

FALLAS ESTRUCTURALES EN TORRES RETICULADAS PARA TELECOMUNICACIONES

Vivian Elena Parnás

Torre autosoportada fallada
ante paso de huracán.



Varias torres reticuladas de telecomunicaciones han colapsado en los últimos diez años en Cuba frente al paso de huracanes por la Isla. En este trabajo se expone la metodología seguida para el estudio de las fallas de las torres de telecomunicaciones en Cuba ante la ocurrencia de fuertes vientos. Se recogen los datos relativos a sesenta y ocho torres para las cuales se procesan datos estructurales, geográficos, y climatológicos correlacionados entre sí, analizando comparativamente, a través de ellos, las torres falladas y no falladas en el periodo 1996-2006. La cantidad de datos a procesar y la dispersión de los mismos solo permitieron un primer acercamiento al problema y dar conclusiones parciales al trabajo quedando abierto el camino para futuras investigaciones en esta área.

Palabras clave: fallas estructurales, torres reticuladas.

Some lattice towers collapses have been occurred since the last ten years in Cuba, with the incidence of hurricane winds. This paper describes the process followed to determine the causes of towers failures. Data of fifty eight lattice towers for antenna support was collected and classified into structural, geographical and weather conditions. A comparative analysis between collapsed and not collapsed towers conditions was made in order to determine the probable failure causes. Partially conclusions of the study are exposed.

Key words: structural failure, lattice towers.

VIVIAN ELENA PARNÁS. Máster en Ciencias. Ingeniera Civil. Profesora Auxiliar. Facultad de Arquitectura de La Habana, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. CUJAE. Ciudad de La Habana, Cuba.
E-mail: vivian@arquitectura.cujae.edu.cu

INTRODUCCIÓN

Las torres metálicas reticuladas o torres de celosías, destinadas a las telecomunicaciones, son estructuras de amplio uso en la actualidad. La necesidad creciente de estructuras altas que permitan la mejor comunicación de la radio y la televisión, así como el desarrollo de la telefonía celular, ha producido una aceleración en la construcción de torres soporte de antenas y ha ampliado las funciones de las ya existentes. Estas estructuras suelen ser elementos esbeltos y ligeros con un diseño condicionado fundamentalmente por las cargas ecológicas. Las fallas en este tipo de estructuras resultan frecuentes en relación con otros tipos estructurales, lo cual ha motivado la necesidad de investigaciones en torno a su comportamiento en las últimas décadas.

Existen diversos tipos de torres reticuladas de acuerdo con su sección transversal, a sus elementos componentes, etcétera, pero todas ellas se agrupan de modo general en dos grandes grupos atendiendo a su comportamiento estructural: torres autosoportadas y torres atirantadas.

Las torres autosoportadas se apoyan en la tierra o sobre edificios y se comportan como vigas en voladizo frente a la acción del viento y de las cargas sísmicas. Son por lo general de sección transversal variable que disminuye con la altura.

Las torres atirantadas se apoyan igualmente en la base, pero se encuentran arriostradas lateralmente mediante cables. La sección más frecuente para este tipo de torre es triangular equilátera y constante, en cuyo caso los cables salen desde los vértices del triángulo (a diferentes niveles) hacia los anclajes de tierra, en tres direcciones radiales espaciadas a 120 grados. Estas torres permiten mayor ligereza y menor consumo de material que las torres autosoportadas, pero tienen el inconveniente de necesitar mucho espacio o terreno circundante para el anclaje adecuado de los cables.

Recopilar los datos referidos a las torres y su entorno, y las condiciones en que colapsaron, es el primer paso imprescindible en el proceso de análisis de la falla. Las observaciones de la realidad, la recopilación de los datos de testigos, y el registro minucioso de la mayor cantidad de datos posibles permiten la mayor aproximación al objeto de estudio y el éxito de la investigación. Por eso en este trabajo, más que en dar respuestas al origen de las fallas, nos hemos propuesto organizar la información y desglosar variables que pueden tener incidencia en los colapsos de estas estructuras.

ESTUDIO DE LAS FALLAS EN INGENIERÍA

Las fallas estructurales —entiéndese por falla cuando un sistema o parte de él es incapaz de cumplir la función para la que fue concebida—, han estado presentes desde el mismo momento que el hombre empezó a crear. Junto con las fallas, surgió también la necesidad del análisis de las mismas con el propósito de prevenir fallas futuras.

En ingeniería es común referirse a las causas de fallas estructurales como errores de diseño, errores de construcción, falta de mantenimiento, fatiga, fractura de los materiales, daño accidental o malintencionado y fallas debido a la ocurrencia de eventos naturales extremos como sismos y huracanes.

