



CIENCIAS TÉCNICAS

Artículo original de investigación

Contribución a la determinación de las cargas de viento en estructuras

Vivian Elena Parnás ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-7912-7570>
Patricia Martín Rodríguez ^{1,2} <https://orcid.org/0000-0002-8954-5159>
Ingrid Fernández Lorenzo ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1223-0968>
Alejandro López Llanusa ¹ <https://orcid.org/0000-0002-9938-837X>
Katia Luis García ¹ <https://orcid.org/0000-0003-1861-6017>
Bruno Clavelo Elena ¹ <https://orcid.org/0000-0002-7683-797X>
Nelson Fundora Sautié ¹ <https://orcid.org/0000-0003-0452-8964>
Geert Lombaert ³ <https://orcid.org/0000-0002-9273-3038>
Kritoff Maes ³ <https://orcid.org/0000-0003-4188-3180>
José Cataldo Ottieri ⁴ <https://orcid.org/0000-0002-0050-5821>
Edith Beatriz Camaño Schettini ⁵ <https://orcid.org/0000-0003-3216-2744>
Acir Mércio Loredou-Souza ⁵ <https://orcid.org/0000-0002-6648-8315>
Amaya Ballate Delgado ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1544-0725>

¹ Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba

² Joven Asociado de la Academia de Ciencias de Cuba. La Habana, Cuba

³ Universidad KU Leuven. Lovaina, Bélgica

⁴ Universidad de la República Udelar. Montevideo, Uruguay

⁵ Universidad Federal de Río Grande del Sur. Puerto Alegre, Brasil

*Autor para la Correspondencia: vivian@civil.cujae.edu.cu; vivitaelena@gmail.com

RESUMEN

Introducción: El estudio de la determinación de la carga de vientos sobre las edificaciones es de gran importancia debido a su ocurrencia en el territorio de Cuba ocasionando daños en las construcciones. Las investigaciones estuvieron encaminadas a: la actualización de las velocidades básicas de diseño y perfiles verticales de velocidad de viento; la actualización de los parámetros de la turbulencia del viento; propuesta de coeficientes aerodinámicos para paneles fotovoltaicos, elementos de torres reticuladas y antenas de comunicación; la actualización de los métodos dinámicos para el cálculo de estructuras y la calibración de modelos mediante técnicas experimentales modales (OMA). **Métodos:** La investigación se desarrolló a través de la modelación numérica computacional, análisis experimental a escala reducida y real y métodos estadísticos de valores extremos. **Resultados:** Los resultados obtenidos consisten en la actualización de las velocidades básicas de diseño y perfiles verticales de velocidad de viento; la actualización de los parámetros de la turbulencia del viento; propuesta de coeficientes aerodinámicos para paneles fotovoltaicos, elementos de torres reticuladas

Revisores ^a

Editor

Lisset González Navarro
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

Traductor

Darwin A. Arduengo García
Academia de Ciencias de Cuba.
La Habana, Cuba

a N. del E: En este apartado figuran los nombres de los árbitros que accedieron a revelar su identidad, como expresión de apertura progresiva del proceso de revisión por pares. No aparecen aquellos que optaron por el anonimato.

y antenas de comunicación; la actualización de los métodos dinámicos para el cálculo de estructuras y la calibración de modelos mediante técnicas experimentales modales (OMA). Como conclusiones, se logran incorporar las más modernas técnicas a nivel internacional al estudio de la acción del viento en las construcciones, estos avances obtenidos se incorporan a la norma cubana de viento y ya han sido implantados en los nuevos diseños de parques fotovoltaicos, torres reticuladas y edificios altos que se construyen en el país, contribuyendo de esta manera a la reducción de la vulnerabilidad estructural.

Palabras clave: Carga de viento; estructuras; aerodinámica; diseño estructural; vulnerabilidad

Contribution to the estimation of the wind load on structures

ABSTRACT

Introduction: The study of the determination of the wind load on buildings is of great importance due to the occurrence of strong winds in the territory of Cuba that cause damage to buildings. The present work shows the results of the investigations that contributes to the improvement of the determination of the wind load for the calculation of the structures. **Methods:** The research was developed through computational numerical modeling, experimental analysis at a reduced and real scale and statistical methods of extreme values. **Results:** The results obtained are the updating of the basic design speeds and vertical profiles of wind speed; updating the wind turbulence parameters; proposal of aerodynamic coefficients for photovoltaic panels, elements of reticulated towers and communication antennas; updating the dynamic methods for the calculation of structures and the calibration of models using modal experimental techniques (OMA). **Conclusions:** the most modern international techniques were acquired and applied to the study of the action of the wind on constructions. Significant results have been incorporated into the Cuban Wind Code and have already been implemented in the new designs of photovoltaic parks, latticed towers and tall buildings that are built in the country contributing to reduce vulnerability of structures.

Keywords: Wind load; structures; aerodynamics; structural design; vulnerability

INTRODUCCIÓN

En Cuba, el estudio de la determinación de la carga de viento sobre las edificaciones es de gran importancia debido al paso frecuente de huracanes. Reportes internacionales establecen que entre el 70 % y el 80 % de las pérdidas económicas mundiales por desastres naturales están asociadas al efecto de los vientos extremos. Por esta razón en aras de garantizar una mayor seguridad en la estabilidad de las construcciones, la Ingeniería Civil se ha enfocado en el estudio de las características del viento y su interacción con el entorno construido.

La norma cubana NC 285-2003, "Cargas de viento. Método de Cálculo" es el documento regulatorio para el cálculo y revisión de estructuras frente a la acción de esta carga ecológica. La norma está basada en estudios realizados en la década del 80 del siglo pasado y desde el año 2003 no se realiza ninguna actualización. A partir de estudios realizados

desde hace varios años por el grupo de aerodinámica de las construcciones del Centro de Estudios de la Construcción y Arquitectura Tropical (CECAT), de la facultad de Ingeniería Civil de la CUJAE, se ha detectado que la norma presenta algunas divergencias y limitaciones con relación a las referencias y estudios internacionales.

