

# Modelación computacional y análisis cualitativo de fallas en el estudio de la vulnerabilidad de torres atirantadas de telecomunicaciones

**Vivian Elena Parnás**

Correo electrónico: vivian@arquitectura.cujae.edu.cu

**Patricia Martín Rodríguez**

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

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

## Resumen

Las torres atirantadas son estructuras comúnmente empleadas en el área de las telecomunicaciones que soportan antenas a grandes alturas. El índice de fallo de esta tipología estructural con respecto a otras de similar complejidad es elevado. En este trabajo se expone el análisis de torres de telecomunicaciones falladas bajo la acción de vientos extremos a partir de la comparación entre el análisis cualitativo y la modelación físico-matemática de la torre fallada. Los resultados de la modelación físico-matemática se obtienen por medio del análisis no lineal geométrico de la estructura. Ambos estudios, por su importancia y necesidad, son empleados como vía para validar los resultados.

Palabras clave: fallas, viento, torres, modelación

Recibido: septiembre del 2010

Aprobado: enero del 2011

## INTRODUCCIÓN

Las torres de telecomunicaciones se encuentran dentro del conjunto de estructuras más vulnerables frente a los fuertes vientos debido a las características propias de ligereza y esbeltez de su geometría y por estar ubicadas generalmente en lugares altamente expuestos. A pesar de su alta condición de exposición, las torres soporte de antenas y las torres de radio, constituyen elementos fundamentales en los casos de catástrofe, pues ellas son parte del sistema de pronóstico de fenómenos meteorológicos que pueden devenir en desastres, lo que hace posible la comunicación de la población con los organismos o entidades encargadas de enfrentamiento de estos eventos. Estudios realizados por diferentes investigadores, [1-3] indican que las torres atirantadas son estructuras que presentan altos índices de fallas en relación con otras estructuras. La mayoría de las fallas según se documenta, se produjeron en condiciones severas de trabajo debido a fuertes cargas de viento y hielo.

Las torres de tipo atirantadas resultan, por lo general, con mayor índice de fallo con relación a las torres autosoportadas, [4] de ahí la necesidad de indagar en las causas de fallo y fenómenos relacionados con estas, que puedan contribuir a lograr diseños más efectivos y a la mejor comprensión de estas estructuras bajo la acción del viento. Una de las formas de indagar en la vulnerabilidad estructural de torres atirantadas de telecomunicaciones, es a partir del análisis cualitativo de las fallas según datos recopilados y la confrontación de estos con los resultados del análisis a través de la modelación matemática.

Los territorios ubicados en las zonas de ocurrencia de fuertes vientos huracanados, como es el caso de Cuba, tienen condiciones desventajosas para la seguridad al fallo de torres de telecomunicaciones. Entre los factores fundamentales cuya incertidumbre es mayor en Cuba [5] se encuentran: la imprecisión de los modelos de cálculo empleados, tipos de análisis, consideraciones sobre cargas de viento y antenas sobre las torres, grado de deterioro y normas aplicadas en el diseño. La ubicación de muchas torres en terrenos de

topografía irregular marcada (zonas montañosas o colinas), ha condicionado la ubicación asimétrica de los anclajes de torres atirantadas añadiendo mayor complejidad a su comportamiento. [6]

Con el propósito de revelar las posibles causas de fallas y reducir la vulnerabilidad de las mismas, se llevó a cabo una investigación a partir de las torres falladas. Se estudiaron varias torres que colapsaron durante las temporadas ciclónicas que afectaron el territorio cubano en el período comprendido entre 2000 y 2006, y cuyos datos pudieron ser recopilados con más precisión a través de registros fotográficos, levantamientos en el lugar y entrevistas a testigos presenciales de la falla.

Se compendiaron los datos referentes a la estructura de las torres a través de planos y croquis de las torres falladas, con lo que se pudo conocer la altura de las torres, características de la sección transversal, elementos componentes del fuste, disposición de los niveles de cables, niveles antitorsos, diámetro de los cables utilizados y cantidad y posición de los anclajes por eje. De igual forma a través de información de planos, se pudieron recopilar los datos relativos a tipo, cantidad y posición de las antenas sobre la torre y por medio de fotografías se constató la presencia de ellas sobre la torre en el momento de la falla. Se creó la base de datos sobre ciclones del período, velocidades registradas en las estaciones y ubicación geográfica de las torres, lo que permitió obtener los datos del evento meteorológico asociado a la falla de cada torre: categoría del huracán, vientos máximos sostenidos registrados en las estaciones meteorológicas, trayectoria al pasar por Cuba (figura 1 y tabla 1), dirección de los vientos más probable en la zona de la torre.

Con relación a las condiciones geográficas del lugar de emplazamiento de la torre se conoció que la mayoría de las torres falladas se encontraban en zonas elevadas de colinas o taludes. Estos datos permitieron estimar las velocidades de viento en la falla y la carga de viento correspondiente sobre la estructura.

