



Soporte de catenaria rígida del túnel Sol-Nuevos Ministerios: modelado con elementos finitos y actualización con ensayos modales experimentales

Simarro, M.^a; Postigo, S.^a; Torrealba, D.^a; Almenara, L.F.^b; Ania, M.^c; Simón, A.^a

^a Departamento de Ingeniería Mecánica, Térmicas y de Fluidos, Escuelas de Ingenierías, Universidad de Málaga.

^b Adif, Jefe de Proyectos de I+D+i de Línea Aérea de Contacto.

^c Adif, Jefe de Línea Aérea de Contacto

RESUMEN

La catenaria rígida presenta ciertas ventajas respecto a otros sistemas más convencionales de alimentación eléctrica en el transporte ferroviario. La tendencia a incrementar las velocidades de funcionamiento, crean la necesidad de optimizar el sistema. En este trabajo, los autores presentan el modelado con elementos finitos del soporte de catenaria rígida instalado en el tramo Sol-Nuevos Ministerios y la actualización mediante ensayos modales experimentales. Este modelo permitirá obtener la rigidez que aporta el soporte al sistema de catenaria rígida. Tras la actualización, el modelo de elementos finitos presenta un error medio de 1.26 % en los modos de mayor influencia en la respuesta dinámica bajo las condiciones de trabajo del soporte. Además, las deformadas modales del modelo de elementos finitos actualizado presentan una similitud media del 91.3 % respecto a ensayos. Los resultados indican la validez del modelo.

1. Introducción

El transporte ferroviario es uno de los métodos más seguros y eficientes para el transporte de viajeros y mercancías. En la actualidad se observan numerosos avances en el sistema de transporte ferroviario, pretendiéndose que sean más fiables y rápidos. Este sector tiene como objetivos: aumentar la velocidad, aumentar la durabilidad del material rodante, abaratar costes de mantenimiento, etc. Para alcanzar estos objetivos es necesario tener un conocimiento de todos los factores y componentes que conforman el sistema ferroviario.

Adif, Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, ejerce un papel importante en el sector ferroviario. Tiene como objetivo potenciar el transporte ferroviario español mediante el desarrollo y la gestión de las infraestructuras. Adif asume, entre otras actividades, la administración de infraestructuras ferroviarias: vías,



PONENCIA

estaciones, terminales de mercancías, la gestión de la circulación ferroviaria, la adjudicación de capacidad de los operadores ferroviarios, etc.

El proyecto en el que se incluye el estudio que se presenta en este trabajo, se centra en catenaria rígida, que junto a la catenaria flexible, o también denominada convencional, conforman las dos formas de transmisión aérea más comunes en la alimentación eléctrica de los trenes. El proyecto pretende conocer el comportamiento de los componentes que conforman la estructura de catenaria rígida y obtener una herramienta que permita realizar estudios sobre este sistema de alimentación eléctrica del mundo ferroviario.

La catenaria rígida presenta ciertas ventajas respecto a la catenaria flexible o convencional, entre ellas: el montaje se puede realizar en espacios reducidos, disminución de costes de mantenimiento, sustitución rápida del hilo de contacto, etc. Por el contrario, los mayores inconvenientes de la instalación de catenaria rígida frente a la flexible son: la mayor limitación de velocidad de circulación y la necesidad de disminución de la distancia entre soportes.

Otro aspecto importante en el estudio de catenaria, es la interacción pantógrafo-catenaria, el pantógrafo se sitúa en el techo del tren y en contacto con la catenaria se produce la alimentación eléctrica. Para que haya una buena captación de corriente es necesario en ocasiones limitar la velocidad del tren. Por lo que, la tendencia a incrementar las velocidades de funcionamiento y productividad, crean la necesidad de mejorar estos sistemas y para ello hay que conocerlos y caracterizarlos previamente.