El efecto del viento sobre las estructuras fue conceptualizado por Davenport a partir del establecimiento de la "Cadena de Efectos del Viento", esta cadena define la estructura para la obtención de la carga de viento a partir de la combinación y consecución interrelacionada de los efectos del viento climático local, que debe ser descrito en términos estadísticos; la exposición del viento local, que es influenciada por la rugosidad del terreno y la topografía; las características aerodinámicas de la forma de la estructura y el posible incremento de la carga debido a la vibraciones resonantes inducidas por el viento, definida como una medida de la respuesta dinámica de la edificación. ⁽¹⁾

En la caracterización del viento climático juega un papel fundamental la determinación de los valores de las velocidades básicas a partir de estudios estadísticos. Los valores propuestos de velocidades básicas en la norma cubana de viento NC-285:2003 fueron obtenidos mediante el método probabilístico de valores extremos, reconocido como "Serie de máximos".^(2,3) Este método no considera las condiciones climáticas cubanas que presenta un clima donde los máximos provienen de más de un tipo de fenómeno atmosférico, en estos casos la bibliografía internacional recomienda una partición de los datos de viento de acuerdo con el tipo de mecanismo meteorológico que los origina.^(4,5)

La consideración de la rugosidad y la influencia del terreno se tiene en cuenta en la determinación de las cargas de viento a partir de considerar un coeficiente de altura que describe la variación del perfil vertical de velocidades medias según diferentes tipos de terreno y un coeficiente de ráfaga que tiene en cuenta las características de la turbulencia atmosférica para diferentes alturas de las edificaciones y variaciones de la rugosidad del terreno. La revisión de la bibliografía internacional y los estudios comparativos sobre los perfiles verticales de velocidades medias permitieron identificar que obras con fachadas expuestas al mar y otras fachadas debían analizarse a partir de terrenos donde se presenta una transición entre el área urbana y el mar y según la vigente norma presentaban una misma clasificación de terreno, lo que despertó el interés en la profundización del estudio del coeficiente de altura.^(6,7)

En cuanto a la turbulencia atmosférica, según estudios internacionales desarrollados a partir de mediciones de las características de la turbulencia durante el paso de huracanes, se ha podido detectar que parámetros como la escala de la turbulencia y la intensidad, sobre todo la intensidad de turbulencia, son mayores con relación a las zonas de no prevalencia de vientos huracanados.⁽⁸⁾ En la norma de viento NC285:2003 el efecto de la turbulencia es tenido en cuenta a través del coeficiente de ráfaga, que solo depende de la altura máxima de la edificación. Sin embargo, los valores de intensidad que fueron obtenidos a partir de los coeficientes de ráfaga establecidos en la norma son muy bajos y sin correspondencia con los estudios experimentales realizados internacionalmente bajo condiciones huracanadas.⁽⁹⁾

La consideración de las características aerodinámicas de las edificaciones se tiene en cuenta a partir de coeficientes aerodinámicos, los cuáles son denominados coeficientes de forma en la norma NC-285:2003. Se identificó que tanto la norma cubana NC-285 como las internacionales consultadas (AIJ:2004 (Japón), Eurocódigo EN1991-1-4:2004 (EU), Internacional ISO-4354, CNR-DT207, (Italia)) no presentan elementos para la definición de los coeficientes aerodinámicos de

estructuras como los paneles fotovoltaicos, las antenas VHF que se colocan en las torres de telecomunicaciones y los doble angulares de perfiles a 60° que se emplean para la conformación de las columnas de las torres de telecomunicaciones.

El estudio sobre los efectos dinámicos inducidos por el viento en estructuras puede abordarse a partir de estudios analíticos o experimentales. En Cuba, el método de análisis para la consideración de la componente dinámica del viento en las estructuras se incorporó a las normas cubanas de viento a partir del año 1983. El método fue adoptado a partir de los estudios realizados en la antigua Unión Soviética; sin embargo, no se corresponde con los métodos propuestos en el resto de las normas y estudios de investigaciones internacionales. El método propuesto en la NC-285:2003 presenta limitaciones ya que varios parámetros, como el factor de aceleración reducida, no quedan claramente definidos, además no se ha podido identificar los fundamentos teóricos del método con los principios y conceptos definidos en la ingeniería de viento. A partir del estudio de las referencias internacionales y del estudio comparativo de las normas de acción del viento sobre las estructuras y de las normas específicas para torres de telecomunicaciones se identificó el método factor de efecto de ráfaga como el método más aplicado internacionalmente para el análisis de las torres autosoportadas y de los edificios altos.^(10,11)

En cuanto a los estudios experimentales se identificó en la bibliografía internacional que existen métodos como el análisis modal operacional (OMA, siglas en inglés) que permiten a partir de las mediciones obtener parámetros dinámicos tales como: las frecuencias naturales, razones de amortiguamiento y formas modales de la estructura que son comparados con los obtenidos en los modelos de elementos finitos para verificar las simplificaciones que se realizan en los modelos computacionales.⁽¹²⁾ El desarrollo de estas técnicas experimentales permite una mejor evaluación de las características dinámicas, las cuales son determinantes en la consideración de los efectos dinámicos del viento sobre las estructuras. El OMA es una técnica poco conocida y aplicada en Cuba, de variada aplicación en investigaciones internacionales en las últimas décadas, aunque es de señalar que en el mundo las torres de telecomunicaciones han sido escasamente abordadas con esta técnica en particular.

