientes.

En la variable dependiente desplazamientos para el DE2 se obtuvo que solo tiene influencia la variable independiente posición vertical para los desplazamientos de la dirección 0° con un nivel de significación del 5 %, para esta variable se obtuvo el mayor peso (tablas 11 y 12).

Tabla 10

Peso de las variables independientes y de sus interacciones en diagonales DE2

Tramos	Fuerza	Coeficientes y error												
		Media	A:Cantidad		B:Posición horizontal		C:Posición Vvertical		AB		AC		BC	
			0	1	Error	2	Error	3	Error	4	Error	5	Error	6
3	T	32,1	1,6	1,4	-0,4	1,4	6,6	1,4	-0,7	1,4	1,6	1,4	-0,4	1,4
	C	-34,2	-1,5	1,3	0,5	1,3	-6,8	1,3	0,7	1,3	-1,5	1,3	0,5	1,3
4	T	23,1	0,6	1,4	-0,4	1,4	5,2	1,4	-0,7	1,4	0,6	1,4	-0,4	1,4
	C	-24,0	-0,6	1,3	0,4	1,3	-5,3	1,3	0,7	1,3	-0,5	1,3	0,4	1,3

Tabla 11

P-valor en desplazamientos DE2

Variables independientes	Variable dependiente: Desplazamientos				
	Lineales				Angulares (giro alrededor de z)
	Dirección 0	Dirección 45	Dirección 135	Máximo	
A:Cantidad	0,06	0,67	0,19	0,38	0,12
B:Posición horizontal	0,14	0,90	0,36	0,81	0,45
C:Posición vertical	0,03	0,30	0,13	0,17	0,31
AB	0,78	0,49	0,52	0,49	0,23
AC	0,07	0,70	0,21	0,41	0,13
BC	0,12	0,92	0,36	0,78	0,47

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados de los diseños de experimentos numéricos demostraron que sí existe influencia de la disposición de las antenas parabólicas en el comportamiento estructural de las torres autosostentadas tipo Najasa. El estudio demostró que las variables dependientes que presentan una importante influencia para un nivel de significación del 5% son las fuerzas axiales en las columnas y los desplazamientos en ambos diseños de experimentos. En las variables dependientes fuerzas axiales en los elementos columnas y desplazamientos de la torre la variable independiente de mayor influencia fue la posición vertical para el 90% de los resultados. En las fuerzas de las columnas del tramo 1 y en los giros del diseño de experimentos 1 (DE1) la variable independiente de mayor influencia correspondió a la cantidad de paráolas.

Los resultados anteriores permiten sugerir que cuando se esté realizando la revisión de una torre autosostentada tipo Najasa debe tenerse en cuenta para el tratamiento de las antenas que si se realizan cambios en las posiciones verticales de las antenas parabólicas a diferencia de los cambios en las posiciones horizontales, requieren una revisión estructural de la torre, especialmente en los elementos columnas y en los valores de los desplazamientos lineales.

REFERENCIAS

1. **ELENA PARNÁS, Vivian.** "Influencia de la asimetría de anclajes y la no linealidad de los cables en la vulnerabilidad estructural de torres atirantadas". Director: A. Emilio Castañeda Hevia. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba, 2008.
2. **ELENA PARNÁS, Vivian; MARTÍN RODRÍGUEZ, Patricia.** "Modelación computacional y análisis cualitativo de fallas en el estudio de la vulnerabilidad de torres atirantadas de telecomunicaciones". *Revista Cubana de Ingeniería*. 2011, vol. 2, núm. 1, pp. 25-34. ISNN 2223-1781. Disponible en Web: <http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/37/41>. [consultado junio 2014].
3. **LÓPEZ LLANUSA, Alejandro.** "Influencia de la presencia de antenas en torres de telecomunicaciones en la vulnerabilidad estructural ante cargas de viento". Directora: Vivian Elena Parnás. Tesis de Maestría, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba, 2013.
4. **MARTÍN RODRÍGUEZ, Patricia.** "Evaluación de la vulnerabilidad estructural de torres autosostentadas de telecomunicaciones bajo cargas de viento y sismo". Directora: Vivian Elena Parnás. Tesis de Maestría, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba, 2012.
5. **CARRIL JR, Célio F.; ISYUMOV, Nicholas; BRASIL, Reyolando.** "Experimental study of the wind forces on rectangular latticed communication towers with antennas". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2003, vol. 91, núm. 8, pp. 1007-1022. ISNN 01676105. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610503000497> [consultado mayo 2009].
6. **CARRIL JR, Célio F.** "Análise numérica e experimental do efeito dinâmico do vento em torres metálicas treliçadas para telecomunicações". Director: Reyolando M.L.R da Fonseca Brasil. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000.
7. **HOLMES, J. D.; BANKS, R.W.; ROBERTS, G.** "Drag and aerodynamic interference on microwave dish antennas and their supporting towers". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1993, vol. 50, pp. 263-270. ISNN 01676105. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016761059390081X>. [consultado junio 2012].
8. **AMIRI, G. Ghodrati; MASSAH, S.R.** "Seismic response of 4-legged self-supporting telecommunication towers". *IJE Transactions B: Applications*. 2007, vol. 20, núm. 2, pp. 107-126. ISNN 1735-9244. Disponible en Web: <http://www.ije.ir/Vol20/No2/B/1.pdf>. [consultado octubre 2010].
9. **KHERD, Mohamed A.** "Seismic analysis of lattice towers". Supervisor: Ghyslaine McClure. PhD Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 1998.
10. **MARTÍN RODRÍGUEZ, Patricia.** "Estudio analítico-experimental de torre autosostentada con presencia de antenas bajo la acción del viento", Directores: Vivian Elena Parnás y A. Emilio Castañeda Hevia. Tesis de Doctorado, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, La Habana, Cuba, 2014.

11. Statgraphics. *Statgraphics Centurion XV*. 2006, <http://info.statgraphics.com/statgraphics-home>.
12. **WILSON, Edward L.** *Three-Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures*. Ed. Computers and Structures Inc., 2002. 423 pp. ISBN 0-923907-00-9.
13. **WILSON, Edward L.** et al. "SAP - A structural analysis program for linear systems". *Nuclear Engineering and Design*, 1973, vol. 25, núm. 2, pp. 257-274. ISNN 0029-5493. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0029549373900484> [consultado octubre 2010].
14. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. "Carga de viento. Método de cálculo". NC-285:2003, Cuba, 2003. 70 pp.
15. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. "Edificaciones-Factores de Carga o Ponderación-Combinaciones". NC450:2006, 2006, Cuba, 9 pp.

AUTORES

Patricia Martín Rodríguez

Ingeniera Civil, Máster en Reducción de Desastres. Profesora Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Vivian B. Elena Parnás

Ingeniera Civil, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Ángel Emilio Castañeda Hevia

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

Dish Antennas Disposition Study on Self-Supporting Towers

Abstract

Latticed towers of telecommunication are very vulnerable structures under wind loads essentially if these loads are due to wind forces from hurricanes. A number of 59 towers collapsed or partially failed from 1996 to 2012 in Cuba under wind action forces. A study of failures confirmed that many of them supported various antennas. Towers were designed to support a little number of antennas however; communication development generated an increase of antennas on the existing structures with a modification of the structural behavior. The aim of this work is to assess the effect of antennas disposition on many structural parameters as displacement, stress on member and frequency of the tower by means of a numerical experiment.

Key words: self-supporting telecommunication towers, dish antennas, wind load