

Evaluación de la vulnerabilidad física de una estructura tipo torre por el método de los elementos finitos

Luisa María Véliz Marrero

Correo electrónico:lmveliz@mecanica.cujae.edu.cu

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

Resumen

La vulnerabilidad constituye un sistema integral que surge como consecuencia de la interacción de una serie de factores y características internas y externas. El resultado de esa interacción es el *bloqueo* o la incapacidad del objeto analizado para responder adecuadamente ante la presencia de un evento determinado con el consecuente daño y/o la interrupción de sus funciones. Este trabajo hace referencia a la vulnerabilidad física, la cual analiza específicamente la localización de asentamientos humanos y el diseño deficiente de estructuras físicas. La vulnerabilidad se evalúa para todas las categorías de eventos que, como resultado de un análisis de peligros, que pueden afectar el objeto analizado independientemente de las condiciones de diseño establecidas. Además, es el proceso por el cual se precisa el grado de pérdida o daño causado por los eventos naturales y/o tecnológicos, de una categoría determinada en un tiempo específico y que incluyen los daños a personas y las pérdidas materiales. También se analiza la interrupción de las actividades económicas y el normal funcionamiento de la sociedad, aspecto que se conoce por vulnerabilidad funcional. En este trabajo se obtiene la evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad a torres de telecomunicaciones ante el efecto de huracanes, utilizando el método de los elementos finitos (MEF).

Palabras clave: vulnerabilidad, evaluación, desastres naturales, torre de comunicación

Recibido: 26 de noviembre del 2010

Aprobado: 4 de abril del 2011

INTRODUCCIÓN

Debido a que la vulnerabilidad es la susceptibilidad de manera global de un bien expuesto a la ocurrencia del peligro, el primer paso en estos estudios es el análisis de los peligros, es decir, de los efectos potencialmente dañinos de todos los eventos naturales y/o antrópicos peligrosos que lleguen o no a causar desastres. Se consideran peligros de origen natural para Cuba, por su posición geográfica en el Caribe, los ciclones tropicales, las tormentas locales severas, las intensas lluvias, las penetraciones del mar y los movimientos sísmicos. Estos fenómenos pueden o no ocurrir y serán de mayor o menor intensidad en dependencia de la región del país donde se realice el estudio.

Entre los peligros causados por el hombre (antrópicos) el que más afecta a las estructuras son los incendios de grandes proporciones, aunque se debe prestar atención también a las malas operaciones que provoquen una explosión, un escape de sustancias peligrosas o un derrame de hidrocarburos. [1, 2]

Para identificar los elementos vulnerables es necesario establecer un orden lógico en el cual el siguiente paso es la clasificación de los componentes en elementos estructurales, no estructurales y funcionales.

Los *elementos estructurales* son los encargados de resistir y transmitir a la cimentación y luego al suelo, las fuerzas de peso propio, cargas de uso y las provocadas por los eventos naturales antes mencionados.

Los elementos *no estructurales* son todos aquellos que sin formar parte del sistema resistente de la estructura son fundamentales para el correcto desarrollo de su función, definen su designación y su valor de uso. Se dividen en *elementos constructivos o arquitectónicos*, y en *instalaciones básicas*, como la electricidad, agua potable, vapor, vacío, energía, climatización, ventilación y otros.

Por *elemento funcional* se entiende la pérdida de producción o de servicios como consecuencia en primer lugar del colapso estructural y no estructural.

A partir de esta clasificación se puede observar la interrelación entre los elementos, pues una falla estructural puede ocasionar una falla de los componentes no estructurales y por consiguiente el colapso funcional. Pero además, si elementos no estructurales como marquetería y vidrios no resisten, puede dañarse a su vez la estructura y decidir la vulnerabilidad funcional de la instalación. Es por esta razón que un estudio y evaluación de la vulnerabilidad estructural y no estructural se hace imprescindible en cualquier proyecto y objeto de obra.

MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Existen diferentes métodos para la evaluación de la vulnerabilidad estructural y no estructural que son tratados en la literatura, diferenciándose unos de otros esencialmente en si el evento peligroso al cual se expone el bien analizado, es de origen natural o tecnológico.

