

Influencia del Amortiguamiento en la Respuesta Dinámica del Modelo Computacional de una Torre Autosoportada

Luis García, Katia^{1,*} ; Elena Parnás, Vivian Beatriz¹ 

¹Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE, Facultad de Ingeniería Civil, La Habana, Cuba

Resumen: Las torres de celosía son estructuras vulnerables ante la acción del viento por lo que han sido objeto de diversos estudios en las últimas décadas. Para el análisis del comportamiento de las torres se utilizan los modelos computacionales los cuales pueden ser calibrados a partir de las características dinámicas obtenidas de ensayos a escala real. Los parámetros que permiten caracterizar la respuesta dinámica de una estructura son la frecuencia natural, las formas modales y la razón de amortiguamiento, esta última es la característica de mayor incertidumbre en su estimación. El objetivo de este trabajo es evaluar la influencia del amortiguamiento en la respuesta dinámica de un modelo computacional de torre autosoportada. Los valores de amortiguamiento se obtuvieron mediante la técnica del análisis modal operacional y se compararon con los valores de amortiguamientos sugeridos en los códigos internacionales. Los resultados muestran que no existe diferencia en los valores máximos de sollicitaciones en términos de aceleraciones, desplazamientos y fuerza axial cuando se usa el Método Dinámico en el dominio del tiempo.

Palabras clave: amortiguamiento estructural, análisis dinámico, espectro de frecuencia, tiempo-historia

Influence of Damping on the Dynamic Response of a Self-supporting Tower Computational Model

Abstract: Lattice towers are structures vulnerable to wind action, which has made them the subject of various studies in recent decades. Computational models are used to analyze the behavior of these towers, and these models can be calibrated based on the dynamic characteristics obtained from real-scale tests. The parameters that allow characterizing the dynamic response of a structure are the natural frequency, mode shapes, and damping ratio; the latter being the characteristic with the greatest uncertainty in its estimation. The objective of this paper is to evaluate the influence of damping on the dynamic response of a computational model of a self-supporting tower. The damping values were obtained using the operational modal analysis technique and compared with the damping values suggested in international codes. The results show that there is no difference in the maximum values of stresses in terms of accelerations, displacements, and axial force when using the Dynamic Method in the time domain.

Keywords: dynamic analysis, frequency spectrum, time-history, structural damping

1. INTRODUCCIÓN

En Ingeniería Civil, las estructuras se estudian mediante el uso de modelos computacionales, generalmente basados en el método de elementos finitos, y se asume que dicho modelo provee una adecuada caracterización de la respuesta real de la estructura para las cargas de diseño consideradas. Sin embargo, la respuesta de la estructura real no siempre se reproduce correctamente debido a las simplificaciones del modelo (Cheng et al., 2021), por lo que se hace necesaria la calibración del mismo.

De manera general, en el proceso de calibración existen dos posibles incertidumbres, la primera es la relacionada con la concepción del modelo computacional y la segunda se debe a la veracidad de los datos experimentales obtenidos de ensayos a escala real. Las incertidumbres del modelo, se vinculan a las especificaciones en las invariantes del proceso de modelación: material, masa, geometría, carga y condiciones de borde. La incertidumbre en los ensayos a escala real está dada por la imprecisión de los datos recolectados, aunque estas han disminuido con el paso de los años debido a la evolución de las técnicas experimentales y la introducción de métodos novedosos como el análisis modal experimental y los instrumentos de medición empleados.

*katialuisg@gmail.com

Recibido: 31/01/2025

Aceptado: 08/04/2025

Publicado en línea el 31/05/2025

10.33333/tp.vol55n2.07

CC BY 4.0

Los ensayos a escala real se utilizan, entre otras aplicaciones, para la obtención de características dinámicas: frecuencias naturales, formas modales y razones de amortiguamiento. El procedimiento consiste en colocar sensores tales como acelerómetros y galgas extensiométricas para obtener registros temporales de desplazamientos, aceleraciones y fuerzas que permitan a través de procesamiento de señales obtener las características dinámicas. Estas técnicas de ensayos a escala real han sido aplicadas en los últimos años a edificaciones (Aloisio et al., 2020), pasos peatonales (Mursi & Papangelis, 2024), aerogeneradores (Maes et al., 2016) y en puentes (Cheng et al., 2021; Maes & Lombaert, 2023; Yang et al., 2020).

Los resultados experimentales obtenidos mediante la técnica de análisis modal experimental, se emplean con diversos fines: calibración de modelos computacionales (Saudi, 2014), monitoreo de estructuras (Peeters & De Roeck, 1999) e identificación de fuerzas (Kazemi Amiri & Bucher, 2017). Generalmente, en los trabajos de identificación de sistemas a partir del análisis modal operacional, la principal incertidumbre se ha observado en la obtención del amortiguamiento total de las estructuras (Jimenez Capilla et al., 2022). El amortiguamiento como concepto es el proceso mediante el cual la amplitud de la vibración disminuye de manera constante. La energía cinética y la energía de deformación del sistema vibratorio se disipan mediante diversos mecanismos de amortiguamiento.

El amortiguamiento total (ξ_t) existente en una torre reticulada sujeta a la acción del viento se compone por la suma del amortiguamiento estructural (ξ_s) más el amortiguamiento aerodinámico (ξ_a). El amortiguamiento aerodinámico está dado por la velocidad de viento que actúa en la torre mientras que el amortiguamiento estructural depende de las características propias de la estructura. Según Calotescu et al. (2019), para estructuras ligeras y esbeltas como las torres cuando se tiene velocidades de viento altas el amortiguamiento aerodinámico puede ser mucho más grande que el amortiguamiento estructural.