La catenaria convencional es el sistema de alimentación eléctrica más antiguo, el cual ha tenido siempre gran interés, por lo que existe numerosa bibliografía donde se estudia la catenaria convencional y la interacción pantógrafo-catenaria (convencional). Se nombran aquí algunos estudios de la bibliografía actual. J. Ambrosio et al. [1,2] presentan la influencia de las características de suspensión de los pantógrafos y el estudio de la interacción pantógrafo-catenaria con múltiples pantógrafos. Andrea Collina et al. [3] estudia la influencia del carbón, material de la mesilla del pantógrafo, en la interacción con el cobre del hilo de contacto. En numerosos estudios se desarrollan técnicas de simulación que permiten estudiar el fenómeno de la interacción pantógrafo-catenaria [4-6]. También se diseñan controladores que permiten reproducir la interacción pantógrafo-catenaria mediante el desplazamiento de la catenaria o el control de la fuerza de contacto del pantógrafo para la realización de ensayos [7,8].

Sin embargo, la catenaria rígida es un sistema de alimentación eléctrica emergente, debido a las ventajas que presenta frente a la convencional, es interesante estudiarla y conocerla. En la búsqueda bibliográfica de catenaria rígida sólo se han encontrado dos referencias. Un estudio realizado por la Universidad Politécnica de Madrid y el CITEF (Centro de investigación en Tecnologías Ferroviarias), en el que se realiza el diseño de un nuevo perfil conductor de aluminio para mejorar el comportamiento dinámico del sistema [9]. Otro estudio



PONENCIA

realizado por la Universidad de Castilla-La Mancha, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, donde se estudia la interacción entre pantógrafo-catenaria en la transición entre cantones con diferentes modelos de pantógrafos [10].

La Catenaria Rígida se compone básicamente de cuatro elementos: perfil de aluminio, hilo de contacto, brida de unión entre perfiles, y soportes. El objetivo de este trabajo es caracterizar y modelar el soporte instalado en la Red de Cercanía de Madrid, en el tramo Sol-Nuevos Ministerios. Se pretende obtener un modelo de elementos finitos del soporte validado mediante ensayos modales experimentales.

2. Material y métodos

Se realizará el premodelado con elementos finitos del soporte de catenaria rígida para un estudio dinámico, con los resultados obtenidos se decidirán los puntos de medida de la fase experimental y una vez obtenidos los resultados de los ensayos modales experimentales, se actualizará el premodelo, con el objetivo de obtener un modelo de soporte validado.

2.1. Premodelado de soporte de Catenaria Rígida con elementos finitos

Se realiza un modelo de elementos finitos tridimensional, empleando el software Abaqus®14, que incluye los diferentes elementos que componen el soporte y que se presentan en la Tabla 1 numerados. La tabla presenta una breve descripción de estos elementos, el material del que están fabricados, el tipo de elemento finito empleado en el modelo y el número de elementos empleados en el mallado. Estos datos se obtienen de medidas directas sobre el soporte.

Tabla 1 Propiedades de los componentes del soporte de Catenaria Rígida

Nº de pieza	Descripción	Long. (mm)	Material	Tipo de Elemento	Nº Elementos
1	Placa de anclaje (230x250x10)	-	Acero	Shell	168
2	Mástil (UPN 120)	600	Acero	Shell	19
3	Cartela '300x240x10'	-	Acero	Shell	248
4	Perfil "L" 70x70x7	1120	Acero	Shell	352
5	Varilla roscada M16	325	Acero	Wire	20
6	Barra aisladora (Ø55x5)	11250	Acero	Wire	35

La Figura 1 muestra las uniones entre los diferentes componentes del modelo de elementos finitos. Se contemplan tres tipos de uniones diferentes: "Tie", "Coupling" y "Bushing". Se emplea "Tie" para la unión entre la placa de anclaje y mástil UPN. La unión "coupling" se define restringiendo los seis grados de libertad y se emplea para la unión entre el mástil UPN y cartela, y la unión entre cartela y perfil 'L'. Para la unión de la varilla roscada con el perfil 'L' y barra aisladora se utiliza la unión "Bushing", se define su rigidez en la. Por



PONENCIA

último, como condición de contorno, el anclaje al techo de la placa de anclaje se define inicialmente empotrado en toda la superficie.

Este modelo se emplea para un estudio dinámico previo que permite obtener de forma aproximada los modos en el rango de frecuencias de interés (0 a 70 Hz). Con los resultados obtenidos se decidirán los puntos de medida en la fase experimental que se presenta a continuación.