Cuando el peligro es de origen tecnológico se necesita conocer el funcionamiento de la instalación y los motivos por los que puede ocurrir una falla que llegue a desencadenar un desastre. Uno de los métodos más utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad de las instalaciones a esos peligros es el de William Fine, así como el "Método de Árbol de Fallas", "Que sucede si" y otros.

La evaluación de la vulnerabilidad a peligros de origen natural de elementos estructurales y no estructurales se tratará con más profundidad dividiéndose los mismos en:

- Métodos cualitativos
- Métodos cuantitativos

En el método cualitativo se evalúa la vulnerabilidad de una forma rápida y sencilla a una muestra numerosa de elementos y/o instalaciones para seleccionar los que necesitan un análisis más detallado, con el fin de establecer el orden de prioridad de intervención. Esto se puede realizar utilizando la matriz prioridad, que se muestra en la tabla 1 y donde de antemano se necesita especificar para qué peligro se realiza la evaluación y qué se considera para el elemento una vulnerabilidad *alta*, *media* y *baja*, según la responsabilidad, su costo y el rol que juegue dentro del contexto. También será necesario definir en cada caso qué consecuencias de falla o daño en el componente se estimarán con categoría de *baja*, *moderadas* y *altas*. Cuando el componente represente una alta probabilidad de ocasionar lesiones o incluso la muerte a los ocupantes o de comprometer seriamente el funcionamiento de la instalación será valorada de *altas consecuencias*.

Si el resultado del análisis da prioridad 1 es necesario pasar al método cuantitativo de evaluación para profundizar

en el resultado del método anterior y analizar el porcentaje de daños en una instalación que por su importancia así lo merite; este método utiliza habitualmente un procesamiento matemático de datos. Generalmente la estructura tipo torre que se estudia se evaluará mediante una modelación por elementos finitos en la cual se considerará la interacción de dicha estructura con los elementos no estructurales (antenas), las cargas reales a las cuales está sometida y la simulación del evento ya sea fuerza del viento o sismo. Otra forma de evaluación cuantitativa la constituye la certificación del fabricante.

Tabla 1
Matriz prioridad para establecer el orden de intervenciones ante un peligro con una intensidad determinada y en un tiempo determinado

Vulnerabilidad	Consecuencias		
	Altas	Moderadas	Bajas
Alta	1	4	7
Media	2	5	8
Baja	3	6	9

MODELACIÓN DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL

Se realizó la modelación de una de las torres de telecomunicaciones, encargada de recepcionar las señales nacionales de radio y televisión, así como de telefonía celular y otras comunicaciones especiales con el objetivo de conocer cuán vulnerable es a fuertes vientos. La estructura se analizó con el programa SAP2000. La modelación de la torre se realizó directamente mediante el editor del programa. Las dimensiones y condiciones de carga se obtuvieron a partir de un levantamiento in situ.

El primer paso es la convicción de que verdaderamente es necesario realizar la evaluación de forma cuantitativa, y en este caso se justifica debido a que ante la proximidad de un evento acompañado por fuertes vientos de cualquier magnitud, las comunicaciones cesarán, pues las antenas no resistirán y más de una torre ha quedado parcial o totalmente dañada. En la figura 1 aparecen detalles de los elementos principales de la estructura y en la figura 2 los elementos no estructurales.

La ubicación geográfica será decisiva en este análisis, debido a que aportará los peligros más frecuentes, la magnitud de las fuerzas que se simularán y las direcciones más probables de los vientos y con esto la selección de las secciones y los elementos verdaderamente más vulnerables. [3]

Los datos de la ubicación, tipo y dimensiones de la torre y las consideraciones para la carga de viento aparecen a continuación.

- Altura sobre el nivel del mar: 380,0 m.

- Tipo de estructura: Torre atirantada, modelo MAR – 181, según el folleto realizado por la División de

Antel, COPEXTEL S.A. en el año 2003, para uso interno de los diseñadores e instaladores de torres de transmisiones.

- El cálculo de las fuerzas provocadas por el viento se efectuó según la Norma TIA/EIA-222-F. [4] Se realizó el estudio para las velocidades de 152 km/h y 176 km/s correspondientes a los valores extremos de las Categorías I y II de huracanes en la Escala Safir Simpson. [5]

- Topografía del lugar: Sitio expuesto.
- Período de recurrencia: Se ha considerado 50 años.
- Altura de la torre: 72,49 m.
- Lado de la base: 2,45 m.
- Geometría de la base: Triangular.
- Peso de la torre: 15,16 t.