El amortiguamiento estructural se asume como amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez por su simplicidad a partir de estimaciones realizadas por los investigadores Chopra (1995) y Jimenez Capilla et al. (2022). El amortiguamiento estructural (ξ_s) depende del amortiguamiento propio del material y del amortiguamiento que se genera por la fricción entre las uniones. Este se puede obtener mediante la técnica del decremento logarítmico y el método del ancho de banda (Calotescu et al., 2019).

En torres y mástiles de comunicación, el amortiguamiento estructural incluye la fricción de las uniones entre elementos horizontales y verticales y las uniones entre los cimientos y la superestructura. El valor de amortiguamiento estructural es independiente de la amplitud, frecuencia y velocidad del movimiento de la torre y se opone constantemente al movimiento natural de la estructura. De acuerdo con Jimenez Capilla et al. (2022), las conexiones soldadas tienden a reducir la contribución del amortiguamiento estructural entre las uniones en comparación con las conexiones atornilladas. Se ha

demostrado que el amortiguamiento estructural es un factor importante en la determinación de propiedades aero-elásticas, en el cálculo del desprendimiento de vórtices y la generación de vibraciones por acción transversal del viento. Además, el amortiguamiento estructural reduce la respuesta de la estructura ante una situación de resonancia.

Algunas investigaciones que realizaron ensayos a escala real en torres autosoportadas muestran valores obtenidos de amortiguamiento estructural de $\xi_s = 0.003 - 0.005$ (Ballio et al., 1992), $\xi_s = 0.0025 - 0.01$ (Glanville & Kwok, 1995). En su trabajo, Jimenez Capilla et al. (2022) instrumentaron 14 monopolos y dos torres autosoportadas en condiciones de calma, con respecto al viento, con el objetivo de obtener el amortiguamiento estructural. Utilizaron acelerómetros y el sistema "Video Gauge" y aplicaron una excitación a la estructura mediante cuerdas y obtuvieron valores de amortiguamiento estructural entre 0.003 – 0.012.

En el caso de las normas internacionales, estas registran los siguientes valores de amortiguamiento estructural: ESDU sugiere utilizar valores entre 0.005 – 0.012 (ESDU, 2012), la ASCE propone el rango 0.0015 – 0.005 (ASCE7-10, 2010), el Eurocódigo (EN1991-1-4, 2004), plantea valores de 0.005 y 0.003 y el código rumano (Romanian Code, 2012), propone 0.003 – 0.005 para conexiones con pernos y soldadas, respectivamente.

La discrepancia en la bibliografía internacional en los valores de amortiguamiento estructural confirma la necesidad de establecer nuevos criterios basados en la evolución del conocimiento, las posibilidades de realizar ensayos a escala real y el surgimiento de rigurosos métodos para la identificación de características dinámicas. Una correcta estimación del amortiguamiento y comprensión del papel que juega dentro del comportamiento de estructuras sensibles a los efectos dinámicos, permite perfeccionar los métodos de cálculo y por consiguiente los requisitos de seguridad. El siguiente trabajo tiene como objetivo determinar la influencia del amortiguamiento obtenido de resultados experimentales en la respuesta dinámica de un modelo de torre autosoportada, a partir de la aplicación del Método Dinámico Completo en el dominio del tiempo.

2. METODOLOGÍA

La torre, objeto de estudio, es de tipo autosoportada de 50 m de altura, tiene una sección cuadrada troncopiramidal y antenas ubicadas a diferentes alturas. Las secciones transversales están compuestas por perfiles angulares y canales principalmente, y las uniones son atornilladas. La torre, su distribución de antenas y el modelo de elementos finitos que se empleó para el análisis se muestran en la Figura 1. El ensayo a escala real se realizó con 10 acelerómetros, ocho galgas extensiométricas y se aplicó la técnica del Análisis Modal Operacional (OMA). Dentro del OMA se aplicó en específico el Método del Subespacio Estocástico (SSI) para la determinación de las características dinámicas. La implementación de la técnica de procesamiento se encuentra en la herramienta de Matlab MACEC (Reynders et al., 2021). El método SSI tiene su fundamento matemático en que el conocimiento determinístico de la entrada o carga que excita

la estructura es reemplazado por la idealización de que esta responde a un proceso estocástico.

Las ecuaciones para establecer las relaciones de entrada – salida en un sistema invariante en el tiempo se modifican de la siguiente manera:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k \quad (1)$$

$$y_k = Cx_k + v_k \quad (2)$$

Donde x_k es el estado del sistema, y_k es la salida o respuesta del sistema, w_k y v_k son el ruido del proceso y la salida respectivamente, A y C son las matrices del sistema. El objetivo del método es obtener las matrices A y C a partir de la salida y_k . Para ello, se construye la matriz de Hankel (Cauberghe, 2004; Peeters, 2000), la cual relaciona las salidas medidas de referencia con las que no son de referencia. El término salida se utiliza para aquellas respuestas (aceleraciones) medidas en puntos que no se modifican durante la medición. Los detalles sobre la instrumentación y el procesamiento de las señales pueden encontrarse en Luis García et al. (2021).



Figura 1. Torre autosoportada objeto de estudio

En la Ecuación 3, se muestra y_i^{ref} como las salidas de referencia y y_i como las salidas que no son de referencia. La bibliografía del método expresa que la parte que pertenece a la referencia se llama de pasado con el subíndice p y la parte que no es de referencia se llama de futuro con el subíndice f . El inverso de la relación entre el pasado y el futuro se llama proyección, y está dada por la Ecuación 4. La resolución de la proyección $\mathcal{P}_i^{ref}$, se realiza mediante la Descomposición de Valores Singulares (SVD) y el acondicionamiento algebraico.