A partir de las limitaciones encontradas en la norma cubana de viento NC-285:2003 con respecto a los estudios desarrollados internacionalmente, este trabajo presenta como objetivo describir las principales investigaciones desarrolladas por el grupo de aerodinámica de las construcciones de la CUJAE que presentan aportes en cada uno de las componentes para la determinación de la carga de viento sobre las es-

estructuras. Las investigaciones estuvieron encaminadas a: la actualización de las velocidades básicas de diseño y perfiles verticales de velocidad de viento; la actualización de los parámetros de la turbulencia del viento; propuesta de coeficientes aerodinámicos para paneles fotovoltaicos, elementos de torres reticuladas y antenas de comunicación; la actualización de los métodos dinámicos para el cálculo de estructuras y la calibración de modelos mediante técnicas experimentales modales (OMA).

MÉTODOS

Métodos estadísticos y teóricos-analíticos

Para la determinación de las velocidades básicas se aplicó el método probabilístico de tormentas independientes (MIS, por sus siglas en inglés) con diferenciación de los orígenes de los eventos extremos.^(2,3) El MIS pertenece a los métodos de excedencia y permite suprimir las deficiencias de los métodos de máximos con relación a los climas mixtos como el cubano. Las velocidades de las estaciones meteorológicas fueron corregidas teniendo en cuenta el efecto de la rugosidad del terreno. Para esta corrección, los valores de longitud de rugosidad de las estaciones fueron obtenidos aplicando 2 métodos: el clasificaciones, de Davenport y el método Morfométrico a partir del cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Para desarrollar ambos métodos fue empleada la teledetección espacial para adquirir las imágenes de la superficie terrestre.⁽¹³⁾

En la caracterización de los perfiles verticales de velocidades medias, se profundizó en el estudio del coeficiente de altura de varias normas, para lo cual se escogieron la AIJ:2004 (Japón), CNS (China) y el Eurocódigo EN1991-1-4:2004 (EU) ya que presentan el mismo intervalo de promediación de la velocidad básica del viento que la norma cubana NC-285:2003 correspondiente a 10 min.⁽⁷⁾

En cuanto a la consideración de la turbulencia atmosférica en la determinación de la carga de viento se aplicaron métodos analíticos a partir del estudio del estado del arte y considerando las particularidades del clima de Cuba para zonas de huracanes. Se propusieron modificaciones al coeficiente de ráfaga a partir de la incorporación de una expresión para calcular la intensidad de turbulencia, en función de los tipos de terrenos.⁽⁹⁾

A partir del diagnóstico se propuso incorporar a la norma NC-285:2003 formulaciones para los parámetros de la turbulencia (espectro de turbulencia, intensidad de turbulencia y escala de la turbulencia) que son tenidos en cuenta en los métodos de análisis estáticos equivalentes frente a la acción del viento que se emplean en estructuras como los edificios

altos y las torres autoportadas metálicas de telecomunicaciones. Las formulaciones que se propusieron con este fin tuvieron en cuenta el estudio de regímenes de vientos extremos similares a los cubanos. Además, se desarrolló una metodología para la simulación sintética de funciones de turbulencia, que contempla las formulaciones anteriores definidas para los análisis estáticos equivalentes e incorpora, la función cruzada de densidad espectral de potencia, esta metodología es utilizada para realizar análisis dinámicos en el dominio del tiempo sobre estructuras.⁽⁹⁾

Se identificaron 2 grupos de métodos fundamentales para la realización del análisis dinámico bajo carga de viento de edificios altos, torres atirantadas y torres autoportadas de telecomunicaciones: métodos estáticos equivalentes y métodos dinámicos completos.^(7,10,11,14-16) El método estático equivalente más aplicado internacionalmente y por tanto, el seleccionado para la actualización de la norma NC-285, fue el método factor de efecto de ráfaga para el análisis de edificios altos y torres autoportadas y el método patrones de carga para el análisis de torres atirantadas. Estos métodos fueron comparados con el método dinámico completo de dominio en el tiempo en el análisis de torres autoportadas y atirantadas.^(15,16)

Métodos computacionales y numéricos

La simulación de series de tiempo mediante el método numérico de Monte Carlo fue aplicada para generar las funciones sintéticas de fuerzas de viento turbulentas utilizadas para la aplicación del método dinámico en el dominio del tiempo.^(9,15,16) La metodología desarrollada fue implementada en el programa matemático MATLAB.⁽⁹⁾

Los métodos computacionales aplicados fueron el método de elementos finitos a través de la utilización del *software* SAP-2000 para la modelación de las torres autoportadas y atirantadas de telecomunicaciones. Estos modelos fueron usados para la determinación de las características dinámicas, así como la aplicación de las fuerzas de viento tanto estáticas como dinámicas para la obtención de las fuerzas interiores y desplazamientos sobre las torres.

Otro método de simulación numérica aplicado para la obtención de coeficientes aerodinámicos de una sección compuesta por 2 angulares de alas iguales empleado en la construcción de torres de telecomunicaciones fue el Computational fluid dynamics (CFD). Se utilizó el *software* de código abierto Open FOAM orientado a la simulación de problemas de flujo con el empleo del método de volúmenes finitos.⁽¹⁷⁾ En los modelos numéricos se emplearon simulaciones RANS, 2D a escala reducida con el empleo de un mallado no estructurado, implementando el algoritmo PISO.

Métodos experimentales

Fueron realizados estudios experimentales tanto a modelos a escala reducida en túnel de viento como mediciones experimentales en estructuras a escala real. Los modelos a escala reducida ensayados en túnel de viento fueron desarrollados para la determinación de los coeficientes aerodinámicos de parques de paneles fotovoltaicos, ⁽¹⁸⁾ antenas VHF colocadas sobre torres de telecomunicaciones ⁽¹⁹⁾ y para la calibración del modelo computacional desarrollado en CFD de la sección de angular doble. ^(17,20) Los túneles de viento utilizados para los ensayos fueron el túnel del laboratorio IMFIA perteneciente a la Universidad de la República (UDELAR, Uruguay) y el túnel del Laboratorio de aerodinámica perteneciente a la Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFRGS, Brasil). La figura 1 muestra imágenes de los modelos a escala reducida ensayados en los túneles.