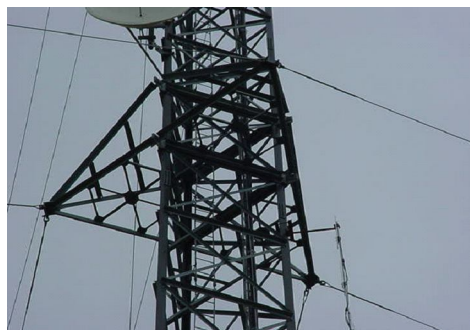


Fig. 1. Detalles de uno de los antitrsorsos de la torre (superior); condiciones de apoyo (centro); vista parcial de la estructura (inferior).

a)



b)



Fig. 2. Condiciones de carga: a) Paneles UHF; b) Parábola de 1,8 m de diámetro.

DETALLES DEL MODELO DE LA TORRE

En la figura 3 se observan detalles del modelo de la torre.

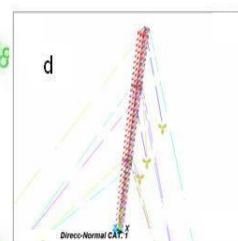
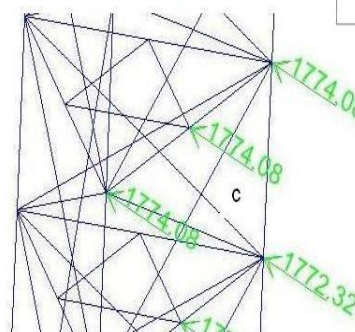
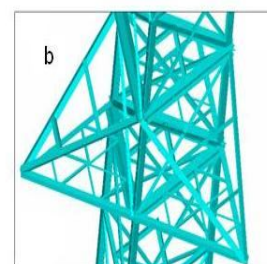
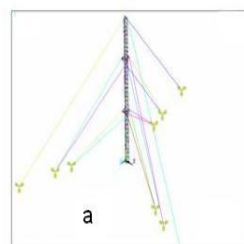


Fig. 3. Detalles del modelo: a) Modelación de la estructura; b) Detalle del antitrsor; c) Algunas fuerzas aplicadas en una sección de la torre; d) Fuerza del viento sobre la estructura incidiendo en la dirección normal.

Se consideraron 6 casos de cargas en el análisis de la torre, así como 4 combinaciones. Estas son:

- Carga 1: Peso propio de la torre (es generado por el programa).
- Carga 2: Componente estática de la carga de viento, para Categoría I. [5].
- Carga 3: Carga debida a la parábola de 1,8 m de diámetro.
- Carga 4: Carga debida a los paneles VHF, Canal 2.
- Carga 5: Carga debida a los paneles VHF, Canal 6.
- Carga 6: Carga debida a los paneles UHF.
- Carga 7: Componente estática de la carga de viento, para Categoría II.
- Combinación 1: Resultante de cargas 1 + carga 2 + carga 3.
- Combinación 2: Efecto de los paneles UHF en la torre.
- Combinación 3: Efecto de los paneles VHF + paneles UHF.
- Combinación 4: Resultante de carga de peso propio + carga estática del viento + carga de los paneles VHF y UHF.

Realizado el modelo de la estructura y aplicada la carga se plantean las siguientes consideraciones:

a) Una vez que la torre se modeló y considerando solamente el peso propio, se efectuó una corrida de datos para determinar el período de oscilación de la estructura, lo cual se obtuvo mediante un análisis dinámico impuesto para 5 modos de vibración. El valor del periodo en cada caso fue menor que un segundo, como se muestra en la figura 4. De este análisis se determina que para la carga de viento basta con hacer solamente un análisis estático. Para valores mayores de un segundo se necesita además un análisis dinámico. [3]

b) Los sistemas de carga empleados, así como las solicitaciones y diagramas de interacción se obtuvieron para las cargas señaladas, incluyendo sus combinaciones. Como puede deducirse del resultado obtenido, la combinación 4 resultó la más desfavorable por lo que se analizan los resultados que se exponen.

c) Como resultado de la aplicación del programa, se obtuvieron los desplazamientos (lineales y angulares), que se muestran en la tabla 2 y figura 5, así como los diagramas de interacción. La comprobación del diseño se realizó mediante la norma AISC-LRFD (AISC 1994). American Institute of Steel Construction's "Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings".

RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados más importantes que se obtienen son:

Valores de desplazamientos máximos

Estos se presentan en la tabla 2 y se grafican en la figura 5.

Diagramas de interacción para fuerzas de viento Categoría I

En la figura 6 se observa que la zona afectada es la inicial, señalada con un círculo, cuando azotan vientos de Categoría I (hasta 152 km/h), con las antenas colocadas. Ninguna otra zona presenta problemas

Diagramas de interacción para fuerzas de viento Categoría II

La figura 7 muestra cómo fallan diagonales en todas las zonas de la estructura cuando están expuestas a vientos de hasta 176 km/h.

Tabla 2
Valores de desplazamiento lineal y angular según la altura de la torre

Zona de la torre	Desplazamiento lineal (metro)		Desplazamiento angular (radian)	
	Categoría I	Categoría II	Categoría I	Categoría II
Superior	0,054 3	0,134 6	0,001 08	0,002 54
Cerca del segundo antitensor	0,064 5	0,147 7	0,000 36	0,000 43
Cerca del primer antitensor	0,047 2	0,090 9	0,001 33	0,003 05
Inicial (cuatro niveles)	0,026	0,05	0,001 4	0,033

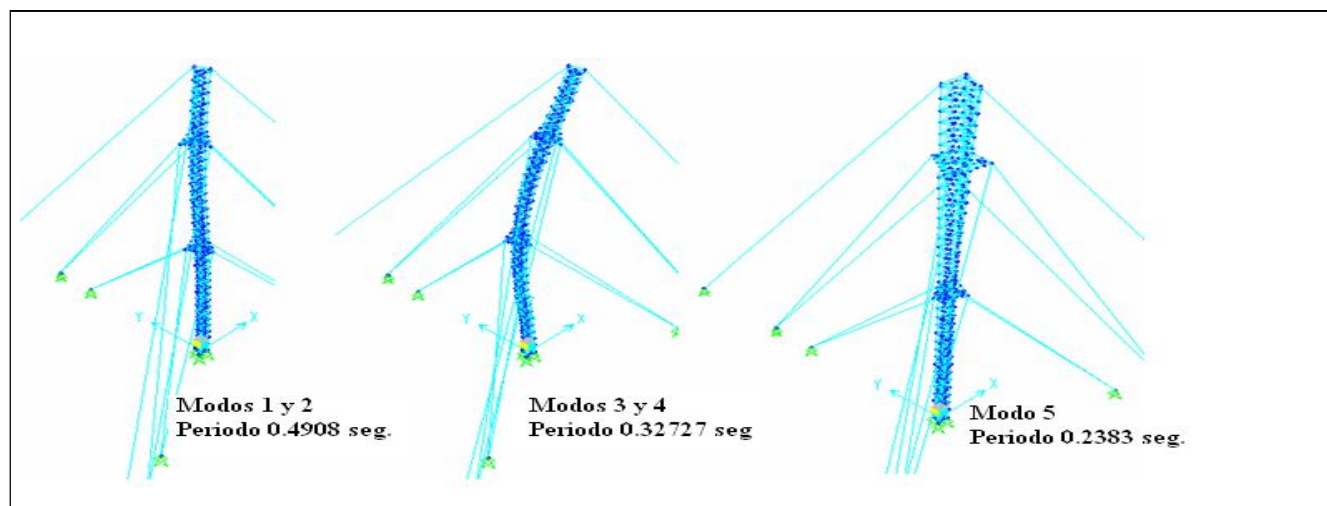


Fig. 4. Representación de los cinco modos de vibración correspondientes al análisis modal.