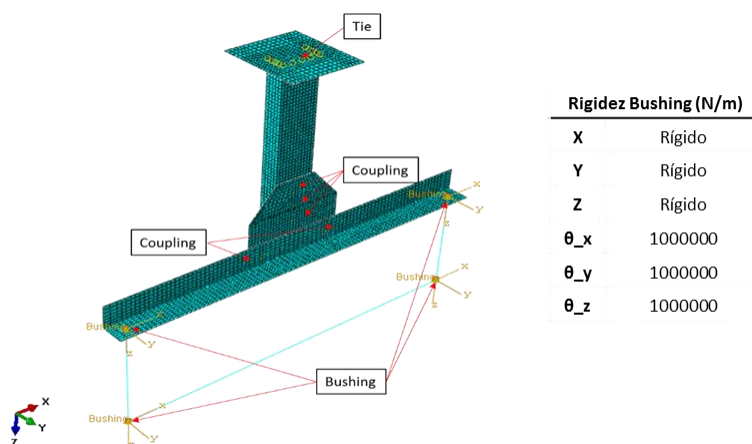


Figura 1 Unión entre elementos del soporte de Catenaria Rígida

2.2. Ensayos Modales Experimentales del soporte de Catenaria Rígida

Para conocer el comportamiento dinámico real del soporte se realizan ensayos modales experimentales. Con la ayuda de los resultados anteriores se confeccionan los ensayos, eligiendo para ello los puntos de medida y de excitación que permitan conocer el comportamiento dinámico en el rango de estudio 0 a 70 Hz.

El ensayo se realiza con el soporte instalado en su posición de trabajo. La excitación se introduce mediante un martillo de impacto conectado a una célula de carga, el cual introduce energía necesaria a la estructura para excitarla. La respuesta se mide mediante acelerómetros distribuidos por todo el soporte.

2.2.1. Selección de los puntos de medida y excitación

En la Figura 2 se muestra un esquema que recoge los puntos de medida y excitación del soporte. El ensayo se divide en tres configuraciones debido a la disponibilidad de seis acelerómetros uniaxiales. Se excita el soporte en las tres direcciones.



2.2.2. Adquisición de datos

Los componentes e instrumentación para realizar el ensayo son: el controlador de vibración (Data Physics ABAQUS), célula de carga (KISTLER 9718250), seis acelerómetros (KISTLER 8712A5M1), y software de adquisición (SignalCal 730 Dynamic Signal Analyzer)

En el software de adquisición se introducen los datos característicos de cada uno de los acelerómetros y la célula de carga. Se fija el tiempo de estabilización del sistema en 32 segundos, en un rango de frecuencia de 0-200 Hz, y con una discretización en tiempo y frecuencia de 1.956m y 32.25m respectivamente. Se comienza a registrar la respuesta de los acelerómetros ante el impulso introducido con el martillo. Se obtienen cinco impactos válidos para cada configuración de acelerómetros y en cada dirección. En la Figura 3 se muestran las señales adquiridas durante el ensayo modal del soporte de Catenaria Rígida.

2.2.3. Procesado de datos del Ensayo Modal Experimental del soporte de Catenaria Rígida

Los datos obtenidos en los ensayos modales experimentales se procesan con la ayuda del software LMS. Para ello se introducen las señales de Función de Respuesta en Frecuencia, FRF. Estas señales con sus características específicas se asocian a una geometría simplificada del soporte que permiten obtener visualmente los modos de vibración del soporte. Como resultado se obtiene el comportamiento dinámico del soporte con los parámetros de frecuencia natural, modos de vibración y amortiguamiento.