Los ensayos experimentales a escala real fueron aplicados a una torre autosoportada de telecomunicaciones con el objetivo de realizar la calibración del modelo computacional a partir de aplicar la técnica de Análisis modal operacional (OMA). ^(21,22) Los instrumentos utilizados fueron acelerómetros y *straining gage*. Dentro de las técnicas que se emplean en el OMA para procesar señales se utilizó el método del subespacio estocástico, siendo el más empleado a nivel internacional. Además, se desarrolla una metodología para el estudio de sensibilidad en la colocación de sensores en torres autosoportadas utilizando como criterio los valores de AutoMAC. La figura 2 muestra imágenes de la distribución de los sensores sobre la torre, así como los instrumentos utilizados para la medición.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actualización de las velocidades básicas de diseño, perfiles verticales de velocidad de viento y parámetros de la turbulencia atmosférica para Cuba

Los valores de velocidades básicas fueron actualizados en 16 estaciones en Cuba a partir de la aplicación del método MIS. Los resultados permitieron dividir el país en 4 regiones para los estudios de velocidades básicas, esta nueva división difiere de lo propuesto en la actual norma cubana NC-285:2003. Los valores de velocidades básicas fueron corregidos por exposición en función de las características de las estaciones meteorológicas. En la figura 3 se exponen, como ejemplo, los resultados de 2 estaciones cubanas, 1 en la estación occidental y otra en la región oriental del país, y se aprecia el efecto de la corrección por rugosidad en el valor final de velocidad. Si se comparan estos valores con los de la vigente norma cubana NC285:2003, para un período de retorno de 50 años el valor

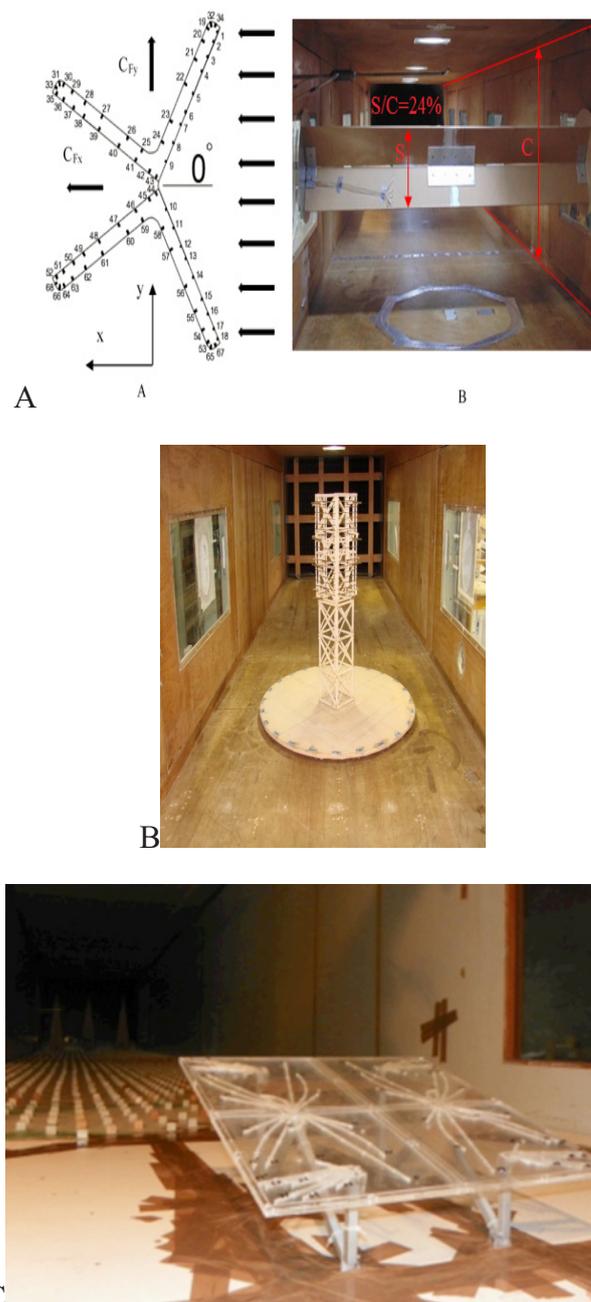


Fig. 1. Imágenes de modelos a escala reducida ensayados en túnel de viento, A) sección de perfil doble de angular, B) modelo seccional de torre con antenas VHF, C) panel de parque fotovoltaico.

de presión básica establecido de la zona I (donde se encontraría la estación de Cabo de San Antonio) es $1,3 \text{ kN/m}^2$, que responde a una velocidad básica aproximada de 45 m/s , que supera en más del 20 % al valor calculado por el método MIS en esta investigación.