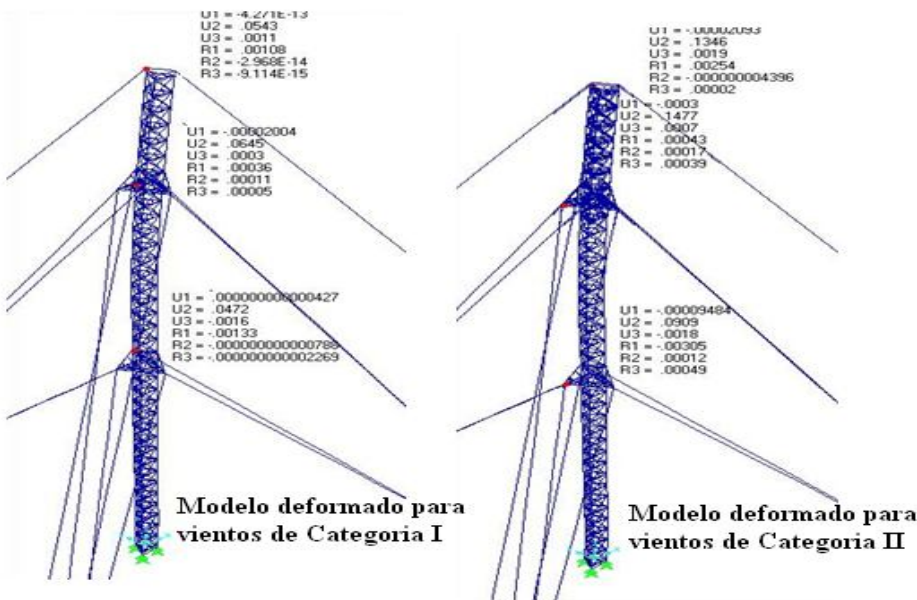


Fig. 5. Representación de la estructura deformada y valores de desplazamiento, bajo la acción de vientos de Categoría I (izquierda) y Categoría II (derecha), ambas con antenas (parábolas y paneles).

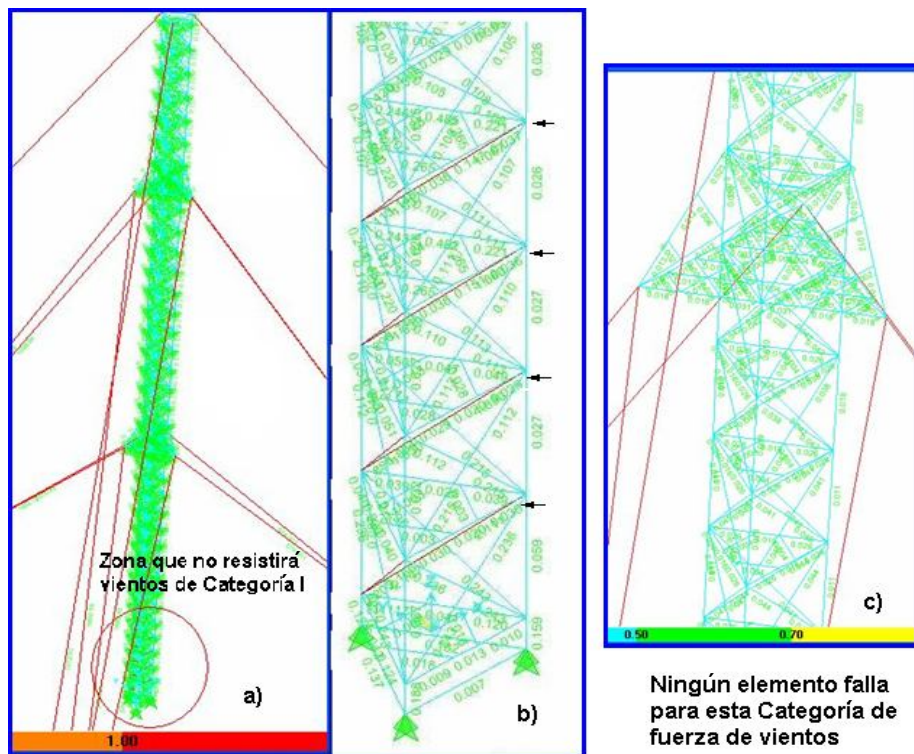


Fig. 6. a) La zona inicial de la torre marcada con el círculo no resiste vientos de Categoría I. b) Los elementos más vulnerables de esa zona son las diagonales marcadas con las flechas. c) En las restantes zonas de la estructura no hay fallas para vientos de Categoría I.