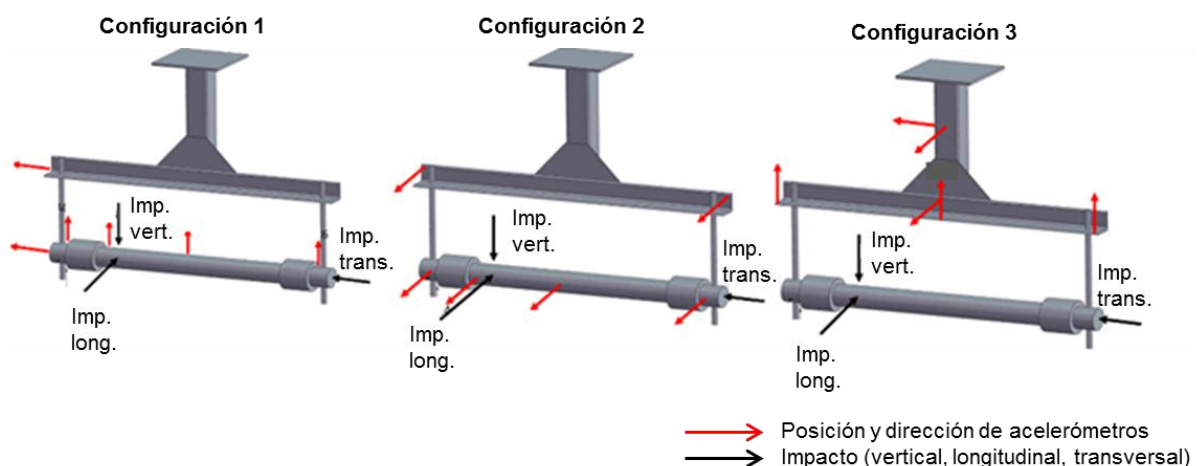
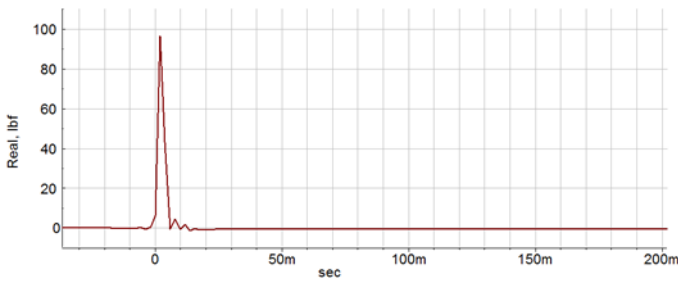


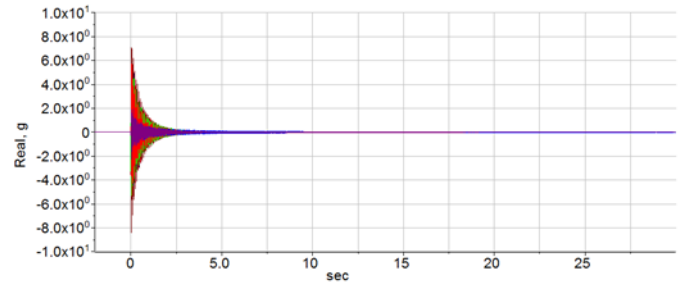
Figura 2 Ensayo modal del soporte de Catenaria Rígida. Tres configuraciones de ensayo



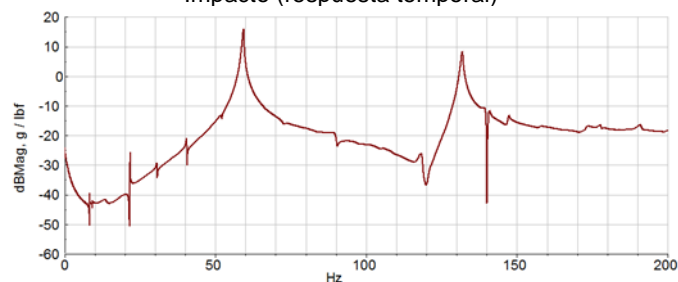
PONENCIA



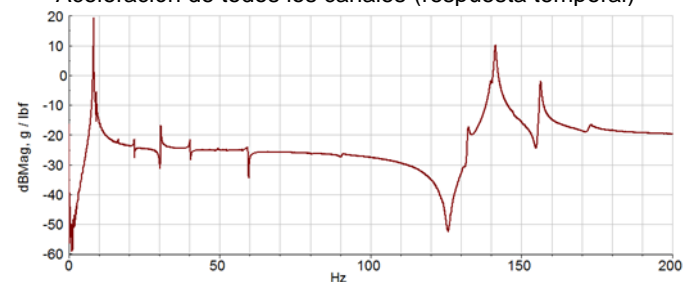
Impacto (respuesta temporal)