Aunque las fallas estructurales sean tratadas como resultado de múltiples causas, en su sentido más estricto se deben a errores humanos. Los materiales que el hombre utiliza para crear estructuras, así como los sistemas estructurales creados por él, siguen sus propias leyes naturales. Si se produce una falla en ellos, será porque no han sido diseñados o concebidos respetando esas leyes. La falla en sí misma es el resultado de la acción humana y está siempre referida a los objetos que el hombre crea. (Los árboles se caen, no fallan frente a la acción del viento).

Los errores humanos, causa de las fallas, pueden ser de diferentes tipos: errores de concepción, errores de ejecución y errores intencionales (descuidos, incompetencia, negligencia, etcétera). Las fallas debido a errores de concepción, (entendiendo por ellos no los debido a la ignorancia, sino al desconocimiento motivado por el grado de desarrollo alcanzado o la no previsión de situaciones para las cuales la obra ha sido concebida), permiten a través de su análisis una mejor comprensión del comportamiento de los materiales y obras estructurales. La importancia del análisis de las fallas radica en que permite descubrir nuevas leyes, a partir de las cuales se elaboran nuevos modelos y teorías que generan desarrollo en esta esfera del conocimiento.

Si bien estos tipos de falla demuestran la incomprensión del verdadero comportamiento de la obra creada, el hecho de que una obra o estructura no falle no evidencia su adecuada concepción. Es por esto que las fallas estructurales, cuando son correctamente analizadas a través de registros fieles de las condiciones en las cuales se desarrollan, adquieren un valor importantísimo como elementos desencadenantes de desarrollo en la ingeniería y muchas veces en otras ramas de la ciencia.

Estas fallas maestras de la ingeniería, como fueron llamadas por el ingeniero Héctor Gallegos, son las que surgen en el proceso creativo del objeto "...es en la síntesis creativa donde reside la posibilidad de cometer un gran error conceptual: aquel que conduce a la falla total y que, por ello, encierra una lección imperecedera que termina, cuando es descubierta, analizada, comprendida y asimilada enriqueciendo la ingeniería toda".

El análisis de las fallas ha representado uno de los mayores incentivos para el avance del estudio de las estructuras frente a la acción del viento. La experiencia de las fallas en puentes de grandes luces en el siglo XIX, permitió a los ingenieros tomar conciencia de la importancia de las fuerzas de viento en el diseño de estructuras, fuerzas que hasta ese momento habían sido casi ignoradas. Desde las primeras investigaciones realizadas por Baker,¹ en Escocia, estimuladas a partir de la falla del puente de ferrocarril Tay² en 1879, hasta el presente, el estudio de las fallas ha producido una renovación en el pensamiento ingenieril, un estudio más profundo sobre el comportamiento estructural de las obras y de los materiales y en consecuencia ha sido impulso para el progreso de la ingeniería civil.

Investigaciones más recientes sobre las fallas de torres de celosías destinadas a las telecomunicaciones, Bruneau *et al.*³ M.A. Mikitarenko y A.V. Perelmuter,⁴ Mulherin,⁵ Laiho,⁶ reflejan que las torres atirantadas son estructuras con altos índices de fallas en relación con otros tipos estructurales. La mayoría de ellos, según se documenta, se produjeron en condiciones severas de trabajo debido a fuertes cargas de viento y hielo.

En los últimos años en Cuba se han producido varias fallas de torres de celosías vinculadas al paso de huracanes con la incidencia de altas velocidades de viento provocando no solo afectaciones a la economía, sino también a las comunicaciones. Se hace necesario evitar las fallas de estas estructuras, aún en regímenes severos de trabajo, para lo cual se hace imprescindible el estudio de su comportamiento estructural frente a la acción del viento, así como el estudio de las posibles causas que han determinado las fallas.

De acuerdo con la documentación revisada para este análisis, no existen en Cuba estudios sobre las fallas producidas en este tipo estructural, ni han sido identificadas las causas que las produjeron, sin embargo, la cantidad de torres colapsadas en los últimos diez años (treinta y tres torres de radio y televisión) amerita su estudio detallado.

LA ESTRUCTURACIÓN DE LOS DATOS

Para poder analizar una falla resulta esencial conocer las características del objeto de análisis y las condiciones del entorno en el momento de la falla, se necesita por tanto, la recopilación y el ordenamiento de datos de variada naturaleza tanto de uno como de otro. El éxito de este proceso, que abarca además las etapas de análisis y valoración, depende de la fidelidad de la información recogida y de la correcta selección y ordenamiento de los datos, en

tanto esta será la base sobre la cual se levantarán las hipótesis de las causas de la falla.