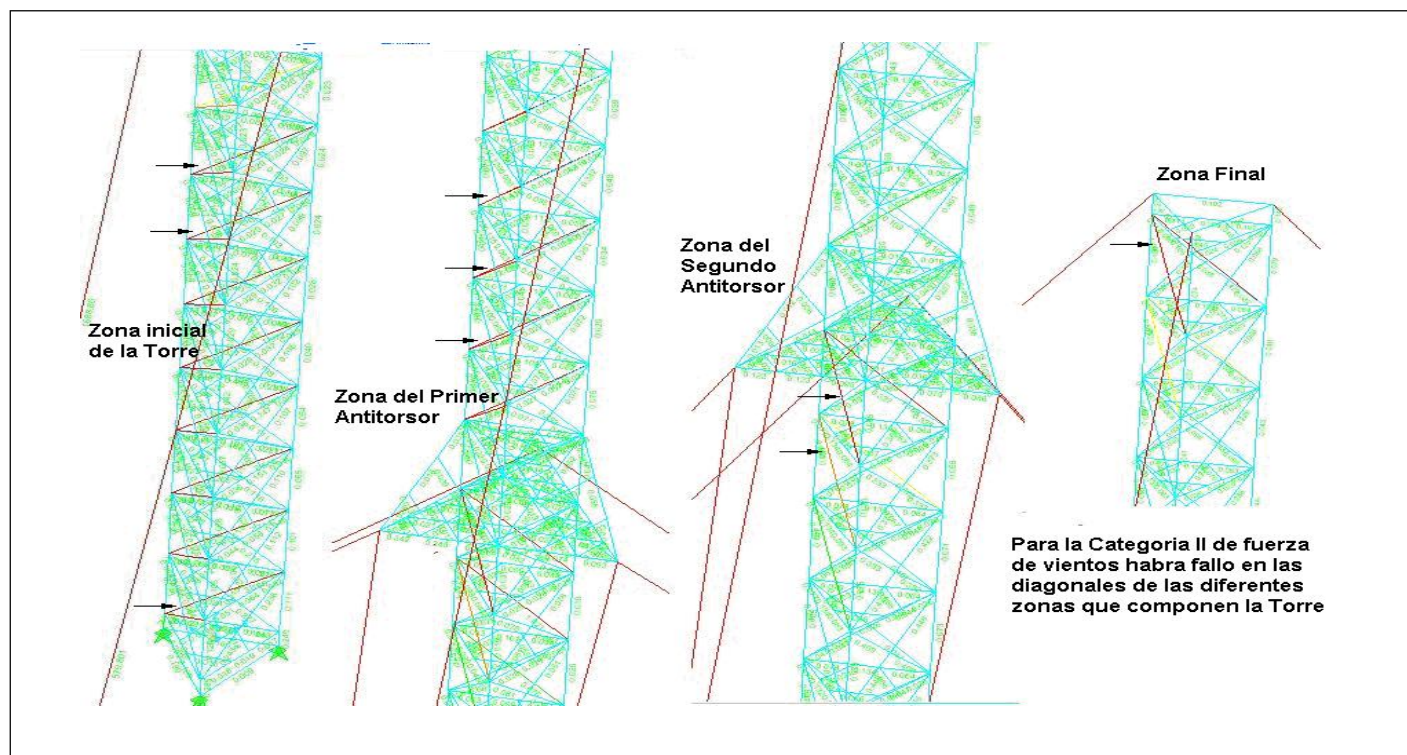


Fig. 7. Se observa que aumentan las diagonales con probabilidad de falla (flechas), además de aumentar el riesgo en las zonas del primer y segundo antitensor, y en el nivel final al actuar vientos de Categoría II con respecto a la figura anterior.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados se obtienen numéricamente, sobre cada elemento modelado, destacando con otro color, los elementos que fallan.