Aceleración de todos los canales (respuesta temporal)



Función de respuesta en frecuencia. Configuración 1, impacto vertical (respuesta en frecuencia)



Función de respuesta en frecuencia. Configuración 2, impacto longitudinal, (respuesta en frecuencia)

Figura 3 Señales recogidas durante en el ensayo modal del soporte de Catenaria Rígida

2.3. Validación del modelo de Elementos Finitos del soporte de Catenaria Rígida

Se procede a la validación de los resultados obtenidos. Se aplican técnicas de correlación teórico-experimental para garantizar que el modelo realizado mediante el Método de Elementos Finitos representa al sistema real y predice de forma fiable su comportamiento dinámico tal y como presentan los resultados de los ensayos. Para ello, se calculan los errores relativos en frecuencia, ecuación 1, y la matriz de Criterio de Confianza Modal, ecuación 2.

$$Err_{relfrec_i} = 100 \frac{f_{EFi} - f_{xi}}{f_{xi}} \quad i = 1, \dots, m \quad [1]$$

f : frecuencia EF : elementos finitos
 x : experimento m : número total de modos

$$MAC_{i,j} = \frac{(\phi_{xi}^T \phi_{EFj})^2}{(\phi_{xi}^T \phi_{xi})(\phi_{EFj}^T \phi_{EFj})} \quad i, j = 1 \dots m \quad [2]$$

ϕ : vector desplazamiento modal EF : elementos finitos
 x : experimento m : número total de modos



3. Resultados

3.1. Resultados del premodelo de Elementos finitos del soporte de Catenaria Rígida

Se realiza un estudio en frecuencia en un rango de 0 a 70 Hz para obtener el comportamiento dinámico del soporte. En la Figura 4 se recogen los modos de vibración con su frecuencia natural asociada del soporte de Catenaria Rígida.