Los resultados en cuanto al estudio comparativo de los perfiles verticales de velocidades medias permitieron concluir que las principales carencias de la actual norma NC-285:2003 se relacionan con la insuficiente descripción de las áreas cer-

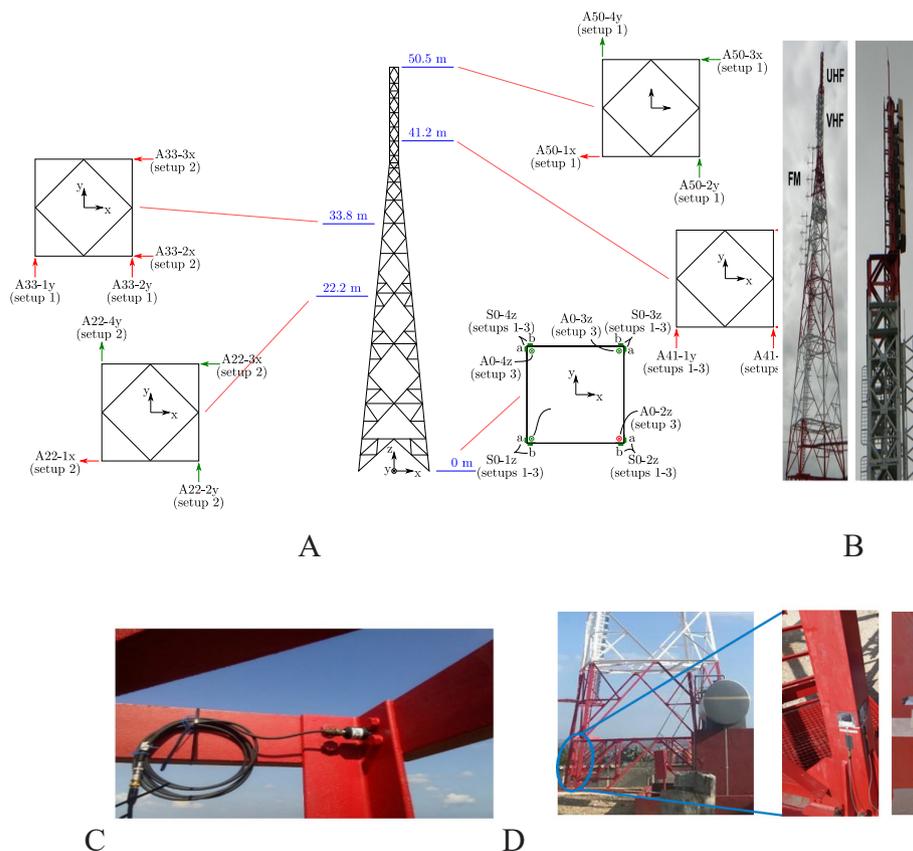


Fig. 2. Diseño de instrumentación empleado en la torre Cumbre. A) Distribución de sensores B) foto de la torre objeto de estudio, C) Fijación del acelerómetro en el tope de la torre, D) Ubicación de los *strain gauges* en las columnas

canas a la costa, o terrenos donde existen lagos y vegetación despreciable. Por lo tanto, se propusieron 4 categorías de terreno para sustituir las actuales que recogen de una forma más precisa el efecto del viento en estas zonas abiertas y expuestas. Las categorías superiores de las restantes normas, dadas las características de las zonas urbanas de Cuba, sin una alta densidad como otras ciudades mundiales no fueron incluidas pues no responden al panorama constructivo nacional.

La actualización de los parámetros de la turbulencia estuvo dada por la propuesta de nuevos valores de coeficientes de ráfaga a partir de la formulación existente en la bibliografía internacional y teniendo en cuenta las características de las zonas de huracanes. Las diferencias encontradas entre el coeficiente de ráfaga de la norma vigente y los propuestos superan el 48 %, por ejemplo, para el tipo de terreno abierto el coeficiente de ráfaga a 10 m de altura de la norma actual es de 1,18 y el valor propuesto es de 2,42. Las modificaciones en cuanto a los parámetros de la turbulencia atmosférica estudiados permitieron también desarrollar una metodología para la generación de series de velocidades de viento sintéti-

cas considerando la turbulencia para la realización de análisis dinámicos. ⁽⁹⁾

Propuesta de nuevos coeficientes aerodinámicos

Los trabajos en túnel de viento desarrollados sobre los paneles solares permitieron obtener coeficientes aerodinámicos picos, como valor de coeficientes de forma, pues consideran en los resultados, los efectos de la turbulencia atmosférica, para diferentes direcciones de viento, teniendo en cuenta 2 inclinaciones del panel 15° y 23°. ⁽¹⁸⁾ También fue posible obtener coeficientes multiplicadores de la carga en función de la posición que ocupan los paneles dentro de un parque solar. Ese estudio se realizó con el objetivo de optimizar los diseños de estructuras y cimentaciones en los parques solares, pues anteriormente se analizaban con condiciones únicas de carga, lo que conducía a gastos innecesarios de materiales de construcción.

En el caso de los estudios aerodinámicos en torres con antenas VHF y parábolas, también en túnel de viento, fue posible describir y cuantificar un factor de interferencia multiplicador de la carga sobre la torre producto de la cantidad, posición

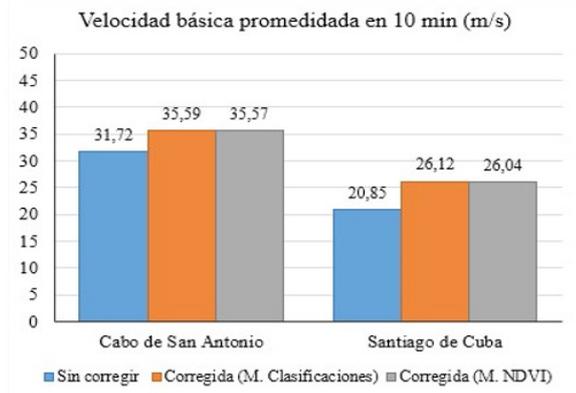


Fig. 3. Valores de velocidades básicas corregidos según las características de exposición de las estaciones meteorológicas

de antenas y para varias direcciones de viento. ⁽¹⁹⁾ Estos coeficientes significan un mayor acercamiento a la carga sobre la estructura y por ende contribuyen a disminuir la vulnerabilidad estructural de esta tipología estructural que tantos fallos ha presentado en el país ante la ocurrencia de acciones extremas como los huracanes.