Nombre Ciclón	Año	Viento máximo (km/h)	Escala Saffir Simpson sobre Cuba	Viento máx registrado en Cuba	Torres en áreas de vientos mayor que 100 km/h	Fallos totales registrados en torres
Michelle	2001	220	3	200	9	5
Lili	2002	230	2	160	1	0
Charley	2004	230	2	190	1	0
Iván	2004	270	4	113	3	2
Arlene	2005	110	TT	85	1	0
Dennis	2005	240	4	215	11	7

### ANÁLISIS CUALITATIVO

De las torres falladas se pudo reconocer que el mayor índice estaba dentro de las torres atirantadas, comprobándose que de las trece torres falladas, nueve eran de este tipo aunque con diferentes modelos. En estos casos se observó que las torres falladas tenían varios niveles de cables, así como presencia de sistemas antitorsos en algunos casos. La cantidad observada de niveles mínimos de cables fue de 3 y la máxima de 6, no encontrándose relación entre la altura de la torre y la cantidad de niveles. Tampoco se observó relación entre la cantidad de antitorsos y la altura de la torre. Todas las torres falladas presentaban al menos un nivel de antitorsor.

En cuanto a la ubicación geográfica de las torres se observó que la mayoría se encontraban situadas en alturas o promontorios del terreno. Para las torres falladas, la relación

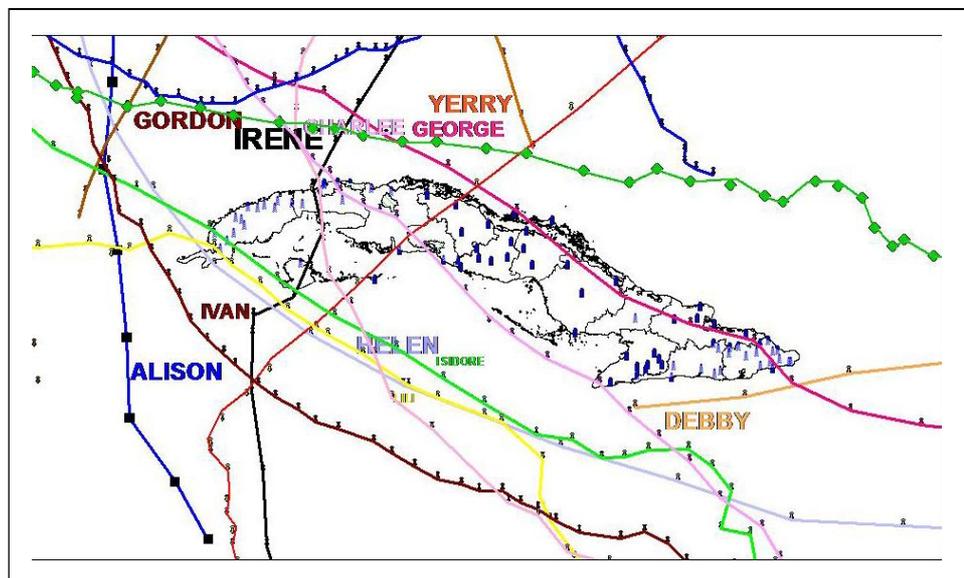


Fig. 1. Trayectoria de huracanes que afectaron el territorio en el período en estudio.

topográfica promedio fue de 0,44. Al considerar el efecto de la topografía, varias torres falladas revelan un incremento significativo de las velocidades de viento que alcanzó valores (máximos promedio en 10 min) por encima de 100 km/h y hasta 315 km/h en algunos casos.

**Caso de estudio: falla de la torre Jacán**

Una de las torres falladas cuyo estudio cualitativo fue llevado a cabo, fue la torre ubicada en la loma de Jacán, Matanzas y su colapso se produjo en el año 2001 como consecuencia del paso del huracán Michelle. Anteriormente, una torre ubicada en el mismo lugar había colapsado en décadas pasadas según datos de archivo. Se desconocen las características de dicha torre por lo que el estudio se centró en la última torre caída cuyos datos se pudieron recolectar. Esta torre estaba situada al norte de la provincia de Matanzas, a una altura de 99 m sobre el nivel del mar. Era una torre atirantada de con un fuste de sección triangular conformado por columnas, tranques y diagonales, (figura 2a). La torre presentaba una altura total de 73,36 m sobre el nivel del terreno construida en la década del 80. La misma contaba con cuatro niveles de cable a diferentes alturas, de los cuales dos eran antitorsos (figura 2b) y dos eran cables simples. Todos los cables convergían a un solo anclaje por cada eje radial. Los tres anclajes de la torre (A, B, y C), tenían la misma composición de cables y de herrajes para su fijación. Los tres anclajes (A, B y C) se encontraban separados a  $120^\circ$  uno del otro en planta, dos de ellos (A y B) estaban a una distancia de 28,5 m de la base de la torre y el restante a 25 m, lo que muestra una ligera asimetría en planta. Los anclajes también estaban dispuestos de manera asimétrica en el plano vertical, ya que uno se encontraba al mismo nivel de la base de la torre (A), el segundo a 10 m por debajo (B), y el tercero a 2 m por encima (C). Ver figura 3.