Los datos tanto del objeto de estudio como de su entorno, obtenidos por medio de levantamientos o datos de archivo, se integraron a través de un sistema de plantillas electrónicas y de un sistema de información geográfica (Mapinfo) que permitieron crear un marco para organizar la información con características geoespaciales. De esta manera la información quedó registrada en forma digital permitiendo el manejo de capas con datos de naturaleza variada, mapas interactivos y formatos visuales logrando la correlación de toda la información.

Se procesaron datos relativos a sesenta y ocho torres soporte de antenas de televisión, incluyendo las torres falladas.

El análisis de los factores que intervienen en el estudio presente permitió identificar la variada naturaleza del origen de los datos, notándose que no solo eran de tipo estructural, sino también ambientales. Atendiendo a este aspecto se definieron entonces tres grupos que recogen los datos de acuerdo con su origen: estructurales, geográficos y climatológicos siendo estos dos últimos modificantes del primero por la acción de sus parámetros.

Los **datos estructurales** (forma, material, carga y condiciones de apoyo) están referidos a: tipo de torre, año de construcción, altura sobre terreno, tipos de elementos, materiales, sección, niveles de viento, tipos de cables utilizados y cargas de antenas y accesorios sobre las torres.

Los **datos geográficos** están referidos a localización y condiciones del terreno donde se ubican las torres: longitud y latitud, altura sobre el nivel del mar, topografía local: tipo de terreno, exposición del sitio.

Los **datos climatológicos** están relacionados con las condiciones climatológicas vinculadas a las torres en el período de estudio.

• Datos estructurales

Geometría. Los factores considerados dentro de la geometría fueron: altura de la torre, sección transversal de la torre, secciones de las barras o elementos componentes de las torres, índice de área expuesta al viento o relación de solidez y efecto de protección de la cara a barlovento sobre la cara a sotavento.

Carga. Se tuvo en cuenta el peso de la estructura y de todos los elementos accesorios, así como la carga inicial impuesta por los cables tensionados.

Se consideró la carga de viento como carga predominante, tanto sobre la estructura resistente como sobre los elementos accesorios y las antenas. El valor de la carga sobre la estructura está estrechamente relacionado con su forma, sus elementos componentes y su arreglo espacial que determinan los coeficientes de forma o aerodinámicos a tener en cuenta.

La carga de viento en las antenas fue considerada según los coeficientes de forma establecidos de acuerdo con la TIA EIA 222 F.⁷ En el caso de parábolas no se tuvo en cuenta el efecto de apantallamiento.

Condiciones de apoyo. Se tuvo en cuenta para el estudio: el número, posición y diámetro de los cables o riendas, la presencia de antitorsos, la posición de los anclajes según las direcciones y el tipo de apoyo de la base de la torre.

Materiales. De los elementos que conforman la torre: calidad del acero, módulo de elasticidad y peso específico.

De los cables: Carga mínima de rotura y módulo de elasticidad.

• Datos geográficos

Las torres de telecomunicaciones están distribuidas en el país a todo lo largo de la isla. Se encuentran ubicadas por lo general, en terrenos abiertos, alejadas del centro de las ciudades.

Los datos recogidos fueron: altura de las torres sobre el nivel del mar, tipo de sitio donde se ubican de acuerdo con la categoría que establece la norma cubana, coordenadas geoespaciales y características de la topografía local, de acuerdo con la NC 285-2003.⁸

• Datos climatológicos

Los datos de las condiciones climatológicas para el análisis, se tomaron a partir de la ocurrencia de fuertes vientos acaecidos en el período comprendido entre los años 1996 y 2006. Los datos fueron analizados por dos métodos:

(a) Los vientos máximos sostenidos (estimados) en kilómetros por hora (promedio en un minuto) y rachas máximas registradas en las estaciones del territorio.

(b) Los vientos estimados a partir de la velocidad que caracteriza al ciclón en su trayectoria (pared del ojo del ciclón) estimando bandas de velocidades de viento de ancho variable a partir del ojo y que disminuyen a medida que aumenta la distancia del ojo.