$$H^{ref} = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{bmatrix} y_0^{ref} & y_1^{ref} & \dots & y_{N-1}^{ref} \\ y_1^{ref} & y_2^{ref} & \dots & y_N^{ref} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{i-1}^{ref} & y_i^{ref} & \dots & y_{i+N-2}^{ref} \\ y_i^{ref} & y_{i+1}^{ref} & \dots & y_{i+N-1}^{ref} \\ y_{i+1}^{ref} & y_{i+2}^{ref} & \dots & y_{i+N}^{ref} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{2i-1}^{ref} & y_{2i}^{ref} & \dots & y_{2i+N-2}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_p^{ref} \\ y_f^{ref} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathcal{P}_i^{ref} = \frac{y_f}{y_p^{ref}} \quad (4)$$

Además del empleo de la factorización QR, se obtienen los valores propios λ_i y con ellos las frecuencias de oscilación f_i , razones de amortiguamiento ξ_i y formas modales. Los valores de amortiguamiento obtenidos de la aplicación del SSI tienen alta validez garantizado por la implementación de los diagramas de estabilización en MACEC. Dichos valores permiten identificar formas modales estables normalizadas y reales. Entre las ventajas del SSI se encuentra que puede lidiar con formas modales cercanas y muy amortiguadas, aspectos que están presentes en las torres de telecomunicaciones.

$$f_i = \frac{\sqrt{Re^2(\lambda_i) + Im^2(\lambda_i)}}{2\pi} \quad (5)$$

$$\xi_i = -\frac{Re(\lambda_i)}{2\pi f_i} \quad (6)$$

El procesamiento de las señales arrojó la identificación de cinco modos de oscilación de la torre, de ellos cuatro acoplados en pares. Los valores de las frecuencias naturales y las razones de amortiguamiento obtenidos se muestran en la Tabla 1. Las razones de amortiguamiento obtenidas del ensayo a escala real corresponden a la suma de todos los amortiguamientos existentes en la torre.

Tabla 1. Frecuencias naturales f_j y razones de amortiguamiento ξ_j de la torre

Modo j	1	2	3	4	5
f_j [Hz]	1.75	1.75	3.10	3.10	5.43
ξ_j [%]	0.27	0.27	0.26	0.26	0.21

Los valores de amortiguamiento obtenidos fueron inferiores al 0.3 %, y teóricamente incluyen el amortiguamiento estructural y el aerodinámico. Se considera que este valor calculado se corresponde solamente con el amortiguamiento estructural ya que el amortiguamiento aerodinámico, dada las condiciones climáticas para el momento de la medición no permitieron desarrollar ese componente. Se comprobó que el día del ensayo no se registró ningún evento climatológico con altas velocidades de viento. Además, se verificó según la literatura nacional que, las velocidades de viento medias en condiciones normales en Cuba oscilan entre 2 m/s y 4 m/s para la altura de referencia de 10 m sobre el nivel del terreno (Roque Rodríguez et al., 2015). Finalmente, se confirmó con datos provenientes de la estación meteorológica cercana que el día de medición, la velocidad de viento oscilaba alrededor de los 2 m/s.

3. EVALUACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EN EL MODELO COMPUTACIONAL

En la construcción del modelo computacional de la torre, se empleó el módulo de elasticidad o módulo de Young del material con valor de 2 GPa. Se consideraron las antenas, la

escalera y el peso de la tornillería, como masas añadidas al modelo en sus puntos de ubicación. En el caso de la invariante condiciones de borde, se modelaron las uniones con un modelo mixto, donde las columnas están compuestas por elementos que se unen mediante empotramiento y los elementos secundarios (tranques y diagonales) se unen mediante articulaciones. Se verificó previamente que el modelo mixto es el que mejor reproduce las características dinámicas de la torre, a partir de la comparación con los valores obtenidos del ensayo a escala real (Luis García et al., 2021).

Con el fin de evaluar la influencia del amortiguamiento en la respuesta de la torre, se obtuvieron los desplazamientos, las aceleraciones y las fuerzas interiores para tres condiciones diferentes de amortiguamiento: a) el amortiguamiento medido, b) amortiguamiento estructural de 0.5 % y c) amortiguamiento de 5 %. Para la opción a) se evaluaron cinco valores de amortiguamiento que se corresponden con las cinco formas modales identificadas. La opción b) se corresponde con lo establecido por la mayoría de las normas para conexiones atornilladas, sobre la base de que el amortiguamiento medido tiene muy poco aporte del amortiguamiento aerodinámico por lo que se puede considerar solo estructural. La mayoría de las normas plantean un valor de amortiguamiento estructural de 0,5% para conexiones atornilladas. Los métodos de cálculo de las torres de telecomunicaciones se dividen en estáticos equivalentes y dinámicos completos, estos últimos desarrollados en el dominio del tiempo y la frecuencia. Los métodos Estáticos Equivalentes se basan en considerar solamente el aporte del primer modo flector a la respuesta de la torre. En todos estos métodos, se plantea el empleo de un amortiguamiento total de 5 %. Debido a esto, se propone el caso c) que, aunque no corresponde con las condiciones meteorológicas simuladas, es el valor propuesto por la mayoría de las metodologías para el cálculo de estructuras ante la acción del viento.

Aunque las características dinámicas son independientes de la carga que excita la estructura y solo dependen de la masa y rigidez de la torre, para la evaluación del amortiguamiento es necesario resolver un problema de vibraciones forzadas y en consecuencia aplicar una carga, y que esta reproduzca lo más exacto posible su comportamiento real. El método que se empleó para estimar la carga de viento fue el Método Dinámico Completo en el dominio del tiempo (Fernández Lorenzo et al., 2020), en el cual se generan funciones de fuerza sobre la estructura a partir de funciones temporales de velocidad de viento. Las funciones temporales de viento se determinan a partir de las componentes media (Ecuación 7) y turbulenta de la velocidad del viento en el sitio de estudio (Ecuación 8).

$$\bar{F}(z) = 1/2 \rho_a C_a A_{ref} \bar{U}(z)^2 \quad (7)$$

$$F_u(z, t) = \gamma_a C_a A_{ref} \bar{U}(z) u(z, t) \quad (8)$$

En las ecuaciones, C_a es el coeficiente de forma. La variable A_{ref} es el área de referencia, que representa el área neta frontal de cada tramo de torre ante la acción del viento, γ_a es la densidad del aire para una temperatura de 25 °C, $\bar{U}(z)$ es la velocidad media variable en función de la altura y $u(z, t)$ es la velocidad turbulenta para cada una de las alturas en las que se

dividió la torre. La velocidad turbulenta se genera con las funciones de velocidad de viento. La carga de antena también se incluyó en la modelación a partir de la generación de funciones en las alturas donde estas se ubican. Para simular la componente fluctuante del viento, se usó la metodología desarrollada por Fernández Lorenzo et al. (2020).