El estudio de los coeficientes aerodinámicos de la sección de angular doble obtenidos con túnel de viento y mediante la aplicación de CFD evidenciaron diferencias menores al 5 %. ^(17,20) Estos resultados son una validación importante del empleo del CFD como alternativa para la obtención de coeficientes aerodinámicos en el contexto cubano que no se cuenta con túnel de viento. En la figura 4 se grafica como ejemplo la comparación de los valores de los coeficientes C_{Fx} para los 5 ángulos de ataque comparados.

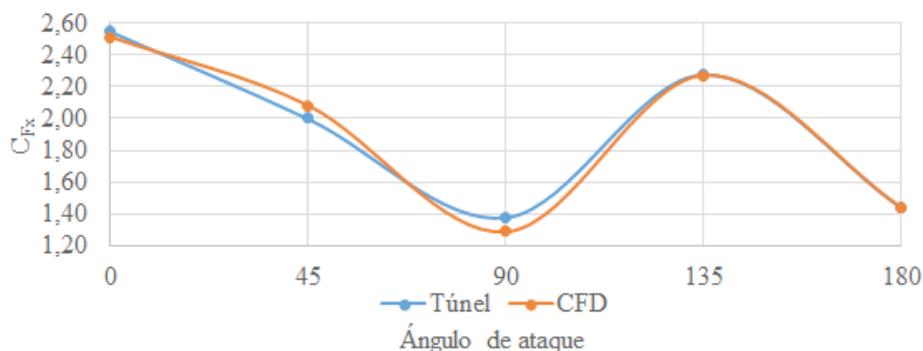


Fig. 4. Valores medios obtenidos en el túnel de viento y con CFD

Actualización de métodos dinámicos para carga de viento

Los estudios de la comparación entre métodos dinámicos en el dominio del tiempo y métodos estáticos equivalentes para torres autoportadas y atirantadas fueron aplicados en 2 modelos típicos de torres en Cuba y considerando su ubicación en 2 regiones de Cuba que presentan diferentes valores de velocidades básicas (Cabo de San Antonio y Playa Girón). ^(15,16) Los resultados mostraron los mayores valores de fuerzas interiores y desplazamientos obtenidos de la aplicación del método estático equivalente para las torres autoportadas. En las torres atirantadas el método estático equivalente presentó los mayores valores de fuerzas y desplazamientos en la región donde los valores de velocidades básicas fueron altos (Cabo de San Antonio), sin embargo, en la región donde las velocidades fueron menores (Playa Girón) no hubo un método predominante para las fuerzas interiores y en los desplazamientos el método dinámico es el que predomina a partir de los 80 m de altura y las máximas diferencias ocurren en el tope y alcanzan los 25 cm. A partir de los resultados se decidió validar la inclusión en la norma NC-285 de los métodos estáticos equivalentes Factor de efecto de ráfagas y patrones de carga para el análisis de las torres autoportadas y atirantadas respectivamente.

Los resultados de los estudios comparativos entre el método estático equivalente propuesto por la NC-285:2003 y el método estático equivalente Factor de efecto de ráfaga permitieron validar la inclusión de este último en la nueva propuesta de NC-285. A modo de ejemplo se realizó el cálculo en un edificio alto de hormigón armado de 100 de altura, y se observó que los mayores valores de reacciones totales en la base y desplazamientos se obtuvieron para la nueva propuesta de norma, donde se tiene en cuenta la combinación de los 3 efectos sobre la edificación: longitudinal, transversal y