De esta manera se estimaron las velocidades de viento sostenido máximas (promedio en un minuto) que han ocurrido en la zona donde cada torre está ubicada, vinculando cada torre con la localidad más cercana cuyo dato de velocidad es conocido por registro de estaciones cercanas o estimada por las bandas de vientos del huracán. Los valores de velocidades de viento obtenidos durante el paso de los huracanes se basan en velocidades promedio en 1 min. Para comparar estos valores con los que la norma de cálculo cubana establece, se convirtieron a su equivalente en 10 min por medio de los coeficientes de equivalencia establecidos en los códigos internacionales.⁹

Debido a la ubicación de muchas torres sobre colinas, se determinó el incremento de la presión del viento de acuerdo con el coeficiente de modificación (Ch_{mod}). Este coeficiente tiene en cuenta el incremento de la velocidad de viento llegando a alcanzar en algunos casos valores de hasta 3.5, incrementando el valor de las velocidades en relación con las registradas por las estaciones meteorológicas (en terreno abierto y llano a 10 m sobre el terreno).

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Geometría

Las torres se agrupan en dos tipos generales, autosoportadas y atirantadas, encontrándose dentro de cada uno de ellos diferentes modelos. El gráfico 1 muestra las alturas sobre el terreno de las torres estudiadas según el tipo estructural general. Como se aprecia, la altura varía entre los 20 y los 230 m, siendo las torres atirantadas de mayor altura promedio que las autosoportadas. De las torres falladas, ninguna sobrepasa los 100 m sobre el nivel de terreno, por lo que puede concluirse que no existe una relación directa entre la altura de la torre y las fallas ocurridas. (Ver gráfico 2)

De acuerdo con el tipo general, se detecta mayor número de fallas en las atirantadas (70 % del total). Este estudio solo contempla las torres soporte de antena, si se consideran las torres de radio, este número es significativamente mayor. No se detecta en las fallas la incidencia de un modelo en particular, aunque en el caso de torres atirantadas falladas, eran de fabricación nacional, mientras que las fallas de autosoportadas aparecen en torres de fabricaciones nacionales e importadas.

Para analizar la edad de las torres de la muestra de estudio, se agruparon por década de construcción ya que en la mayoría de los casos resultó muy difícil precisar la fecha exacta de su ejecución. Las torres más antiguas datan de la década del cincuenta con los inicios de las transmisiones televisivas en Cuba. Se observa en la década del setenta un aumento importante del número de las torres y luego otro aumento en la década del noventa. (Ver gráfico 3). De las torres falladas, el 70 % se encuentra comprendido entre los treinta y cuarenta años de edad. (Gráfico 4).

La forma de las torres y la distribución espacial de sus elementos se tuvo en cuenta a través de la relación de área neta sobre área bruta o relación de solidez. Esta relación es una de las características más importantes en elementos reticulados ya que tiene en cuenta el efecto de la permeabilidad de la estructura y caracteriza la oposición que ofrece la estructura al paso del viento. Para torres atirantadas y teniendo en cuenta los elementos estructurales de la torre solamente, esta relación varía entre 0,16 y 0,3 dependiendo del modelo. (Ver gráfico 5).

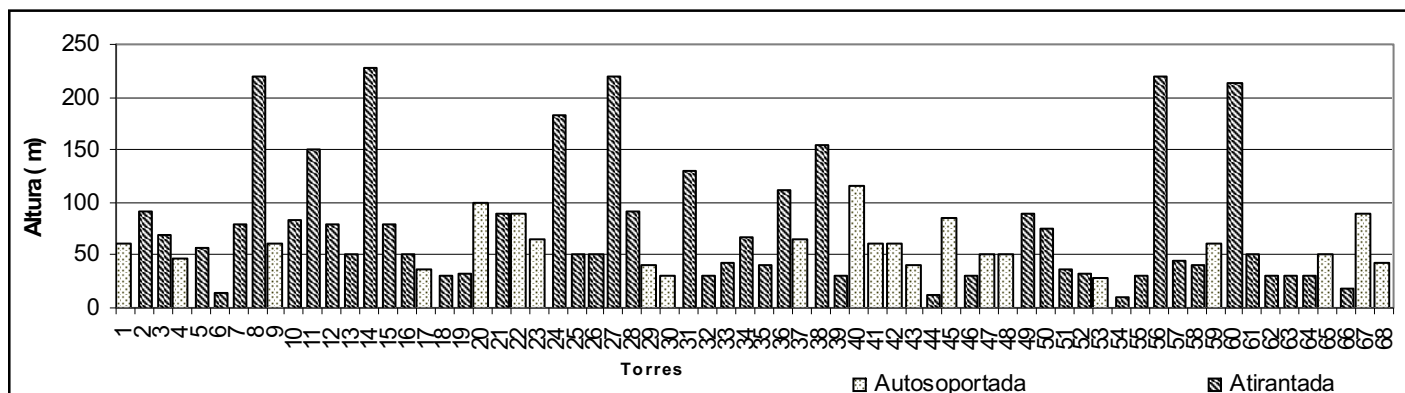


Gráfico 1. Altura de las torres estudiadas según tipo.