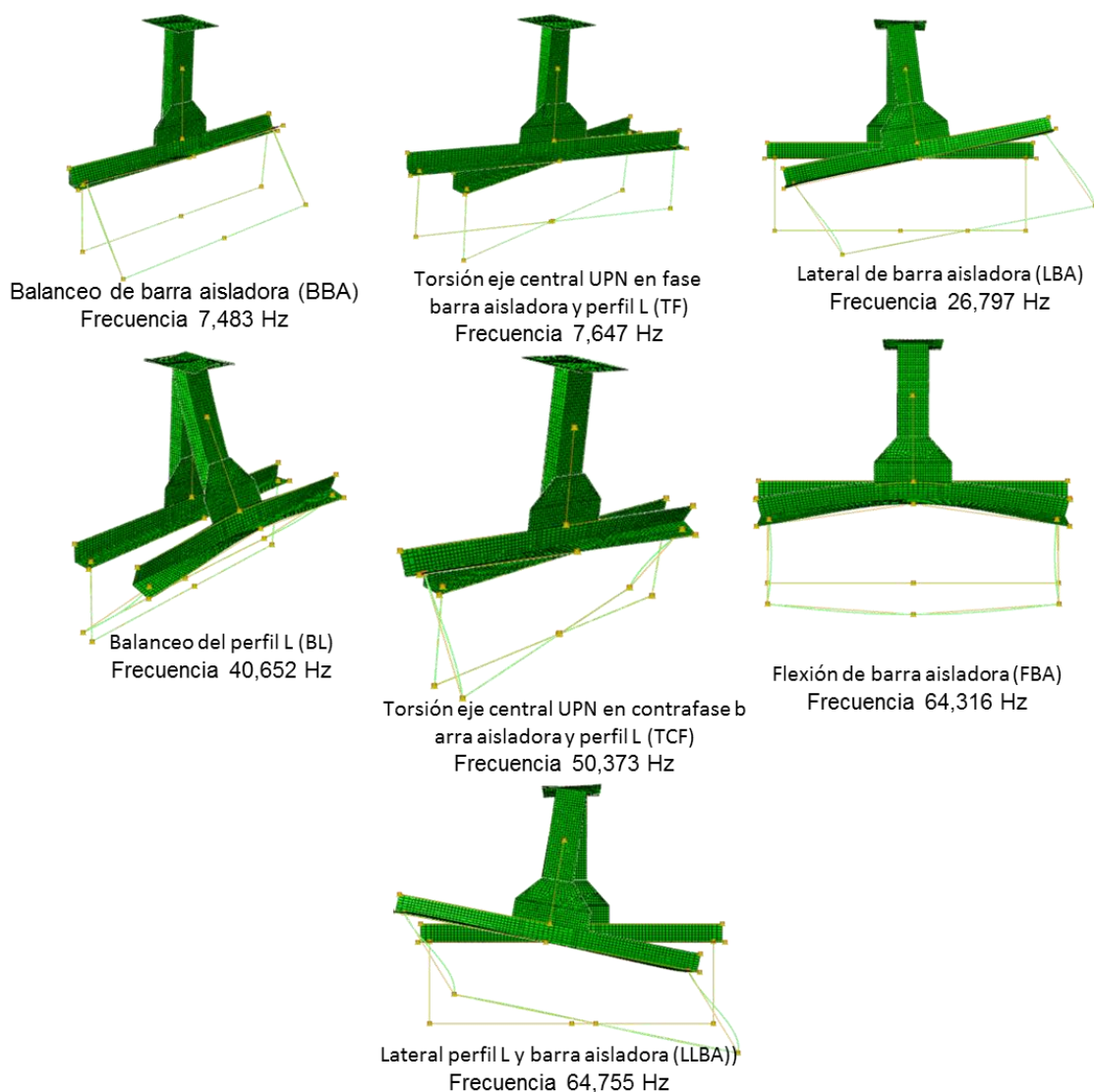


Figura 4 Modos de vibración y frecuencia asociada del soporte de Catenaria Rígida



3.2. Resultados de ensayos modales del soporte de Catenaria Rígida

En la Figura 5 se recogen los resultados obtenidos de los ensayos: modos de vibración, frecuencia y amortiguamiento. (Amort: amortiguamiento).