Para caracterizar adecuadamente el comportamiento estructural de la torre según la bibliografía internacional, resulta necesario generar cinco funciones de fuerza de viento dinámico para la velocidad de viento. En el modelo computacional, los valores de amortiguamiento se especifican dentro del tipo de análisis que se realice, en este caso en el análisis lineal en el dominio del tiempo, con amortiguamiento proporcional a la masa y la rigidez a partir del amortiguamiento de Rayleigh. Según Chopra (1995), la utilización del amortiguamiento de Rayleigh es un primer paso hacia la construcción de una matriz de amortiguamiento que sea en cierta medida consistente con los datos experimentales. La ecuación principal de la matriz amortiguamiento de Rayleigh se plantea en la Ecuación 9.

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (9)$$

Donde c , m y k son la matrices de amortiguamiento, masa y rigidez respectivamente, a_0 y a_1 son coeficientes que se determinan a partir de razones de amortiguamiento y frecuencias naturales conocidas. La frecuencia de amortiguamiento para el n -ésimo modo de tal sistema se obtiene en la Ecuación 10. Basado en estas expresiones, se calculan las razones de amortiguamiento de los modos superiores a los identificados, correspondientes a los modos del cuatro en adelante.

$$\xi_n = \frac{a_0}{2} \frac{1}{w_n} + \frac{a_1}{2} w_n \quad (10)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La respuesta de la torre objeto de estudio se obtuvo mediante la aplicación de un análisis en el dominio del tiempo de tipo lineal y su solución con el principio de superposición modal. Se obtuvieron los gráficos tiempo historia de los desplazamientos para los 416 nodos de la torre, tanto en el eje x como y , con comportamiento similares. En este trabajo, se muestran los resultados correspondientes al eje y en un punto en el tope de la torre.

En la Figura 2, se observa la función tiempo historia del desplazamiento para una de las cinco funciones de velocidad de viento y dirección de viento 0°. En dicha figura, el eje de las ordenadas presenta el tiempo en segundos y en el eje de las abscisas se presenta la oscilación de los desplazamientos en metros. La Figura 2a) muestra el desplazamiento en el tope a partir de evaluar el valor de amortiguamiento medido para cada modo de oscilación. Las Figuras 2b) y 2c) muestran los desplazamientos para los valores de amortiguamiento estructural y extremo, respectivamente.

Al observar la Figura 2, se puede verificar que, de forma general, los rangos de oscilación de desplazamientos son similares para todos los amortiguamientos, mientras que la

amplitud que presenta la oscilación sí varía. Se muestra mayor oscilación para los desplazamientos con amortiguamientos inferiores, Figura 2a) y 2b), y existe una mayor disipación para el amortiguamiento de 5 %. Este comportamiento es lógico de acuerdo a la función que desempeña el amortiguamiento en la respuesta de una estructura. Los mayores valores de desplazamiento se encuentran en el orden de los 4×10^{-4} m, este valor es pequeño, pero está acorde al nivel de carga que está sometida la torre en estudio, correspondiente a una velocidad de viento de aproximadamente 2 m/s.

El mismo comportamiento se obtuvo en las aceleraciones en el tope de la torre para una de las funciones y los tres amortiguamientos. La Tabla 2 muestra los valores máximos de desplazamientos y aceleraciones en dirección y, para cada amortiguamiento y función de viento. Además, se presentan los valores promedios de las cinco funciones de carga de viento. Existen ligeros descensos en los valores promedio de desplazamientos y aceleraciones conforme aumenta el amortiguamiento, pero las diferencias no son significativas, son todas inferiores al 10 %.

De estos resultados, se puede interpretar que, para el caso de dichas solicitaciones, no tiene importancia el valor de amortiguamiento que se emplee en el cálculo computacional mediante el método dominio del tiempo. Los gráficos tiempo historia de la fuerza axial presentan el mismo comportamiento de los gráficos tiempo historia de desplazamientos. Los resultados para las fuerzas interiores también confirman que no existe variación en los valores de fuerza interior para los amortiguamientos que se emplearon.

Los espectros de frecuencias de los desplazamientos se observan en la Figura 3, contruidos con base en las propiedades de Fourier y como concepto muestran una distribución del contenido de frecuencias de las señales. Los espectros correspondientes a las aceleraciones en el tope de la torre y la fuerza axial en la base de las columnas muestran un comportamiento similar a los espectros de desplazamientos. El primer pico alrededor de la frecuencia 1.7 Hz corresponde a los modos acoplados uno y dos, el segundo pico en la frecuencia 3.10 Hz corresponde a los modos acoplados tres y cuatro y el tercer pico en la frecuencia cercana de 5.4 Hz corresponde al quinto modo identificado.