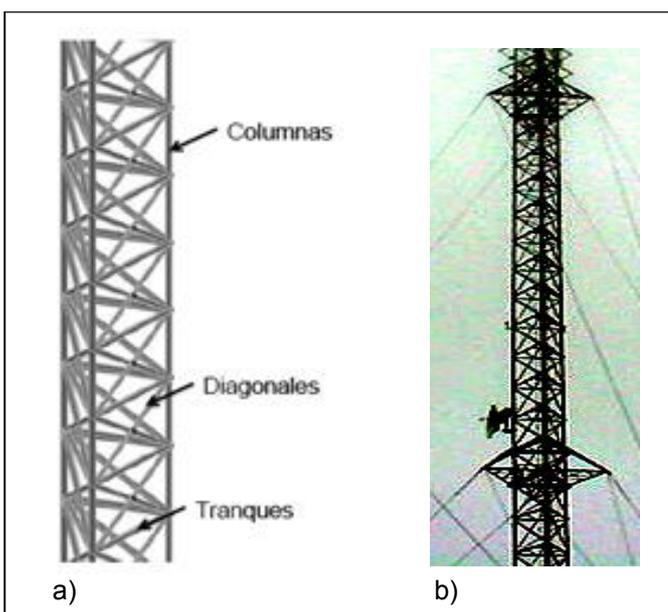


Fig. 2. a) Elementos componentes del fuste; b) Antitorsos.

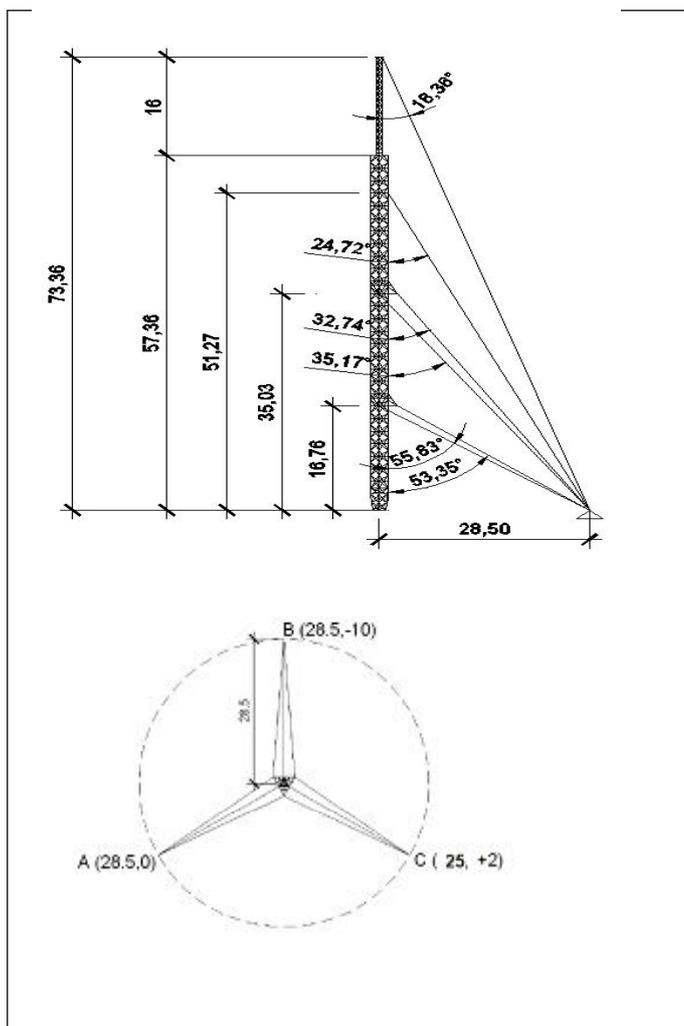


Fig. 3. Disposición de los anclajes de la torre Jacán en coordenadas ( $\phi$ ;  $z$ ).

El huracán Michelle se desarrolló a partir de la depresión tropical no. 15 de la temporada, surgida el 29 de octubre de 2001. Su entrada en la isla de Cuba ocurrió por el Sudeste de la provincia de Matanzas, al atravesar la Bahía de Cochinos, entre Playa Larga y Playa Girón, con vientos máximos de 210 km/h y salió al mar debilitado con vientos máximos sostenidos de 150 km/h (límite superior de la categoría 1), por Cayo Isidoro, Villa Clara (figura 4). La influencia de la circulación ciclónica de sus vientos alcanzaba hasta unos 500 km de diámetro y cubría desde la porción oriental de Pinar del Río hasta la provincia de Ciego de Ávila, incluyendo a la Isla de la Juventud y los cayos adyacentes. El ojo o zona central de calma tenía un diámetro de unos 40 km, por lo que en toda su trayectoria la zona de calma y vientos máximos sostenidos se extendía aproximadamente a 20 km a ambos lados de la misma.

Teniendo en cuenta estos datos y la disposición geográfica del objeto de estudio, se determinó la velocidad del viento máxima registrada en las estaciones meteorológicas más cercanas a la torre. Conocidas a partir del estudio de campo, las características geográficas de ubicación de la torre en una colina, se determinó el incremento de velocidad de viento

estimado por topografía local, con lo que se estimó la velocidad en el momento de la falla a 10 m de altura sobre la torre como de 144 km/h.

En las figuras 5 y 6 se muestran las fotografías obtenidas de la torre Jacán después de su caída al paso del huracán Michelle.

En la figura 5 se observa la caída de la torre ladera abajo, hacia donde se encontraba el anclaje más descendido con relación a la base (B), (10 m por debajo de la base de la torre), y se observan algunas de las parábolas que se encontraban colocadas en el momento del colapso. La figura 6 muestra, desde otro ángulo, la posición de la torre caída y sus componentes. Se observa también la presencia en tierra de uno de los cables, la relación entre el tamaño de las personas y la sección transversal de la torre, así como el desprendimiento de una sección de la torre durante la caída para una zona de antenas situada a una altura promedio entre los 16 y 39 m de altura, entre dos niveles de cables con función resistente a la torsión.