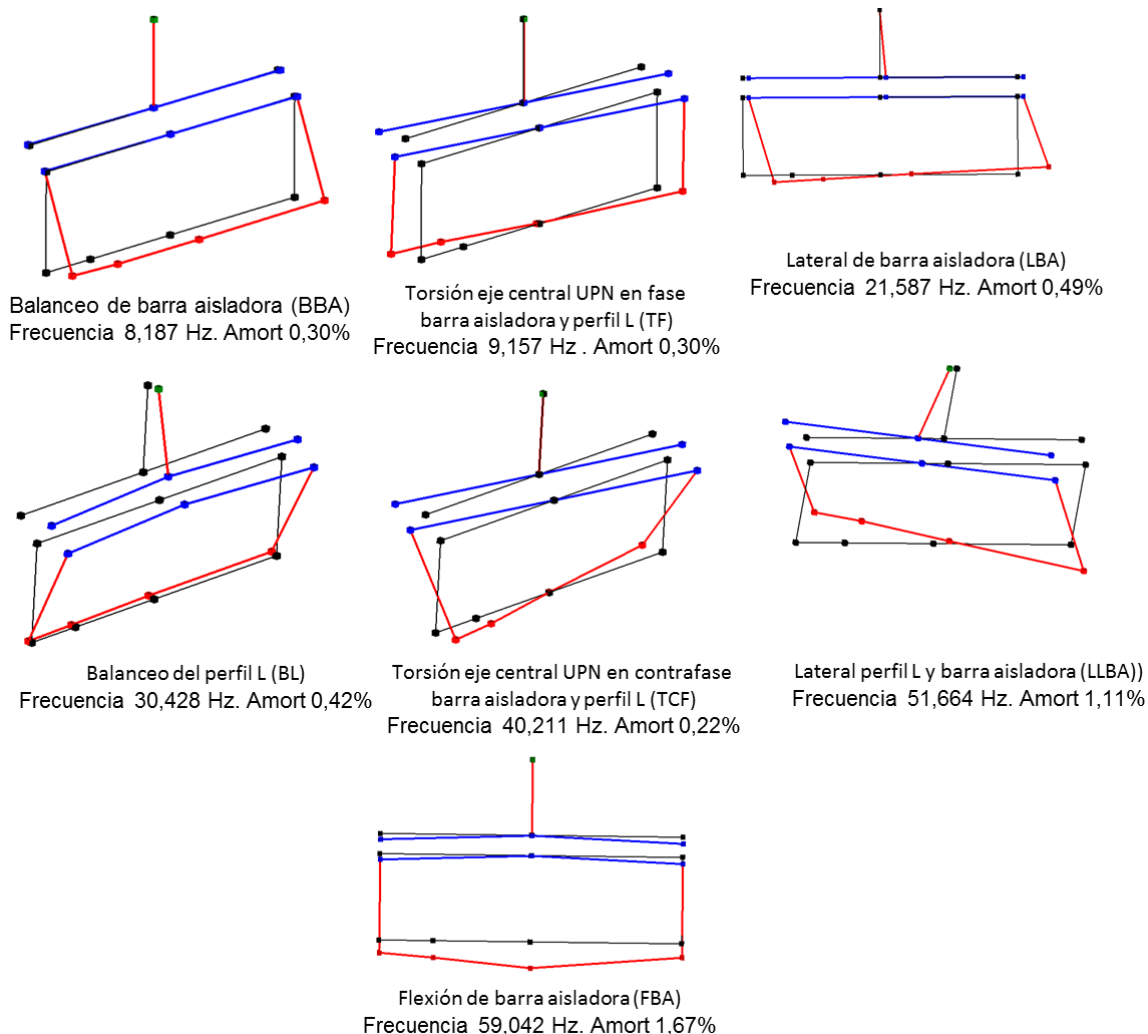


Figura 5 Ensayo modal del soporte. Modos de vibración y frecuencia

3.3. Resultados de la validación del modelo de Elementos Finitos del soporte de Catenaria Rígida

El premodelo de elementos finitos inicial, descrito en 2.1 se actualiza a partir de los resultados obtenidos de los ensayos. Los ajustes han sido:



PONENCIA

1. Modificación de la condición de contorno de anclaje al techo de la placa de anclaje. Inicialmente se modeló con toda su superficie empotrada. Se actualiza la condición de empotramiento y se define en los cuatro puntos reales de anclaje al techo. Los cuatro puntos forman un rectángulo de dimensiones 180x130 mm centrado en la placa de anclaje.
2. Se modifica la unión "coupling". Inicialmente se definió esta unión entre nodos de cada una de las componentes que se encuentran unidas entre sí mediante uniones atornilladas, definiendo un nodo como 'master' y otro como 'slave' compartiendo este último los seis grados de libertad respecto al anterior. Se modifica la unión, manteniendo los seis grados de libertad, pero se tiene en cuenta el área de influencia de las uniones atornilladas entre componentes.
3. Ajuste de 'bushing' en rigidez de giro en la dirección 'x' y 'z'. Inicialmente la rigidez de giro en 'x' y 'z' era de 100000 N/m, en el modelo actualizado pasa a ser 10000 N/m. El resto de parámetros se mantienen iguales.

Tras la actualización del modelo se obtienen nuevamente los modos de vibración con su frecuencia natural asociada en un rango de frecuencia de 0 a 70 Hz. En la Tabla 2 se recogen los resultados obtenidos de ensayos, del premodelado del soporte y del modelo actualizado, así como el error en frecuencia del premodelo y modelo actualizado cometido frente a resultados de ensayos. Finalmente se recogen en la Tabla 3 la Matriz de Criterio de Confianza modal (MAC) del modelo de Elementos Finitos actualizado.