Tabla 2. Desplazamientos y aceleraciones máximas en el tope de la torre para cada valor de amortiguamiento

Funciones	Desplazamientos (cm)			Aceleraciones (cm/s ²)		
	Amortiguamiento ξ_j [%]			Amortiguamiento ξ_j [%]		
	5	0.5	medido	5	0.5	medido
1	0.089	0.093	0.094	3.931	3.931	3.931
2	0.085	0.094	0.095	3.873	3.873	3.873
3	0.104	0.104	0.104	4.801	4.801	4.801
4	0.098	0.103	0.104	4.549	4.549	4.549
5	0.097	0.103	0.104	4.682	4.682	4.682
promedio	0.095	0.099	0.100	4.367	4.367	4.367

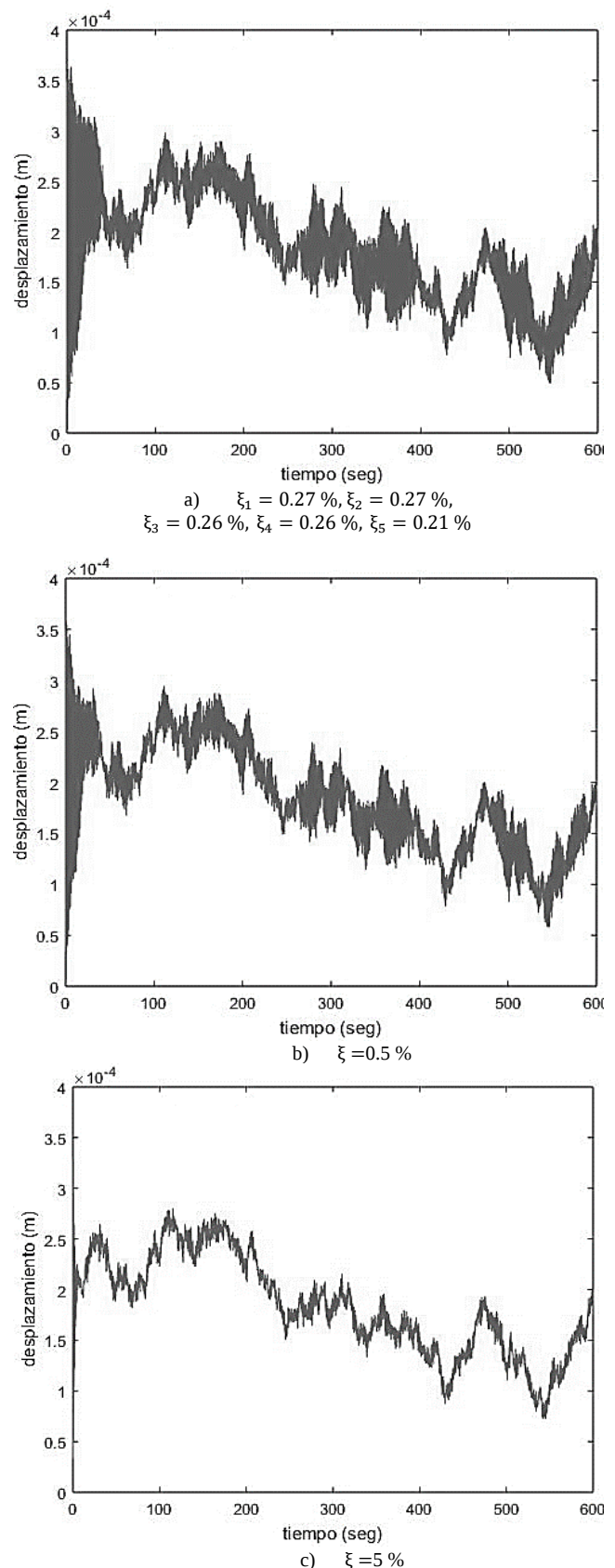


Figura 2. Tiempo historia de los desplazamientos para, a) amortiguamiento medido, b) amortiguamiento estructural c) amortiguamiento total extremo

De los resultados experimentales y los espectros que se obtuvieron, se esperan tres picos correspondientes a las formas modales identificadas. Para cualquiera de las respuestas (aceleraciones, desplazamientos y fuerza axial), en el caso de

los espectros para los amortiguamientos medidos y el amortiguamiento de 0.5 %, se muestran los tres picos. En el caso de amortiguamiento 0.5 %, el tercer pico es inferior. En los espectros de la Figura 3c), no se observan los tres picos, el pico correspondiente al quinto modo flector desaparece. Por otro lado, en la Figuras 3a) donde se obtienen las respuestas con el amortiguamiento medido, se observa que el quinto modo en la frecuencia de 5.4 Hz tiene un aporte considerable a la respuesta.

Si bien anteriormente se demostró que para los desplazamientos, fuerza axial y aceleraciones máximas el valor de amortiguamiento empleado en la simulación no marca una diferencia significativa, en el caso de los espectros de frecuencia si existe diferencia, ya que fueron los espectros simulados con los valores de amortiguamiento medidos para cada modo quienes mejor reprodujeron el comportamiento de los espectros experimentales, lo cual se observa en la Figura 4.

De esta manera, también se verifica que existe correspondencia entre el modelo computacional y la realidad que se obtuvo del ensayo experimental, indicativo de un modelo calibrado, a partir de la evaluación del amortiguamiento. Además, el empleo de valores de amortiguamiento medidos reales conlleva a estimar correctamente los modos superiores y el aporte que estos tienen en la respuesta total de la estructura. Esto se evidencia en la desaparición del quinto modo en la respuesta cuando se usa el amortiguamiento de 5 %.

Las torres autosoportadas son estructuras con comportamiento lineal, que tienen claramente separados sus modos de oscilaciones propias, con predominio de un modo fundamental; con lo cual es posible desarrollar el análisis dinámico de las mismas mediante tres enfoques principalmente: métodos estáticos equivalentes, dominio de la frecuencia y dominio del tiempo.