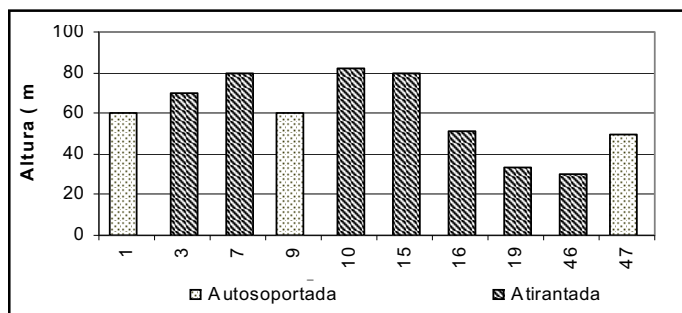


Gráfico 2. Altura de las torres falladas.

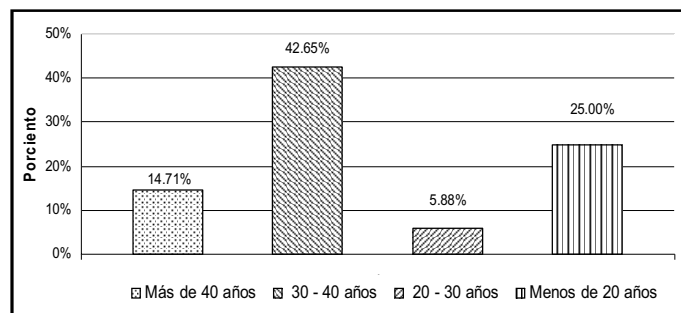


Gráfico 3. Porcentaje de torres según la edad.

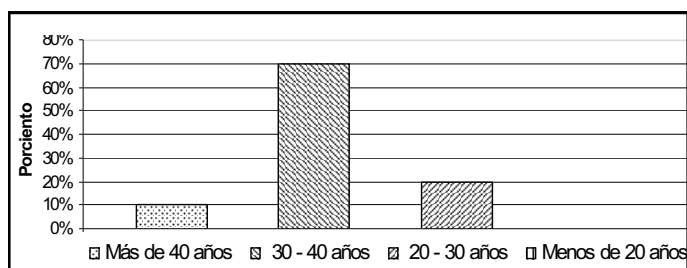


Gráfico 4. Porcentaje de torres falladas según la edad.



Torre atirantada fallada ante paso de huracán.

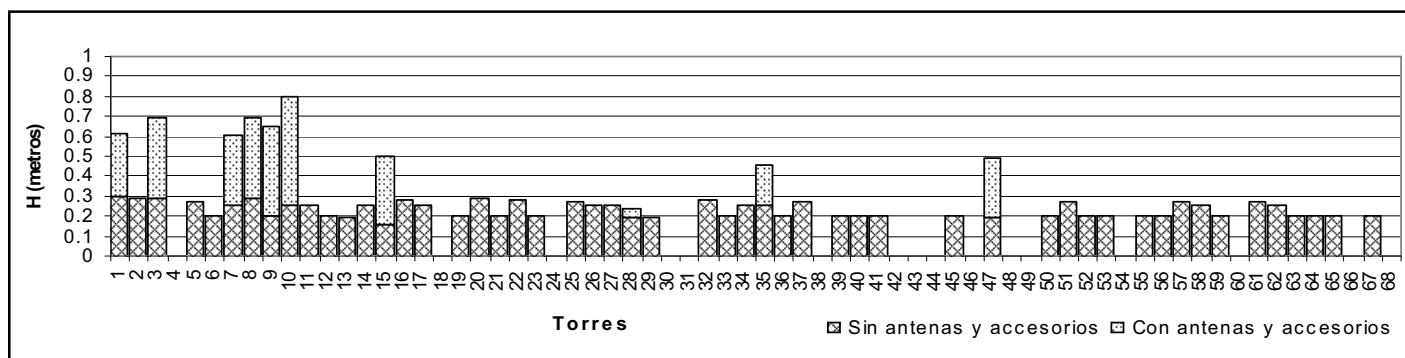
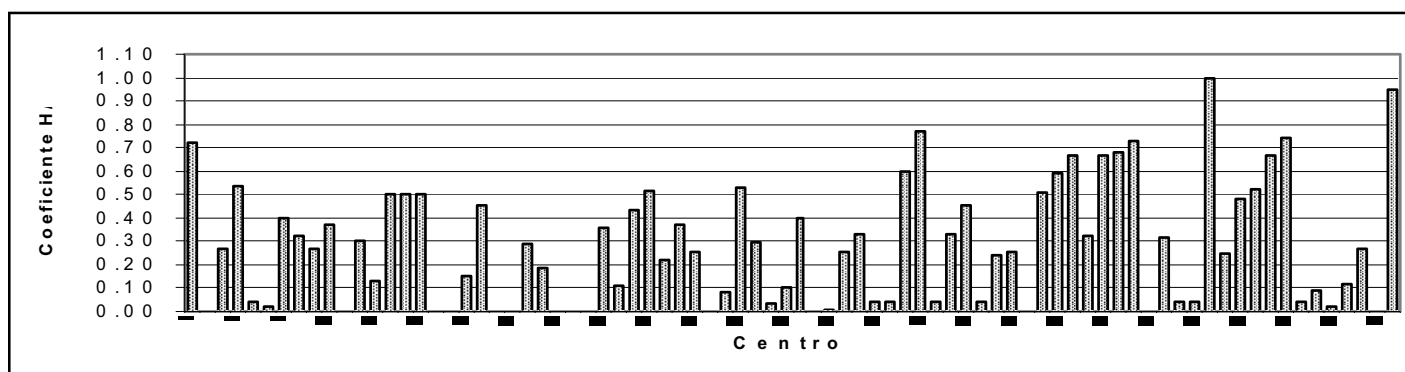