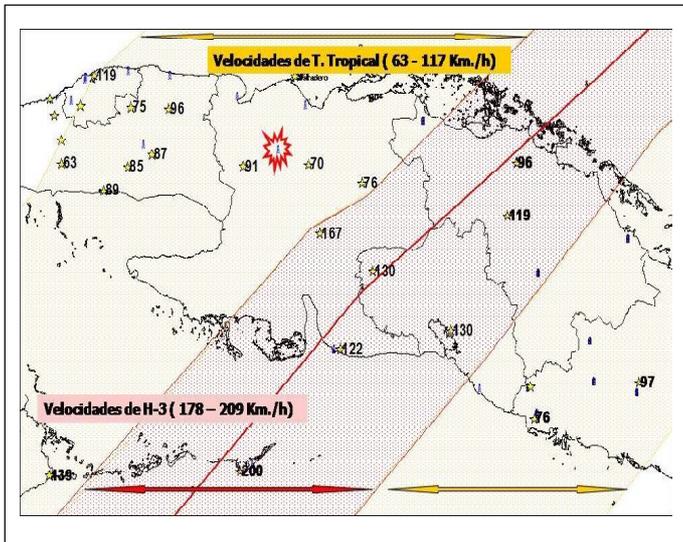


Fig. 4. Trayectoria de Michelle, estaciones meteorológicas y ubicación de la torre Jacán.



Fig. 5. Caída de la torre Jacán ladera abajo.



Fig. 6. Presencia de grandes antenas en la torre.

En la figura 7 se observa la forma en que quedó el anclaje que se encontraba al mismo nivel de la base de la torre (A) después del colapso. Se puede apreciar cómo los elementos de unión de los cables al cemento han sido deformados producto de la caída de la torre, pero no hay ninguno de ellos roto.

Asimismo, en las figura 7 y 8 correspondientes al anclaje A, pueden reconocerse los elementos de unión que pertenecen al cable que alcanza el tercer nivel de altura de la torre (52 m sobre la base de la torre), y que posee un diámetro de 22 mm. Debajo se encuentran tres cables más, uno que corresponde al cuarto y último nivel (73 m de altura sobre la base de la torre) con un diámetro de 13 mm, y los otros dos cables que trabajan como antitorsores que pertenecen al segundo nivel del viento (34 m sobre la base de la torre), con 19 mm de diámetro.

Debajo de estos están los otros dos dispositivos que pertenecen al primer nivel de viento, antitorsor de 19 mm de diámetro a 16 m de altura.



Fig. 7. Anclaje A al mismo nivel de la base de la torre (proporcionado por ETECSA).



**Fig. 8. Anclaje A visto desde otro ángulo (proporcionado por ETECSA).**

En la figura 9 se observa el anclaje B, el que estaba a 10 m por debajo de la base de la torre. Se puede apreciar que sus componentes no sufrieron ninguna deformación o rotura, debido a que la torre se cayó en esa dirección, lo que condujo a que este anclaje no alcanzara grandes esfuerzos antes de la caída.

Las figuras 10 y 11 muestran el anclaje C, a 2 m por encima de la base de la torre. Se puede apreciar que algunos elementos se encontraban oxidados, por lo que la falta de mantenimiento de los elementos pudo ser otro elemento influyente en la caída de la torre debido a la dirección del colapso. Se observa la rotura de uno de los elementos de unión y la deformación del elemento de unión (tensor de anclaje) el último nivel de cable en la torre.

En la figura 12 se muestra la base de la torre, específicamente la punta donde se anclaba la columna B, en esta se observa que dos de los tres pernos que anclaban esa columna fueron cizallados, por los esfuerzos que generaron la caída, lo que demuestra que no resistieron los esfuerzos de cortante causados por el viento en la base de la torre.



**Fig. 9. Anclaje B a 10 m por debajo de la base de la torre (proporcionado por ETECSA).**

En los otros extremos de la base los esfuerzos solo arrancaron las cabezas de los pernos, quedando como se muestra en la figura 13, esta fue la consecuencia del vuelco de la torre hacia el anclaje B.



**Fig. 10. Anclaje C a 2 m por encima de la base de la torre (proporcionado por ETECSA).**



**Fig. 11. Anclaje C visto desde otro ángulo (proporcionado por ETECSA).**



**Fig. 12. Base de la torre B (proporcionado por ETECSA).**



Fig. 13. Condición en que quedaron los pernos de la base A y C de la torre (proporcionado por ETECSA).