Los métodos de cálculo en torres de telecomunicaciones bajo la acción del viento se basan principalmente en determinar las respuestas desplazamientos y fuerzas interiores. Los métodos estáticos equivalentes para el cálculo de torres establecen el empleo de solo el primer modo dominante para estimar la respuesta. Una forma cuantitativa de verificar el aporte de cada modo de oscilación dentro del espectro de la respuesta de la estructura, es mediante las proporciones de la varianza para desplazamientos y fuerzas axiales, calculadas a partir de la ecuación 11.

$$P_j = \frac{\sigma_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}} \quad (11)$$

Donde σ_j es la varianza o la raíz cuadrada de la integral del espectro de potencia de desplazamiento o fuerza axial, lo cual a su vez es igual a la raíz cuadrada del área bajo la curva del espectro. De esta manera, se obtienen los valores de proporción que se muestran en la Figura 5 para cada modo de oscilación y amortiguamiento. Esta figura representa una normalización de la respuesta, donde valores cercanos a la unidad indican un alto aporte del modo a la respuesta total de la torre.

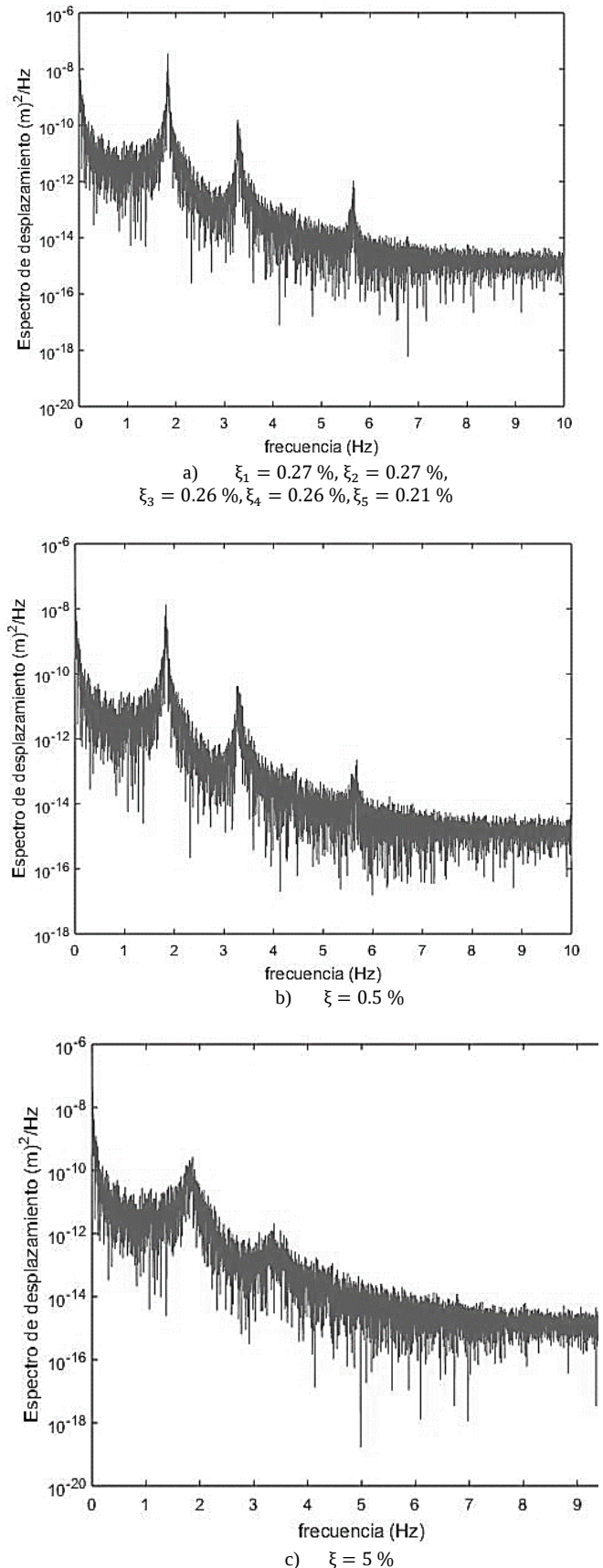


Figura 3. Espectros de desplazamiento en el tope de la torre. a) amortiguamiento medido, b) amortiguamiento estructural, c) amortiguamiento total según los códigos