Gráfico 5. Relación de solidez de las torres estudiadas.

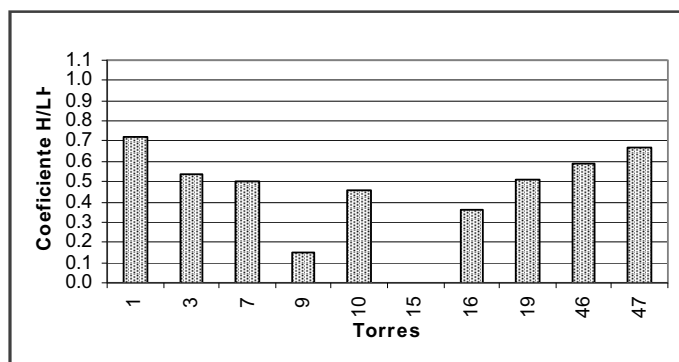
Gráfico 6. Coeficiente de relación topográfica H/L_H para las torres en estudio.

Para el caso de torres autoportadas, este número es variable con la altura debido a inclinación o forma piramidal de las torres, siendo menor la relación hacia la base y aumentando con la altura. En estos casos los valores encontrados oscilan entre 0,15 en la base y 0,45 en el tope. Al considerar las antenas sobre la torre, así como las líneas de cables de transmisión, estos valores se incrementan habiéndose encontrado valores de hasta 0.8 para determinados casos.

No puede establecerse una comparación entre la relación de solidez de las torres caídas y las totales del estudio ya que no se dispone de datos suficientes sobre número y dimensiones de antenas en las torres. Sin embargo el análisis de los datos encontrados, revela que las torres caídas se encontraban con un aumento de dicho valor debido a la presencia de gran cantidad de antenas sobre la estructura.

En el caso de las torres atirantadas se observó que estas tienen varios niveles de cables, así como la presencia de sistemas antitorsos en algunos casos. La cantidad de niveles mínimo de cables en la muestra es de tres y la máxima observada es de seis, no apreciándose que existan vínculos entre la altura de la torre y la cantidad de niveles. Tampoco se observa relación entre la cantidad de antitorsos y la altura de la torre. Todas las torres falladas presentaban al menos un nivel de antitorso.

En cuanto a la ubicación geográfica de las torres se observa que la mayoría de ellas se encuentra situada en alturas o promontorios del terreno, encontrando que

Gráfico 7. Coeficiente de relación topográfica H/L_H para las torres falladas.

el 51 % de la torres estudiadas, les corresponde un coeficiente de relación topográfica mayor de 0,25 lo cual representa un incremento de las velocidades de viento modificando el perfil vertical de velocidades en la zona de ubicación de las mismas. Para las torres falladas, la relación topográfica promedio es de 0,44, mientras que el promedio del total de torres estudiadas es de un 0,28. (Ver gráficos 6 y 7).

Las torres de celosía destinadas a las telecomunicaciones, se ubican generalmente en sitios expuestos, en terrenos altos como colinas o montañas que le permiten una mejor propagación de las ondas y en consecuencia están sometidas a altas velocidades de viento durante su vida útil.

