

## SIMULACION DE GENERACIÓN Y PROPAGACION DE VIBRACIONES EN ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

REFERENCIA PACS: 43.40.At ESTUDIOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS DE SISTEMAS VIBRATORIOS

Gonzalez Ganso, José Andrés<sup>1</sup>; Bragado Pérez, Beatriz<sup>2</sup>; Cesteros Morante, Beatriz<sup>3</sup>; Morcillo Sánchez, Miguel Ángel<sup>4</sup>; Hidalgo Otamendi, Antonio<sup>5</sup>; Hernandez Martín, Alberto<sup>6</sup>  
Fundación CIDAUT<sup>1, 2, 3 y 4</sup>; CECOR<sup>5 y 6</sup>

Parque Tecnológico de Boecillo

Boecillo, Valladolid

Tel: 983 54 80 35<sup>1, 2, 3 y 4</sup>; 902 910 504<sup>5 y 6</sup>

Fax: 983 54 80 62<sup>1, 2, 3 y 4</sup>; 902 910 504<sup>5 y 6</sup>

[josgon@cidaut.es](mailto:josgong@cidaut.es)<sup>1</sup>; [beabra@cidaut.es](mailto:beabra@cidaut.es)<sup>2</sup>; [beaces@cidaut.es](mailto:beaces@cidaut.es)<sup>3</sup>; [migmor@cidaut.es](mailto:migmor@cidaut.es)<sup>4</sup>;  
[antoniohidalgo@cecorsl.com](mailto:antoniohidalgo@cecorsl.com)<sup>5</sup>; [albertohernandez@cecorsl.com](mailto:albertohernandez@cecorsl.com)<sup>6</sup>

### ABSTRACT

In recent years the high-speed rail has increased. The speed and mass of these trains, coupled with the proximity to buildings, creates a vibrational pollution problem within the housing. This problem must be addressed from the design stage of the high-speed line.

Usually the vibration generation is predicted by uncoupled analytical models based on multibody theory.

This paper presents a methodology for calculating coupled simultaneous generation and propagation, from the rail to the building in a single finite element model.

### RESUMEN

En los últimos años ha proliferado la alta velocidad ferroviaria. La velocidad y la masa de estos trenes, unido a la proximidad a las edificaciones, hacen que la contaminación por vibraciones en el interior de las viviendas sea un problema que hay que abordar desde la etapa de proyecto de la línea.

Habitualmente la generación vibratoria se predecía mediante modelos analíticos desacoplados basados en la teoría de multicuerpos.

Se presenta una metodología de cálculo acoplado simultáneo de la generación y la propagación, que reproduce desde el carril hasta el edificio en un solo modelo de elementos finitos.

## INTRODUCCION

La Alta Velocidad Ferroviaria ha sido una de las principales apuestas de los presupuestos de infraestructuras en España en los últimos años. En poco tiempo España ha pasado a ocupar uno de los principales puestos en kilómetros de líneas ferroviarias para este tipo de uso, y aún se encuentra en proyecto y construcción un gran número de nuevos kilómetros de trazado.

Debido a que el ancho de vía y las características constructivas de la misma deben ser especiales para este tipo de ferrocarril, ha sido necesaria la construcción de nuevos trazados de línea ferroviaria entre las ciudades alternativos a los antiguos trazados de vía convencional. El trazado de estas nuevas líneas se ha realizado en todos los casos procurando la minimización del impacto ambiental sobre el entorno, unido a una minimización de los problemas derivados de la contaminación por ruido y vibraciones en el entorno de las nuevas vías. Sin embargo ha sido inevitable evitar el paso cercano a zonas habitadas, especialmente en la entrada a las ciudades, donde se encuentran las estaciones. En muchos casos este acceso se ha ejecutado soterrado, es decir, bajo tierra, con la construcción de grandes túneles bajo las viviendas.

En todos los casos y en la fase de proyecto es obligada la realización de Estudios Acústicos y Vibratorios que predicen y evitan las molestias por este tipo de contaminación en el entorno. El objetivo principal del estudio vibratorio es la definición de las soluciones aislantes vibratorias que se deberían introducir, en el caso de que fuera necesario, para que los niveles vibratorios finales estén por debajo de los valores límite permitidos de los índices de vibraciones de la normativa aplicable en cada caso.

La metodología de este tipo de estudios consiste en primer lugar en elegir los puntos del trazado, por donde transcurrirá la Línea de Alta Velocidad, correspondientes a las edificaciones previsiblemente más sensibles desde el punto de vista vibratorio sobre las que se tiene que realizar tanto las medidas del estado vibratorio actual, como las predicciones del nivel vibratorio una vez construida la línea.

La medida de los niveles de vibración previos, debido a la contribución de fuentes de diferente naturaleza, permite cuantificar si existirá un incremento apreciable en el futuro de los niveles existentes por la puesta en funcionamiento de la nueva infraestructura ferroviaria.

Posteriormente se calculan mediante modelos numéricos de elementos finitos los niveles vibratorios que previsiblemente existirán en las edificaciones de la zona en la fase de explotación, los cuales son función de los tipos de sistemas de vías (vía sobre balasto o vía en placa de hormigón), de las composiciones y tipos de trenes que circularán y de sus velocidades.