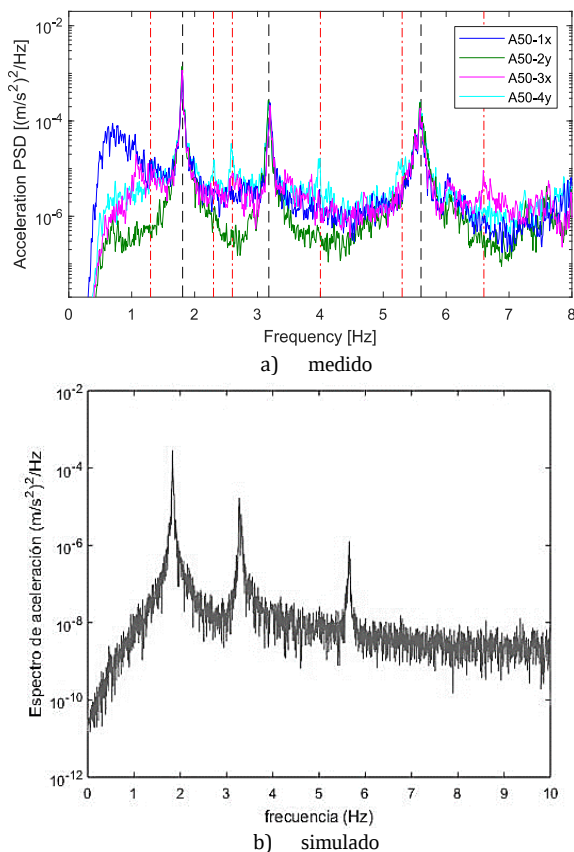


Figura 4. Espectros de aceleración en el tope de la torre

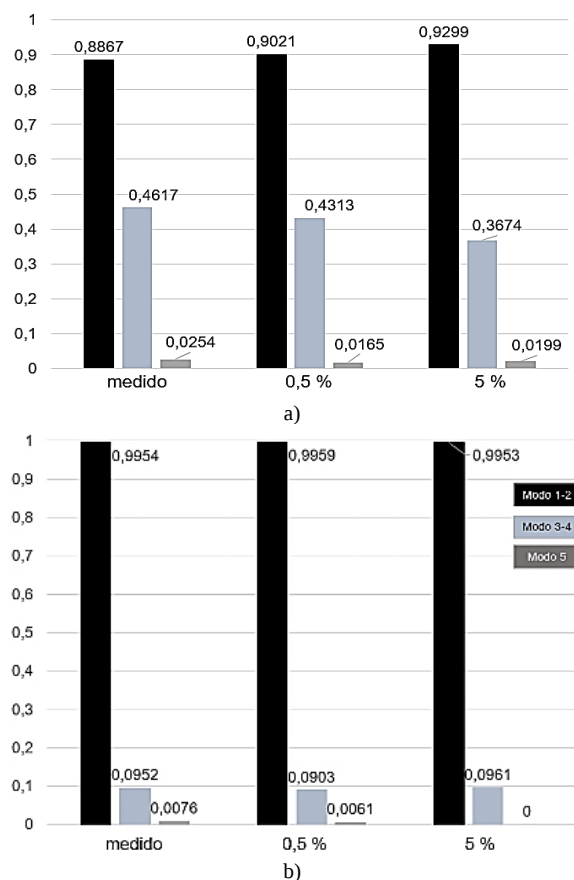


Figura 5. Valores de P_j para los diferentes amortiguamientos a) proporción de fuerza axial b) proporción de desplazamiento

La Figura 5b) muestra cuantitativamente que, en el caso de los desplazamientos, los modos altos no desempeñan un papel importante en la respuesta y solo es dominante el primer modo de oscilación, lo que corrobora la metodología que establecen los métodos estáticos equivalentes. Para el caso de la fuerza axial (Figura 5a), los modos tres y cuatro (barra central), presentan valores de proporción de varianza altos ($P_j = 0.46$), lo que indica que estos modos tienen participación en la respuesta de la estructura en términos de fuerza interior. Dicho resultado se encuentra en correspondencia con algunos investigadores y códigos de diseño (Solari & Martín Rodríguez, 2021), los cuales han perfeccionado el método estático equivalente con la inclusión del aporte de los modos altos a la respuesta en términos de fuerzas interiores.

Este aspecto resulta de gran importancia ya que la correcta estimación de la respuesta de las estructuras en términos de fuerzas interiores influye directamente en el diseño y revisión de las mismas y a su vez, en la mitigación de la alta vulnerabilidad estructural que las torres presentan ante la acción del viento extremo debido a sus condiciones de esbeltez y ligereza.

Con relación a la influencia de la variación del amortiguamiento en la respuesta, no se obtuvieron diferencias significativas en los valores de proporciones de varianza que se muestran en la Figura 5. De aquí que se pueda establecer preliminarmente que el empleo de diferentes valores de amortiguamiento no produce diferencias al aporte de cada modo de oscilación dentro de la respuesta de la estructura cuando se emplea el método dinámico en el dominio del tiempo para solucionar la ecuación de movimiento para múltiples grados de libertad de la estructura.

Dichos resultados se añaden al primer aspecto que se abordó en la discusión de los resultados, donde se planteó que no tiene repercusión el valor de amortiguamiento que se emplee para determinar los valores máximos de desplazamiento, aceleración y fuerza axial. Como continuación de la investigación, se recomienda realizar instrumentaciones a largo plazo para obtener nuevos valores de amortiguamiento con diferentes condiciones de carga. Además, medir la respuesta de la estructura en términos de deformaciones y registrar la velocidad de viento a la que se encuentra sujeta la estructura durante la medición.

5. CONCLUSIONES

La evaluación en el modelo computacional de la variación del amortiguamiento arrojó que, los valores máximos de desplazamiento, aceleración y fuerza axial para los tres valores de amortiguamiento no mostraron diferencias significativas; de forma similar ocurre con los gráficos tiempo historia. Por tanto, el método Dinámico Completo en el dominio del tiempo no es susceptible al valor de amortiguamiento que se emplee para determinar la respuesta de la estructura.

Los espectros de fuerzas interiores, desplazamientos y aceleraciones para los amortiguamientos medidos y para el amortiguamiento de 0.5 % muestran la presencia de los modos de oscilación 1-2, 3-4 y 5. En el caso del mayor valor de

amortiguamiento de 5 % solo se observa en el espectro la presencia de los modos 1-2 y muy ligeramente los modos 3-4.

Cuando se cuantifica el aporte de cada modo de oscilación a la respuesta total de la estructura se obtiene que, solo el primer par de modos de oscilación tiene aporte a la respuesta para el caso de los desplazamientos. Por otro lado, en la fuerza axial el segundo par si tiene participación en la respuesta debido a los valores de proporciones de varianza que se obtuvieron. En cuanto al amortiguamiento, se concluye que la variación de esta característica dinámica no conlleva a diferencias en el aporte de cada modo dentro de la respuesta de la estructura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universidad Católica de Lueven y al proyecto VLIR VIBRAS por brindar los medios para realizar el ensayo a escala real.