Tabla 2 Resultados del comportamiento dinámico del soporte de Catenaria Rígida

Modo	Errores en frecuencia				
	Ensayo	Premodelado		Modelo actualizado	
	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Error (%)	Frecuencia (Hz)	Error (%)
BBA	8.18	7.48	8.59	7.65	6.47
TF	9.15	7.64	16.49	8.36	8.66
LBA	21.58	26.79	24.13	21.58	0.01
BL	30.42	40.65	33.60	29.52	2.96
TCF	40.21	50.37	25.27	42.71	6.23
FBA	51.66	64.75	25.33	51.69	0.06
LLBA	59.04	64.31	8.93	61.24	3.73

Tabla 3 Criterio de Confianza Modal (MAC) del modelo de Elementos Finitos

Ensayo/MEF	MAC						
	BBA	TF	LBA	BL	TCF	LLBA	FBA
BBA	0,99	0,01	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00
TF	0,05	0,99	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00
LBA	0,00	0,00	0,76	0,00	0,02	0,00	0,00
BL	0,02	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00
TCF	0,02	0,00	0,01	0,00	0,93	0,00	0,00
LLBA	0,00	0,00	0,14	0,00	0,00	0,93	0,04
FBA	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,80



4. Discusión

En este trabajo se presenta el modelado con elementos finitos de un soporte de anclaje a techo en catenaria rígida y su validación dinámica a partir de los resultados de ensayos modales experimentales. El prototipo del soporte estudiado es la misma tipología empleada en la red de los túneles de cercanías de Madrid, entre las paradas de Sol y Nuevos Ministerios. La validación presenta errores relativos en frecuencias menores de 8.7 % y un error medio de 1.26 % en los modos de mayor influencia en la respuesta dinámica bajo las condiciones de trabajo del soporte (modos LBA, LLBA y FBA). Además, las deformadas modales del modelo actualizado presentan una similitud media del 91.3 % respecto a ensayos. Los resultados indican la validez del modelo en el rango de frecuencias de 0 a 70 Hz. Este modelo validado es una herramienta potencialmente útil, sus aplicaciones son amplias, ya que se pueden hacer estudios diversos y obtener resultados fiables. En concreto, este modelo permitirá identificar la rigidez que presenta el soporte dependiendo del punto de anclaje entre el perfil de catenaria y a la barra aisladora del soporte, lo cual, formará parte de un modelo de cantón completo, para el estudio en mayor profundidad de la catenaria rígida.

Agradecimientos

Los autores agradecen el soporte recibido por parte de Adif en el Proyecto Carima (Nº Contrato: 3.15/49570.003.)

Referencias

- [1] J. Pombo, J. Ambrosio. Influence of pantograph suspension characteristics on the contact quality with the catenary for high speed trains. *Computers and Structures* 2012; 110-111, 32-42.
- [2] J. Pombo, J. Ambrosio. Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains. *Computers and Structures* 2013. 124, 88-101.
- [3] Giuseppe Bucca, Andrea Collina. Electromechanical interaction between carbon-based pantograph strip and copper contact wire: A heuristic wear model. *Tribology International* 2015, 92, 47-56.
- [4] Yong Hyeon Cho. Numerical simulation of the dynamic responses of railway overhead contact lines to a moving pantograph, considering a nonlinear dropper. *Journal of Sound and Vibration* 2008; 315, 433-454.
- [5] Andrea Collina, Stefano Bruni. Numerical Simulation of Pantograph-Overhead Equipment Interaction. *Vehicle System Dynamics* 2010; 38:4, 261-291.
- [6] Marco Bocciolone, Giuseppe Bucca, Andrea Collina, Lorenzo Cornolli. Pantograph–catenary monitoring by mean so fibre Bragg grating sensors: Results from tests in an underground line. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2013; 41, 226-238
- [7] A. Facchinetti, S. Bruni. Hardware-in-the-loop hybrid simulation of pantograph–catenary interaction. *Journal of Sound and Vibration* 2012; 331, 2783-2797
- [8] G. Diana, F. Fossati, F. Resta. High Speed Railway: Collecting Pantographs Active Control and Overhead Lines Diagnostic Solutions. *Vehicle System Dynamics* 2010; 30:1, 69-84.
- [9] C. Vera, B. Suarez, J. Paulin, P. Rodríguez. Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of a new conductor rail. *Vehicle Systems Dynamics* 2007; 44:8, 595-614.
- [10] A. Bautista, J. Montesinos, P. Pintado. Dynamic interaction between pantograph and rigid overhead lines using a coupled FEM — multibody procedure. *Mechanism and Machine Theory* 2016; 97, 100-111