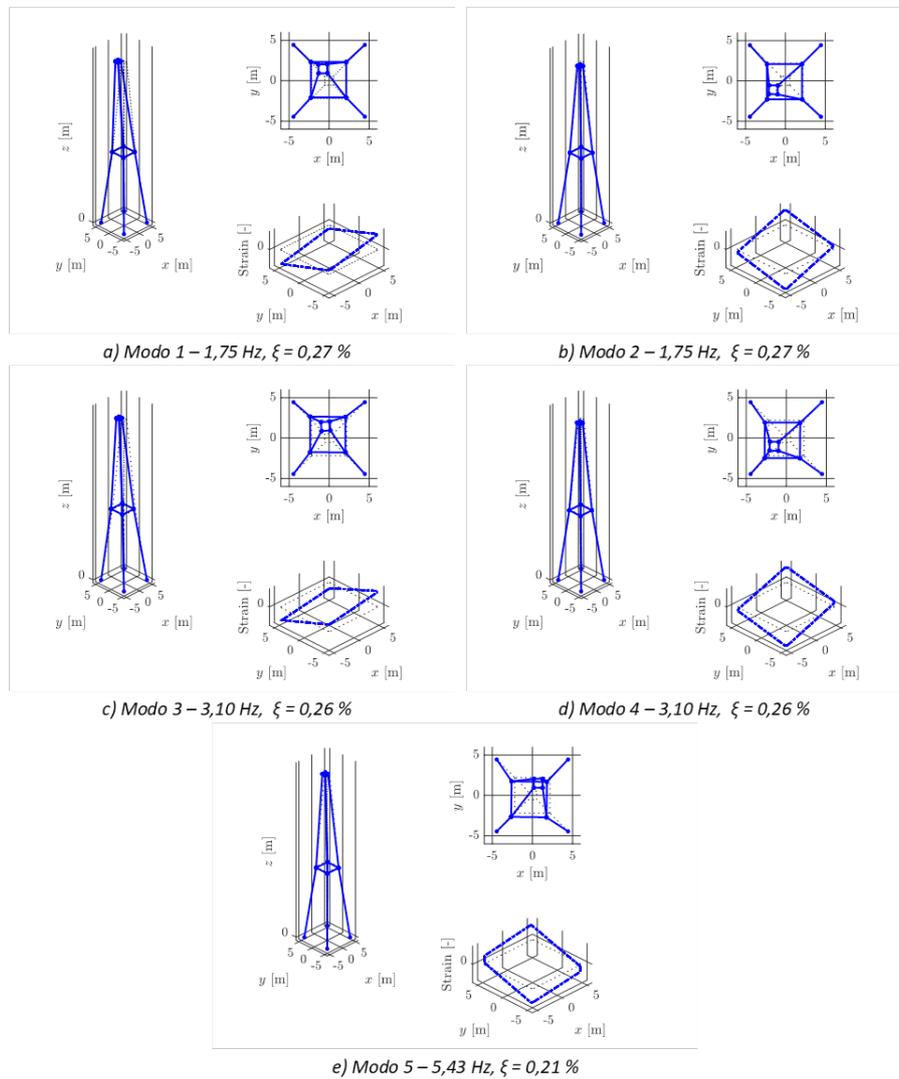


Fig. 5. Formas modales identificadas de los acelerómetros y de los strain gauges, frecuencias naturales y razones de amortiguamiento (ξ).

torsional. Además, fueron aplicados los procedimientos para la determinación de las aceleraciones inducidas por el viento actuantes y permisibles los cuáles no se encuentran en la actual NC-285:2003.

Calibración de modelos mediante técnica experimental OMA

El estudio del análisis experimental de la torre autoportada permitió la obtención de las frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento de la torre a partir de las señales procesadas y de la aplicación de la técnica OMA, ver figura 5. Los resultados experimentales fueron comparados con las características dinámicas obtenidas en

3 modelos de elementos finitos.⁽²²⁾ Los 3 modelos se diferenciaron en la forma de unión de los elementos de manera que fueron: modelo 1, unión entre elementos continuos, modelo 2, unión entre elementos todo articulado y modelo 3, con columnas continuas y elementos restantes articulados; siendo este último el que arrojó un mejor ajuste a los valores experimentales. Las formas modales mostraron un ajuste mínimo de 95 % y la mayor diferencia entre frecuencias naturales fue de 4,7 %. Este estudio permitió validar los parámetros de las modelaciones de torres autoportadas empleadas hasta el momento en el grupo de investigación y de los cuales no existía un estudio de correspondencia con la experimentación.

Conclusiones

A partir de los resultados alcanzados se concluye que estos estudios tributan al perfeccionamiento y actualización de la norma vigente en el país para el cálculo de estructuras frente a la acción del viento, la NC-285:2003. Las investigaciones contribuyen a la disminución de la vulnerabilidad estructural de distintos tipos de obras, al incidir en una mejor aproximación del valor de la carga de viento de diseño y profundizar en el comportamiento estructural de varias tipologías que hasta el momento no tenían un respaldo normativo en el país, como, por ejemplo: las torres de telecomunicaciones autosoportadas y atirantadas y los paneles solares. Las investigaciones desarrolladas ya han sido introducidas en los nuevos diseños de parques fotovoltaicos que se desarrollan, en los modelos que se construyen de torres reticuladas actuales y en la revisión de los modelos existentes para evaluar la capacidad de respuesta de estas estructuras ante los efectos de vientos extremos y en varios edificios altos que se erigen en la capital del país en estos momentos. Los trabajos realizados han estado sustentados por investigaciones científicas, que incluyen tesis de doctorado y maestría en la temática. Los resultados publicados en revistas internacionales arbitradas avalan la pertinencia, actualidad y rigor de los trabajos expuestos. Por la importancia del tema relacionado con los fuertes vientos, principal evento meteorológico que azota la región anualmente, el impacto de los trabajos aplicados a la práctica de ingeniería civil en Cuba adquiere especial relevancia dentro del contexto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Davenport AG. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 1961;19(4):449-72. DOI: <https://doi.org/10.1680/jicep.1961.11304>
- Fernández Lorenzo I, Elena Parnás VB. Análisis de métodos de vientos extremos para calcular las velocidades básicas. Revista Cubana de Ingeniería 2016;7(2):15-25. Disponible en: <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/434>
- Luis García K, Fernández Lorenzo I, Elena Parnás VB. Aplicación de métodos de extremos para determinar las velocidades básicas del viento. Revista Arquitectura e Ingeniería 2017;11(1):2. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6450732.pdf>
- Choi ECC. Extreme wind characteristics over Singapore-an area in the equatorial belt. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1999;83(1):61-9. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00061-6](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00061-6)
- Kruger AC, Retief JV, Goliger AM. Strong winds in South Africa: Part 1 Application of estimation methods. Journal of the South African Institution of Civil Engineering 2013;55(2):29-45. Disponible en: <https://journals.co.za/doi/epdf/10.10520/EJC145419>
- Kwon DK, Kareem A. Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings. Engineering Structures 2013;51:23-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.01.008>
- Meza Chávez JE, Martín Rodríguez P, Fernández Lorenzo I, Fundora T. Cálculo de la fuerza estática del viento del proyecto de edificación 1ra y D. La Habana, Cuba: 19 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura; 2018.
- Li L, Kareem A, Xiao Y, Song L, Zhou C. A comparative study of field measurements of the turbulence characteristics of typhoon and hurricane winds. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2015;140:49-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.008>
- Fernández Lorenzo I, Elena Parnás VB. Elementos para la simulación numérica de series temporales de velocidad de viento Revista ingeniería de construcción. 2017;32(2):83-90. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200007>
- Martín Rodríguez P, Fernández Lorenzo I, Elena Parnás VB. Estudio comparativo de normas para el análisis dinámico de una torre autosoportada bajo carga de viento. Informes de la Construcción. 2019 70(552):e274. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.15.021>
- Martín P, Damatty AE. Comparison of the Canadian standard and other standards for wind loading on self-supporting telecommunication towers. Canadian Journal of Civil Engineering. 2021;48(8):993-1003. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2020-0210>
- Reynders E, Maes K, Lombaert G, De Roeck G. Uncertainty quantification in operational modal analysis with stochastic subspace identification: Validation and applications. Mechanical Systems and Signal Processing. 2016;66-67:13-30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.04.018>
- Aldereguía Sánchez C, Ballote Álvarez J, Fernández Lorenzo I, Elena Parnás VB. Comparación de métodos para determinar la longitud de rugosidad. Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2021;14(3) Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193969257003>
- García Miranda JA, López Litvinovich A, Fernández Lorenzo I, Martín Rodríguez P. Análisis de nuevos proyectos de edificios altos bajo carga de viento en La Habana. II Convención Científica Internacional "II CCI UCLV 2019"2019.
- Fernández Lorenzo I, Clavelo Elena BJ, Ollet Otero O, Elena Parnás VB. Comparison of Dynamic Analysis Methods in a Cable-Stayed Tower Under Extreme Wind Loads in Cuba. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2019;60(3):210-20. DOI: <https://doi.org/10.20898/j.iass.2019.201.037>
- Fernández Lorenzo I, Clavelo Elena B, Martín Rodríguez P, Elena Parnás VB. Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2020;197:104078. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104078>
- Fundora Sautié N, Romero Monteiro L, Camano Schettini EB, Elena Parnás VB. Determinación de los coeficientes de arrastre y sustentación en un perfil angular de alas iguales con el empleo de simulación numérica. Ingeniería y Desarrollo. 2020;38(1):66-84. DOI: <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.511.8>
- López Llanusa A, Parnás VB, Cataldo J. Wind tunnel experiments on ground-mounted photovoltaic solar panels. Revista Ingeniería de Construcción. 2019;34:15-24. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732019000100015>