## PROCESO DE MODELACIÓN DE LA TORRE JACÁN

### Modelación del fuste y anclajes

Muchas de las investigaciones realizadas sobre torres atirantadas, [7-9] utilizan el modelo de viga equivalente para representar la armadura espacial con las consiguientes equivalencias para simular las propiedades de una en otra. El modelo de viga equivalente ofrece una aproximación válida cuando no se presenta asimetría en la torre con un porcentaje de error aceptable con relación al modelo de armadura espacial (5 %). [10] La torre de telecomunicaciones colapsada presentaba asimetría tanto por la presencia de accesorios y antenas como por los anclajes, por lo que se rechazó la simplificación antes expuesta. Para la modelación de la estructura y obtención de las solicitaciones se utilizó el programa de cálculo por elementos finitos SAP2000 V11. Se modeló el fuste reproduciendo de forma detallada cada miembro de la armadura (columnas, diagonales y tranques horizontales) modelados como barras y conformando la estructura tridimensional de sección triangular equilátera (figura 14). Los extremos de las diagonales y tranques se consideraron articulados debido a la unión con los elementos de la columna por medio de un solo perno. Los elementos de la columna se consideraron continuos y arriostrados por los tranques en cada nivel de encuentro con los mismos.

El sistema de cables y anclajes, conjuntamente con los tres apoyos de la base del fuste, conforman las condiciones de apoyo de este. Los tres puntos de apoyo del fuste en su base fueron modelados como articulaciones considerando que la proximidad de los pernos en la plancha base del perfil es muy pequeña e incapaz de tomar momento. Los cables para el análisis fueron modelados como elementos de perfil catenaria con deformada inicial del cable calculada con el efecto de peso propio y de tesado inicial.

Los anclajes a tierra de los cables se consideraron como articulaciones espaciales teniendo en cuenta la incapacidad de los cables de tomar flexiones y despreciando la acción local de los elementos tensores de transición entre cable y anclaje a tierra.

### Modelación del material

El acero de los perfiles se consideró con una tensión mínima de fluencia de 280 MPa y un módulo de elasticidad

de  $2 \times 105$  MPa de acuerdo con los datos obtenidos de las torres existentes. El acero de los cables fue considerado con una tensión mínima de fluencia de 1 600 MPa y un módulo de elasticidad  $E = 2 \times 105$  MPa según las especificaciones del fabricante.

### Modelación de la carga

Para el cálculo de las torres de celosía se consideraron como cargas permanentes 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 el fuste, se realizaron de acuerdo con lo establecido en la norma cubana de acción del viento [11] para reticulados espaciales aplicando el valor de velocidad de viento estimada en el momento de la falla. El fuste de la torre se dividió en tramos de igual altura (6 m), en cuyo punto medio se consideró aplicada la carga de viento de forma concentrada sobre los tres nudos que se encuentran en los vértices (figura 15).

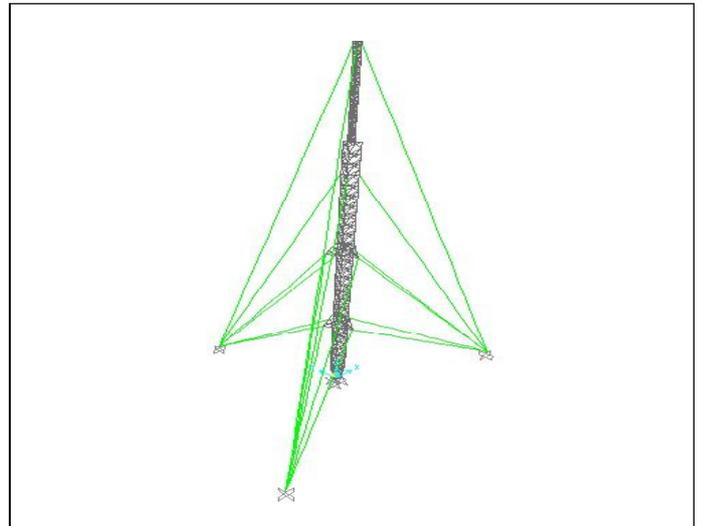


Fig. 14. Modelo computacional de la torre, tomado del software SAP-2000.

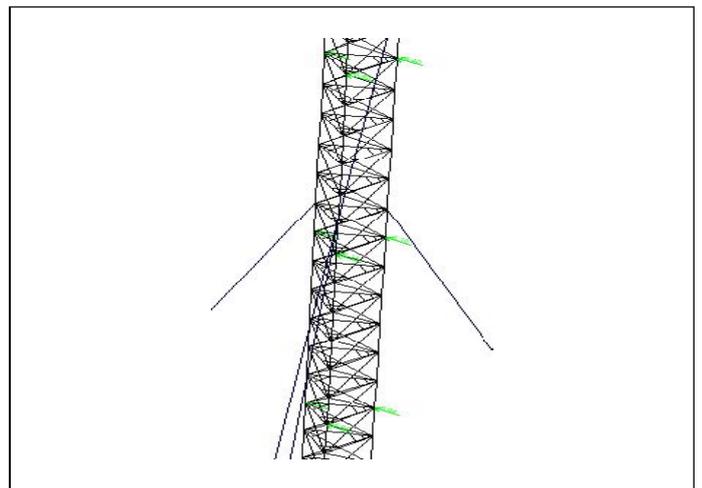


Fig. 15. Ubicación de las cargas de viento estáticas sobre el fuste.

La carga de viento sobre los cables se consideró uniformemente distribuida (figura 16). El valor se calculó a partir de la velocidad básica y los coeficientes correspondientes a la mitad de la altura entre el anclaje del cable y su nivel de sujeción en el fuste. La fuerza se aplicó en el sentido y dirección del viento teniendo en cuenta el ángulo formado entre el vector de viento y el cable según el caso de análisis.