Los valores superiores a la unidad (el coeficiente de mayoración es de 1,3 y con respecto a este se compara para tomar una decisión) obtenidos en los diagramas de interacción (figura 6 y 7) son los elementos que fallan y expresan que **la carga externa es superior a la capacidad resistente de la sección**, lo cual permite arribar a la conclusión que se evidencia en la estructura una falla por pérdida de estabilidad de varios elementos, al ser la carga externa superior a la crítica de Euler. [6, 7] Esto viene motivado por la longitud que presenta la estructura en esa zona como luz de pandeo, asociado al radio de giro de la sección transversal. El efecto de compresión y el factor reductor por esbeltez disminuyen sensiblemente su capacidad resistente a la estabilidad. En la figura 7 se puede observar que prácticamente la mayor parte de las diagonales están en estado de falla con valores que sobrepasan la capacidad límite en un 50 %. Se analizó pormenorizadamente lo que sucede con los elementos del segundo antitensor, en el cual la principal causa de falla es la pérdida de estabilidad.

CONCLUSIONES

1. La torre atirantada estudiada, presenta fallas por estabilidad y resistencia, no garantizándose que la misma sea capaz de resistir velocidades de viento del rango de

Categoría I (hasta 152 km/h) en los primeros cuatro niveles de la **sección inicial** correspondientes a las diagonales con perfiles de 50x50x5 mm (figura 7). El resto de la misma resiste.

2. Para los vientos correspondientes a la Categoría II (hasta 176 km/h), la falla es en elementos de todas las zonas de la torre.

3. En los análisis efectuados no se tomó en cuenta efectos de debilitamiento de la sección por:

- Presencia de corrosión, que pudo observarse a diferentes alturas de la torre.
- Desajuste de los conectores o pernos, ya que algunos puntos en la parte superior de la torre se encontraban prácticamente sueltos.

Este estudio abarcó el análisis estructural de seis torres, dos de ellas atirantadas y ubicadas en sitios totalmente expuestos y a alturas de varios metros sobre el nivel del mar, el resto de las torres se localizaba en la ciudad. Según la geometría de la base, dos eran cuadradas, tres de base triangular y una tubular.

Como resultado del estudio dos torres fueron sustituidas y el resto reforzadas para que pudieran soportar el embate del viento hasta la Categoría III, con antenas desmontadas.

REFERENCIAS

1. GREDES. *Guía para los Estudios de Riesgo de Desastres*, Cujae, Ciudad de La Habana, 2005.

2. **Colectivo de autores.** *Diplomado Introducción a la Reducción de Desastres*. Cujae, La Habana, 2010, ISBN: 978-959-261-316-4
3. NC-285, Norma Cubana, *Cargas producidas por el viento. Método de cálculo*, 2003, p. 43.
4. TIA/EIA-222-F. Normas estructurales para torres y estructuras de acero para antenas, USA, 1996. [Disponible en Web: www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/Norma.pdf]. [Consultado: 2011-03-18].
5. *The Saffir-Simpson Hurricane Scale*, 2006 [Disponible en Web: www.nhc.noaa.gov/aboutsshs.shtml]. [Consulta: 2011-03-18].
6. **FEODOSIEV, V. I.** *Resistencia de los materiales*, Editorial Mir, URSS, 1972.

7. **PISARENKO, G. S.** *Manual de resistencia de materiales*, Editorial Mir, URSS, 1979. ISBN 9785884170353, 649p.

AUTORA

Luisa María Véliz Marrero

Ingeniera Mecánica, Máster en Mantenimiento Mecánico, Profesora Auxiliar, Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería Mecánica, Grupo Multidisciplinario de Estudio de Riesgos de Desastres, GREDES, Cujae, La Habana, Cuba

Evaluating the Physical Vulnerability of a Typical Tower Structure Using the Method of Finite Elements

Abstract

Vulnerability constitutes an integral system that arises as a consequence of the interaction between a series of factors and characteristics which maybe internal or external. The result of this interaction is the blocking or the inability of the analyzed object to respond appropriately to the presence of certain events with the consequent damage and/or the interruption of its functions. Hence, this project makes reference to the physical vulnerability that specifically analyzes the localization of human establishments and the faulty design of the physical structures. Vulnerability is evaluated for all categories of events which are likely to affect the analyzed object independent of the established conditions of the design. This same process determines: the degree of loss or damage caused by natural and/or technological events up to a certain category at a specific time; the hazard to human and the material losses. The interruption of the economic activities and the normal operation of the society are also analyzed, which are aspects known by functional vulnerability. This project applies the method of finite elements to obtain the quantitative evaluation of the vulnerability of telecommunication towers under the effects of hurricanes.

Key words: vulnerability, evaluation, natural disasters, communication towers