19. Martín Rodríguez P, Elena Parnás VB, Fernández I, Loredó-Souza AM. Coeficientes de arrastre de torres reticuladas con antenas VHF mediante ensayo en túnel de viento. Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. 2019;42(3):118+. Disponible en: <https://www.produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/27421>
20. Fundora Sautié N, Camaño Schettini EB, Loredó Souza AM, Parnás VE. Coeficientes de forma en sección compuesta con ensayos en túnel de viento. Ingeniería Hidráulica y Ambiental. 2020;41(1):85-99. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/riha/v41n1/1680-0338-riha-41-01-85.pdf>
21. Luis García K, Elena Parnás VB, Maes K, Lombaert G. Mediciones a escala real de torre autosoportada empleando acelerómetros y strain gauges. Ingeniería y Desarrollo. 2020;38(1):259-78. DOI: <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.531.38>
22. Luis García K, Maes K, Elena Parnás VB, Lombaert G. Operational modal analysis of a self-supporting antenna mast. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2021;209:104490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104490>.

Recibido: 10/07/2022

Aprobado: 15/11/2022

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, (CUJAE), a CAPES, a la Universidad Federal de Rio Grande del Sur (UFRGS), a la universidad KU Leuven, Universidad de la República (UdelaR), a la Agencia Uruguaya para la Cooperación Internacional y a la asociación flamenca VLIR por su apoyo en el desarrollo de la investigación.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con el contenido del artículo con las instituciones a las que pertenecen ni con ninguna otra entidad o institución.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Vivian Elena Parnás, Patricia Martín Rodríguez, Ingrid Fernández Lorenzo, Alejandro López Llanusa, Katia Luis García, Bruno Clavelo Elena, Nelson Fundora Sautié, Geert Lombaert, Kritoff Maes, Jose Cataldo Ottieri, Edith Beatriz Camaño Schettini, Acir

Mércio Loredó-Souza, Amaya Ballate Delgado
Curación de datos: Vivian Elena Parnás, Patricia Martín Rodríguez, Ingrid Fernández Lorenzo, Alejandro López Llanusa, Katia Luis García, Bruno Clavelo Elena, Nelson Fundora Sautié, Kritoff Maes
Análisis formal: Vivian Elena Parnás, Patricia Martín Rodríguez, Ingrid Fernández Lorenzo, Alejandro López Llanusa, Katia Luis García, Bruno Clavelo Elena, Nelson Fundora Sautié, Geert Lombaert, Kritoff Maes, Jose Cataldo Ottieri, Edith Beatriz Camaño Schettini, Acir
Mércio Loredó-Souza, Amaya Ballate Delgado
Redacción-revisión y edición: Vivian Elena Parnás, Patricia Martín Rodríguez, Ingrid Fernández Lorenzo

Financiamiento

El desarrollo de esta investigación fue favorecido por financiamiento aportado en proyectos de investigación por la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, CUJAE y por el financiamiento para estancias de investigación, becas doctorales y financiamiento de equipamientos otorgadas por: Proyecto Vibraciones basadas en la evaluación de estructuras (VIBRAS) financiado por VLIR, Bélgica; Proyecto CAPES MES-CUBA no. 116/2011 "Acción del viento en torres reticuladas" aprobado por el edital no. 018/2011- Programa CAPES-MES-CUBA-Proyectos, Brasil; Proyecto Formación de recursos humanos en ingeniería del viento. Manejo de túnel de viento financiado por Agencia Uruguaya para la Cooperación Internacional (AUCI), Uruguay

Cómo citar este artículo

Elena Parnás V, Martín Rodríguez P, Fernández Lorenzo I, López Llanusa A *et al.* Contribución a la determinación de las cargas de viento en estructuras. An Acad Cienc Cuba [internet] 2023 [citado en día, mes y año];13(2):e1279. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1279>

El artículo se difunde en acceso abierto según los términos de una licencia Creative Commons de Atribución/Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0), que le atribuye la libertad de copiar, compartir, distribuir, exhibir o implementar sin permiso, salvo con las siguientes condiciones: reconocer a sus autores (atribución), indicar los cambios que haya realizado y no usar el material con fines comerciales (no comercial).

© Los autores, 2023.