La carga del viento sobre las antenas fue determinada a partir de la velocidad básica y considerando los coeficientes de forma según el tipo de antena y sus elementos componentes. La torre presenta tres tipos de antenas UHF, VHF y parábolas, (figura 17). Las antenas UHF están constituidas por paneles compactos ubicados en látigo de la parte superior. Las antenas VHF de dos y cuatro dipolos se encuentran en el último nivel de la torre. Las parábolas están ubicadas en la mitad inferior de la torre. En caso de las antenas parabólicas, el valor de las fuerzas que ellas producen sobre la torre depende de la altura de ubicación sobre el nivel de terreno, posición en la sección y ángulo de incidencia del viento sobre ellas. Los valores de fuerza axial, cortante y momento producidos por las parábolas se determinaron utilizando un software comercial (ANTWIND) basado en lo establecido en la norma TIA/ EIA 222 F. [12] La resultantes de fuerza axial, cortante y momento que genera la antena se asumen actuando sobre la torre en el punto de unión entre dos caras de la torre.

Se analizaron tres direcciones de viento probables de acuerdo con los resultados del estudio de ciclones en la zona (figura 18).

#### Estados de análisis

Se definieron dos tipos de análisis de la estructura lineal y no lineal geométrico debido a la edad de las torres falladas que suponen un tipo de análisis lineal para su diseño de acuerdo con los métodos válidos en ese momento. En todos los casos de análisis que se llevaron a cabo, ya sean lineales o no lineales, se requirió como punto de partida un análisis inicial no lineal geométrico para establecer la matriz de rigidez geométrica de los cables, pues es a través de la tensión que generan su rigidez.

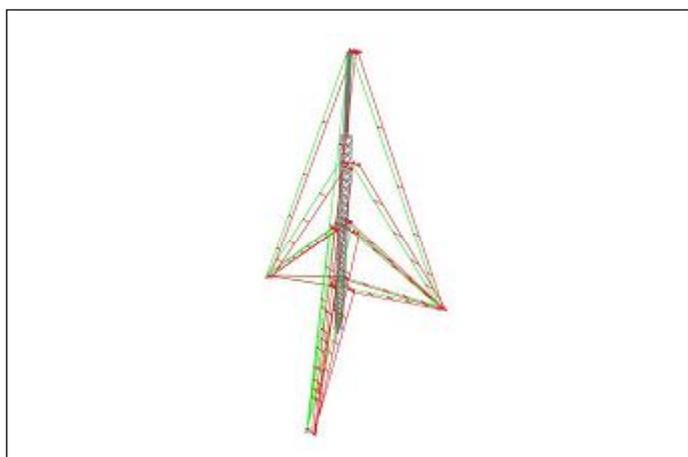


Fig. 16. Esquema de las cargas de viento en los cables.

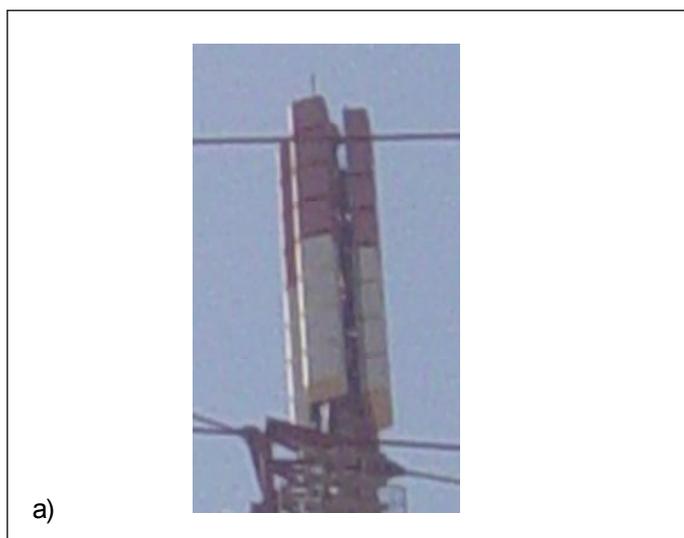


Fig. 17. Tipos de antena: a) Antenas UHF; b) Antenas VHF; c) Parábolas.

El método seguido para análisis la estructura fue a partir de diferentes estados de análisis, dentro de los cuales se involucran todas las cargas a considerar. Los estados de análisis aplicados fueron denominados: estado inicial (EI), estado final sin antenas (EF S/A) y estado final con antenas (EF C/A).

Se tomó como estado inicial el estado de equilibrio alcanzado para las cargas permanentes y tensión inicial de los cables. El tesado de los cables se consideró a través de una fuerza impuesta en el extremo del cable en unión con el anclaje con un valor aplicado en todos los casos entre el 8 y el 15 % de la carga de rotura del cable especificada por el fabricante según se recomienda en las normas y códigos relativos a torres atirantadas. [13, 14] Dadas las condiciones de asimetría de la torre no se pudo trabajar con una única tensión inicial para todos los cables ya que esta no es compatible con la verticalidad de la torre.

El análisis lineal se hizo a partir de la aplicación lineal de la carga de viento, luego de obtenido el estado inicial de peso propio y tesado de cables por medio de un análisis no lineal.