El gráfico 8 muestra la relación de velocidades máximas promedio en 10 min estimados en el lugar de emplazamiento de las torres en el período de estudio y el valor de esta velocidad incrementada por concepto de la relación topográfica a 10 m de altura sobre el terreno. Como se puede apreciar en la figura, solo en unas pocas zonas la velocidad del viento superó los 100 km/h según los registros meteorológicos reales o estimados (sin considerar el incremento topográfico). Sin embargo, al considerar el efecto de la topografía varias torres acusaron un incremento significativo de las velocidades. En relación con las torres falladas se aprecia que ocho de las diez caídas presentan incremento de las velocidades por topografía, alcanzando valores de velocidades de viento (máximas promedio en diez minutos) por encima de 100 km/h y hasta 315 km/h. (Ver gráfico 9).

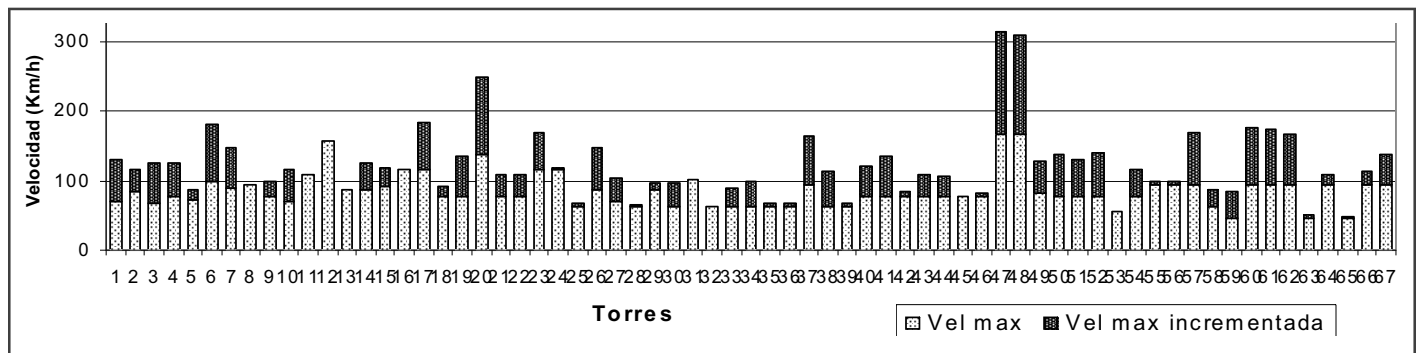


Gráfico 8 Valores de velocidad máxima (promedio en 10 min.) y velocidad máxima incrementada ocurrida en las torres en estudio en el período.

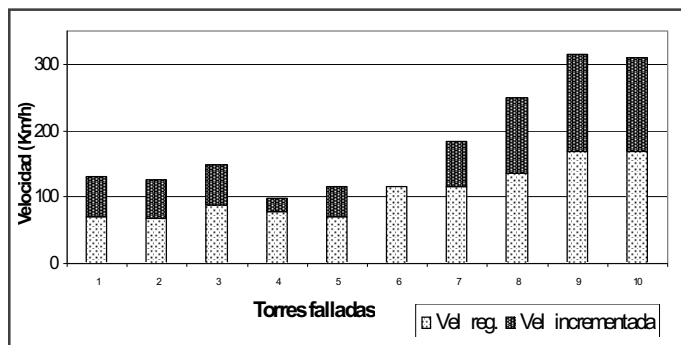


Gráfico 9 Valores de velocidad registrada (promedio en 10 min.) y velocidad incrementada ocurrida para las torres falladas en el período.

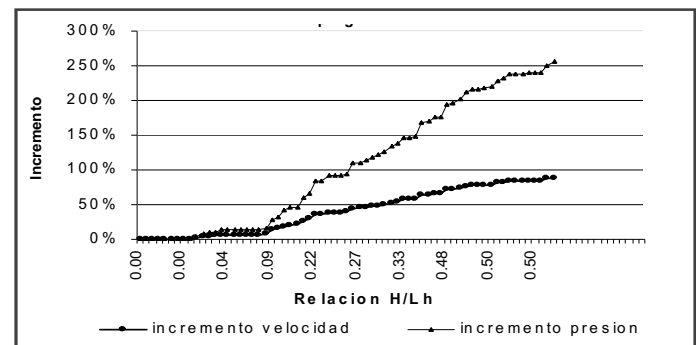


Gráfico 10 Correspondencia entre coeficiente H/L_h y el incremento de velocidades de viento y de presión de viento a 10 m de altura sobre el terreno.