REFERENCIAS

- Aloisioa, A., Pasca, D., Tomasi, R., & Fragiaco, M. (2020). Dynamic identification and model updating of an eight-storey CLT building. *Engineering Structures*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110593>
- ASCE7-10. (2010). American Society of Civil Engineers, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. In. <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784412916>
- Ballio, G., Maberini, F., & Solari, G. (1992). A 60 year old, 100 m high steel tower: .limit states under wind actions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41, 2089-2100. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(92\)90639-R](https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90639-R)
- Calotescu, I., Bitca, D., & Solari, G. (2019). *Aerodynamic damping of telecommunication lattice towers*. Paper presented at the The 15th International Conference on Wind Engineering, Beijing, China. https://www.academia.edu/83241272/Aerodynamic_damping_of_telecommunication_lattice_towers
- Cauberghe. (2004). *Applied frequency-domain system identification in the field of experimental and operational modal analysis*. (PhD), Brussels, Belgium. <https://researchportal.vub.be/en/publications/applied-frequency-domain-system-identification-in-the-field-of-ex>
- Cheng, X. X., Wu, G., Zhang, L., & Ma, F. B. (2021). A New Damage Detection Method for Special-Shaped Steel Arch Bridges Based on Fractal Theory and the Model Updating Technique. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 21(03), 2150030. <https://doi.org/10.1142/S0219455421500309>
- Chopra. (1995). *Dynamics of structures*. New Jersey. https://www.google.com/cu/books/edition/Dynamics_of_Structures/eRcvAAAAQBAJ?hl=es-419
- EN1991-1-4. (2004). Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions. In. <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>
- ESDU. (2012). *Calculation Methods for along Wind Loading Part 2: Response of Line-like Structures to Atmospheric Turbulence*. https://www.esdu.com/cgi-bin/ps.pl?t=doc&p=esdu_87035b-r1
- Fernández Lorenzo, I., Clavelo Elena, B., Martín Rodríguez, P., & Elena Parnás, V. B. (2020). Dynamic analysis of self-supported tower under hurricane wind conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 197, 104078. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2019.104078>
- Glanville, M., & Kwok, K. (1995). Dynamic characteristics and wind induced response of a steel frame tower. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 54, 133-149. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(94\)00037-E](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)00037-E)
- Jimenez Capilla, J. A., Wang, J., & Brownjohn, J. M. W. (2022). Damping estimation using free decays response in short telecom structures. *Advances in Structural Engineering*, 25(1), 212-228. <https://doi.org/10.1177/13694332211042780>
- Kazemi Amiri, A., & Bucher, C. (2017). A procedure for in situ wind load reconstruction from structural response only based on field testing data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 167 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.04.009>
- Luis García, K., Maes, K., Elena Parnás, V. B., & Lombaert, G. (2021). Operational modal analysis of a self-supporting antenna mast. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104490>
- Maes, K., Iliopoulos, A., Weijtjens, W., Devriendt, C., & Lombaert, G. (2016). Dynamic strain estimation for fatigue assessment of an offshore monopile wind turbine using filtering and modal expansion algorithms. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76, 592-611. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.01.004>
- Maes, K., & Lombaert, G. (2023). Validation of virtual sensing for the reconstruction of stresses in a railway bridge using field data of the KW51 bridge. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110142>
- Mursi, M., & Papangelis, J. (2024). *Full scale testing of modular steel footbridge*. Paper presented at the 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS, Ho Chi Minh City, Vietnam. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1972-3_47
- Peeters, B. (2000). *System Identification and Damage Detection in Civil Engineering*. (PhD.), KU Leuven. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=795700>
- Peeters, B., & De Roeck, G. (1999). Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 13(6), 855-878. <https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1249>
- Reynders, E. (2021). Uncertainty quantification in data-driven stochastic subspace identification. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 151, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107338>
- Reynders, E., Schevenels, M., & De Roeck, G. (2021). *MACEC 3.4: The MATLAB toolbox for experimental*

- and operational modal analysis. Leuven, Belgium: KU Leuven. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12984.70401>
- Romanian Code. (2012). *Codde proiectare. Evaluarea acțiunii vântului asupra construcțiilor*. Romanian. <https://ugir.ro/wp-content/uploads/2012/06/CR-1-1-4-2012.pdf>
- Roque Rodriguez, A., Niebla Sosa, Y., Carrasco Diaz, M., & Reyes Martínez, P. (2015). Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía. *Revista Cubana de Meteorología*, 21(1), 31-48. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1117.3842>
- Saudi, G. (2014). Structural assessment of a guyed mast through measurement of natural frequencies. *Engineering Structures*, 59, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.09.049>
- Solari, G., & Martín Rodríguez, P. (2021). Gust Buffeting and Aerodynamic Admittance of Structures with Arbitrary Mode Shapes. I: Enhanced Equivalent Spectrum Technique. *Journal of Engineering Mechanics*, 147(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001872](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001872)
- Yang, X. M., Qu, C. X., Yi, T. H., Li, H. N., & Liu, H. (2020). Modal Analysis of a Bridge During High-Speed Train Passages by Enhanced Variational Mode Decomposition. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20(13), 2041002. <https://doi.org/10.1142/S0219455420410023>

BIOGRAFÍAS



Luis García, Katia, es Ingenieria Civil. Graduada en la Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE en 2013. Máster en Ciencias, mención Estructuras desde 2017. Doctora en Ciencias Técnicas desde 2024. Durante sus estudios de doctorado realizó dos entrenamientos en la Universidad Católica de Leuven en Bélgica. Ha desarrollado investigaciones en las temáticas: ingeniería de viento, ensayos a escala real en torres de telecomunicaciones, calibración de modelos computacionales y análisis estructural.



Elena Parnás, Vivian Beatriz, es graduada del 1987 de Ingeniería Civil en la CUJAE. Grado de Máster en 1993. Doctora en Ciencias Técnicas en 2008. Ha realizado diversos trabajos relacionados con el análisis estructural frente a acciones del viento para diferentes construcciones e incluye ensayos en túnel de viento en la Universidad de la República, Uruguay 1989 y en la Universidad de Porto Alegre en Brasil 1990 y 2012. Profesora de la Maestría de Ingeniería Civil, Maestría de Reducción de Desastres y coordinadora del Doctorado Curricular de Civil.