Para el estado final sin antenas (EF S/A) las condiciones de partida del análisis no lineal fueron las condiciones finales del estado inicial agregando la carga de viento sobre fuste y cables, mientras que el estado final con antenas (EF C/A) agrega al anterior la carga del viento sobre las antenas aplicadas en el fuste en el lugar de ubicación de estas.

## RESULTADOS DEL ANÁLISIS

Se determinaron los esfuerzos en los elementos de la estructura para los diferentes estados de análisis, tomando como base la carga de viento correspondiente a la velocidad de viento estimada en el fallo. Después de haber procesado los resultados de la modelación para las tres direcciones de viento probables sobre la torre, se pudo conocer que las mayores tensiones de los elementos se originaron bajo la acción del viento en la dirección de cero grado, es decir, en la cara opuesta al anclaje B descendido, siendo los elementos diagonales los más críticos en cuanto a solicitaciones y el anclaje en cota cero, el que más incrementos presentaba para la condición de falla.

Las fotografías de la torre después del fallo evidencian que el colapso ocurrió para la condición más desfavorable obtenida en los resultados de la modelación. Se demostró también con los resultados comparativos entre un modelo ideal simétrico de la torre y el real considerando la asimetría de los anclajes, que esta puede influir negativamente en el comportamiento estructural ya que se encontraron incrementos de las solicitaciones en la mayoría de sus elementos componentes de la estructura.

Según los resultados de la simulación se encuentran en fallo varios elementos del fuste. La tabla 2 expone el número de elementos cuya capacidad se encuentra excedida de acuerdo con la carga aplicada, así como fallos por pérdida de estabilidad. De acuerdo con la relación demanda/capacidad, los elementos más críticos de la torre resultaron ser las diagonales. Estos resultados fueron obtenidos a partir del software SAP 2000 v. 11.

Los cables se encuentran trabajando con valores por debajo de su capacidad para los valores de carga de viento estimada de fallo, por lo que no parecen ser elementos determinantes del fallo en este caso (tabla 3).

Con relación a los apoyos, se pueden apreciar incrementos de las fuerzas en anclajes según la modelación realizada a partir de las condiciones reales de apoyo asimétricas y de la consideración de análisis no lineal y la consideración ideal de apoyos en un mismo nivel y linealidad de respuesta supuesta para el diseño. Estos resultados son resumidos en la figura 19.

En los puntos de unión del fuste a la base se aprecia un aumento significativo de los valores de compresión transmitidos por las columnas a la unión, así como un aumento de las fuerzas de cizallamiento de hasta un 26 % con relación al modelo simétrico de torre. Esto pudo provocar el fallo de la unión con la rotura de los pernos de anclaje de la base. Ver tablas 4 y 5.

Tabla 2  
Elementos en fallos de acuerdo con la dirección del viento

Elementos	Viento 0°	Viento 90°	Tipo fallo	Máxima relación demanda/capacidad
Diagonales	52	38	Pérdida de estabilidad	1,8
Columnas	7		Resistencia	1,39
Diagonales torreta	23	17	Resistencia	1,5
Columnas torreta	2	2	Resistencia	1,06

Tabla 3  
Fuerza axial en los cables expresado en porcentaje de la carga de rotura

Nivel cable	Cota (m)	EFINAL S/ANT		EFINAL C/ANT	
		0	90	0	90
A1	16	14%	15%	19%	18%
A1	16	12%	13%	14%	13%
A2	35	12%	13%	12%	13%
A2	35	18%	21%	31%	37%
A3	51	10%	11%	12%	16%
A4	73	15%	17%	35%	41%

Nota: EFINAL S/ANT: Estado final sin antenas.  
EFINAL C/ANT: Estado final con antenas.

En la simulación de la falla no se tuvieron en cuenta otros factores que pudieron actuar de forma aún más desfavorable para la torre tales como: relajación de los cables por el paso del tiempo, deterioro de secciones por corrosión, efectos de fatiga en los elementos y deterioro de las uniones entre los elementos. Las fotografías recopiladas de las fallas indicaron en varios casos fallos en anclajes y rotura de cables que ratifican los resultados de la modelación.

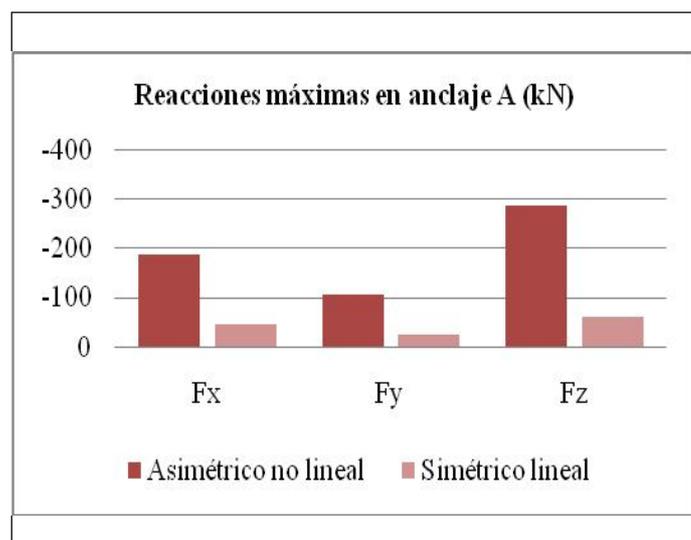


Fig. 19. Comparación de las reacciones máximas obtenidas en el anclaje A para el modelo de torre simétrico y asimétrico, con análisis lineal y no lineal de la estructura con carga de viento con antenas.