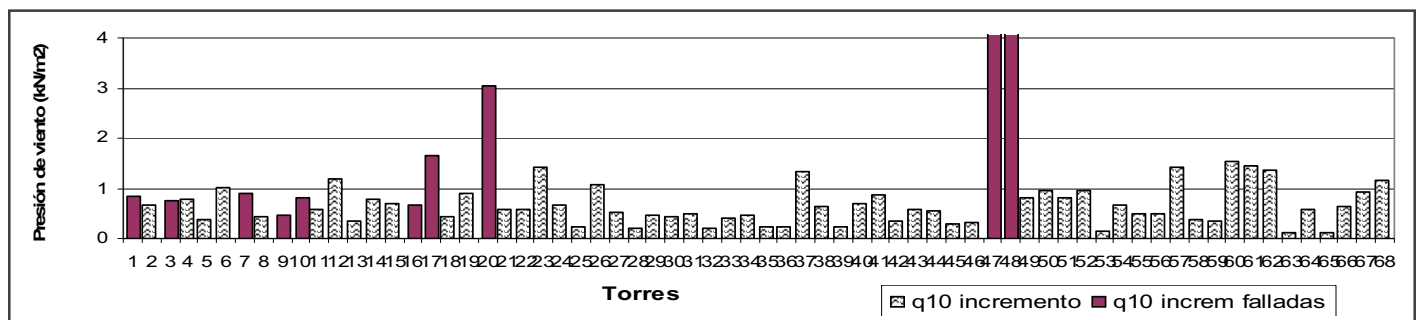


Gráfico 11. Correspondencia entre coeficiente H/L_h y el incremento de velocidades de viento y de presión de viento a 10 m de altura sobre el terreno para las torres estudiadas.

CONCLUSIONES

Las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo no son definitivas ya que aún la cantidad de datos es incompleta, no obstante se han podido determinar algunas conclusiones parciales de interés las cuales se enumeran a continuación.

- En el 60 % de las torres colapsadas, la carga o presión de viento en la torre fue inferior a $0,9 \text{ kN/m}^2$ por lo que no se sobrepasó el valor establecido en la norma actual ni en la precedente.
- En el período de estudio afectaron el territorio nacional once organismos tropicales acompañados de vientos huracanados con velocidades registradas en el 80 % de los casos inferiores a 150 km/h para las estaciones cercanas a las torres estudiadas.
- El 80 % de las torres colapsadas se encontraba ubicado en zonas de topografía elevada con incrementos de la presión de viento mayores del 100 % por lo que se destaca la importancia de la aplicación del coeficiente de altura modificado establecido en la última norma de viento para la revisión estructural de las mismas.
- Las torres atirantadas arrojan mayor índice de fallas que las autosoportadas.
- Las torres atirantadas falladas presentaban en su mayoría asimetría por variación de la cota vertical de sus anclajes.
- Las torres atirantadas falladas presentaban varios niveles de viento (entre tres y seis) y al menos un nivel de antitorsos.
- El 70 % de las torres falladas tenía entre treinta y cuarenta años de edad y un régimen de explotación que fue modificado por un aumento de las cargas de antenas en los últimos diez años.

BIBLIOGRAFÍA

1. BAKER, B: "Discussion on Wind Pressure". *Min. Proc. Institute of Civil Engenniring*. 69, No. 145, 1881.
2. MARTÍN, T. & I. A. MACLEOD: "The Tay Rail Bridge Disaster-a Reappraisal Based on Modern Analysis Methods". *Proc. Inst. Civil Eng.* 108 May 77-83, 1995.
3. BRUNEAU, M., M. MAGUED & R. DRYBURGH: "Evolution of Design Standards and Recorded Failures of Guyed Towers in Canada". *Canadian Journal of Civil Eng.* Vol 16, pp. 725-732, 1989.
4. MIKITARENKO, M. A. & A. V. PERELMUTER: "Safe Fatigue Life of Steel Towers under the Action of Wind Vibrations". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 74-76, pp. 1091-1100, 1998.
5. MULHERIN, N. D.: "Atmospheric Icing and Communication Tower Failure in the United States". *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 27, pp. 91-104, 1998.
6. LAIHO, J.: "Some Known Mast Failure", IASS WG4, 18th meeting, Chicago, USA, 1997.
7. TIA-EIA/222-F: "Normas estructurales para torres y estructuras de acero para antenas", 1996.
8. NC 285:2003: "Carga de viento. Método de cálculo". Oficina Nacional de Normalización (NC), La Habana, Cuba 2003.
9. ISO 4354: Wind Action on Structures. 1997.
10. ESDU 91043: Mean Wind Speeds Over Hills and Other Topography. f/d.



Presencia de antenas sobre torre colapsada.