	0			90		
	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
A	3,67	8,20	-24,33	10,81	2,81	-69,24
C	3,67	8,20	-24,33	6,55	0,32	141,72
B	0,00	7,15	159,22	6,08	2,42	36,94

	0			90		
	Fx	Fy	Fz	Fx	Fy	Fz
A	13,03	11,55	-219,5	9,4	16,4	-190,05
C	12,27	10,31	-161	11,97	7,85	-290,38
B	0,639	12,6	-312	2,6	12,15	-188,47

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permitieron identificar como causas probables de falla en la torre los siguientes factores:

- Incremento de las solicitaciones por concepto de presencia de gran número de antenas en la dirección fundamental de incidencia del viento.
- Presencia de asimetría en anclajes no prevista en el diseño que contribuyó al aumento de las solicitaciones en los elementos estructurales.
- Comportamiento altamente no lineal no contemplado en los cálculos de la estructura para las velocidades de viento que incidieron en la torre.

El análisis computacional permitió obtener de forma individual en cada elemento de la estructura, los efectos de las cargas antes y en el momento de la falla, lo cual contribuyó a determinar los elementos más vulnerables de la torre. El análisis cualitativo resultó imprescindible junto a la simulación matemática ya que posibilitó retroalimentar el modelo computacional, considerar las condiciones más probables y descartar resultados poco probables obtenidos de la modelación por no constatación de los mismos en la realidad o datos de campo. La metodología seguida en este trabajo permite abordar otras estructuras similares para estudios de vulnerabilidad estructural.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración y ayuda brindada por la ingeniera Daselys San Miguel, quién contribuyó en los resultados de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. BRUNEAU, M.; MAGUED, M. and DRYBURGH, R. "Evolution of design standards and recorded failures of guyed towers in Canada". *Canada Journal Civil Engineering*. 1989, vol. 16, p. 725-732.
2. MIKITARENKO, M. A. and. PERELMUTER, A.V. "Safe fatigue life of steel towers under the action of wind vibrations". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 1998, p. 1091-1100.
3. MULHERIN, N. D. "Atmospheric icing and communication tower failure in the United States". *Cold Regions Science and Technology*. 1998. vol. 27, p. 91-104,
4. ELENA PARNÁS, V. "Influencia de la asimetría y la no linealidad de los cables en la vulnerabilidad estructural de torres atirantadas". Tesis, Departamento de Ingeniería Civil. Cujae, La Habana, Cuba. 2008.
5. \_\_\_\_\_. "Acción del viento en las torres de celosía para telecomunicaciones". *Ingeniería Civil*. junio 2007, año 61, nº 1, p. 26-30.
6. \_\_\_\_\_. *Influencia de anclajes asimétricos en torres reticuladas atirantadas bajo la acción estática del viento*. Ingeniería Civil, CEDEX. 2008, p. 151.

7. **KAHLA, N. B.** "Equivalent beam-column analysis of guyed towers". *Computers & Structures*. 1995, vol. 55, n° 4, p.631-645.
8. **WAHBA, Y.; MADUGULA, M. and MONFORTON, G.** "Evaluation of non-linear analysis of guyed antenna towers". *Computers and Structures*. 1998, vol. 68, p. 207-212.
9. **GREY, M.** *Finite Element Seismic Analysis of Guyed Masts*. University of Oxford, UK: Oxford, 2006.
10. **GANTES, C. et. al.** "Modeling, loading, and preliminary design considerations for tall guyed towers". *Computers & Structures*. 1993, vol. 49, n° 5, p. 797-405.
11. **NC-285**, *Carga de viento. Método de cálculo*. Cuba. 2003.
12. **TIA-EIA/222-F**, *Normas estructurales para torres y estructuras de acero para antenas*. USA: Telecommunications Industry Association. 1996.
13. **BS8100-4**, *Lattice towers and masts Part 4: Code of practice for loading of guyed mast*. British Standards Institution, London, UK. 1995.
14. **TIA/EIA-222-G**, *Structural standards for Steel Antenna Towers and Antenna Supporting Structures*. Telecommunications Industry Association, USA. 2005.

## AUTORAS

### Vivian Elena Parnás

Arquitecta, Doctora en Ciencias Técnicas, Profesora Titular, Facultad de Arquitectura, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

### Patricia Martín Rodríguez

Ingeniera Civil, Instructora, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba

## The Computational and Qualitative Analysis of Failures in the Studies on the Vulnerability of Guyed Towers

### Abstract

Guyed masts are a specialized type of structure commonly used in the broadcasting industry to support equipment at substantial heights. Surprisingly, the failure rate of this structural typology with respect to others of similar complexity is high. Therefore, this study searches for the reason behind the failure of telecommunication towers under extreme wind action, which does so by making a comparison between qualitative analysis and the physical –mathematic computational models of the failed towers. The results of the physical- mathematic models are obtained by means of a non –lineal geometric analysis of the structures. Results are then discussed after which are used to outline the importance of both studies as a means of validating results

Key words: lattice tower, failure, vulnerability, wind loads