En aquellos puntos del trazado que previsiblemente tendrían valores superiores o muy próximos al valor permitido según la legislación aplicable en cada caso, se escogen los sistemas de aislamiento vibratorio para la atenuación de las vibraciones. Estos sistemas se deben verificar mediante el modelo de cálculo para obtener los niveles vibratorios finales tras implementar las soluciones escogidas en dichos puntos problemáticos.

## LA LEGISLACIÓN SOBRE VIBRACIONES AMBIENTALES

En España la Ley 37/2003 del Ruido no solo trata la contaminación por ruido, sino que incluye también la contaminación causada por Vibraciones. Para este tipo de emisiones limita los niveles máximos admisibles en las edificaciones, según el uso de estas.

Además numerosas legislaciones Autonómicas e incluso ordenanzas Municipales anteriores a la Ley de Ruido estatal ya tenían en cuenta este tipo de contaminación.

### Indicadores del Nivel de Vibración

Los indicadores de vibración empleados en la evaluación de las vibraciones son el índice de percepción de vibraciones K [1] y el índice  $L_{aw}$  [2].

El índice K es un parámetro subjetivo experimental que permite evaluar la sensación frente a las vibraciones de los seres humanos, mediante la medida o la predicción de la aceleración de la vibración en el rango de frecuencias comprendido entre 1 y 80 Hz, al cual se la asigna un índice K, según unas curvas de similar percepción a las vibraciones, llamadas curvas K. En España este nivel se encuentra en legislaciones Autonómicas anteriores a la Ley de Ruido, pero está siendo sustituida en las revisiones legislativas bajo el amparo de la Ley de Ruido de 2003

En la Tabla 1 se muestran unos valores típicos máximos en periodo día y noche en función del uso específico del edificio en cuestión.

Uso	Valores Límite del Índice K (dB)	
	Día	Noche
Residencial	2	1,4
Oficinas	4	4
Comercial	8	8
Sanitario	1	1

Tabla 1. Valores límite del índice K

El índice  $L_{aw}$  [2] se aplica para evaluar la molestia y los niveles de vibración máximos en el interior de edificios. Además de analizar elementos aislados en régimen transitorio se contemplan valores equivalentes en períodos de tiempo por emisiones estacionarias.

En la Tabla 2 se muestran los valores máximos admisibles según el Real Decreto 1367/2007, que complementa la Ley de Ruido 37/2003. En general este coeficiente es más restrictivo que el anterior de las curvas K.

Uso del edificio	Valores Límite del Índice $L_{aw}$ (dB)
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

Tabla 2. Valores máximos de  $L_{aw}$  de acuerdo con el Real Decreto 1367/2007

### MEDICIONES VIBRATORIAS PREVIAS

Las mediciones de vibraciones en el entorno de la vía tienen por objeto obtener los valores de vibración previos a la construcción de la nueva línea, para poder compararlos con los valores máximos admisibles de vibración que establece la legislación aplicable al estudio.

En primer lugar se realiza una selección de los puntos más sensibles del trazado, que previsiblemente serán aquellos en los que la traza de la nueva línea pasa más cerca de construcciones habitadas

Las medidas en cada uno de los puntos se deben realizar en horario de tarde-noche y procurando reflejar las situaciones más desfavorables de la zona, si bien se debe evitar que coincida con trabajos de obras u otro tipo de evento aislado y no representativo de una situación estable de la zona.

La medida se realiza mediante acelerómetros piezoeléctricos triaxiales. Es importante la valoración simultánea de la vibración en las tres direcciones, ya que no necesariamente el valor máximo se produce en el eje vertical, sino que en muchas ocasiones la máxima aceleración se da en la dirección de propagación de las vibraciones. La colocación del acelerómetro se debe hacer a través de una picas metálicas, con al menos 40 cm. de longitud clavadas en el suelo y sobre las que se coloca el acelerómetro.



Figura 1. Mediciones del nivel vibratorio actual antes de la nueva infraestructura

Además de las mediciones encaminadas a la caracterización de la situación vibratoria previa de la zona de estudio, se realizan otro tipo de mediciones encaminadas a la caracterización de la transmisión vibratoria del terreno. Esta caracterización complementa a los datos obtenidos por los estudios geológicos, y consisten en medir la transmisión de pulsos vibratorios transmitidos por impactos controlados, que pueden ser provocados mediante mazas, masas en caída libre o incluso mediante pequeñas explosiones controladas. Estos dispositivos de emisión de vibraciones pueden estar instrumentados para el control de la energía introducida al terreno.



Figura 2. Mediciones para la caracterización de las propiedades de transmisión del terreno

### PREDICCIÓN DE NIVELES VIBRATORIOS GENERADOS POR LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD

La metodología del estudio se basa en el cálculo de la propagación de la energía vibratoria desde el tren hasta el usuario teniendo en cuenta la excitación de emisor, que determina la energía que el tren comunica a la vía, la plataforma (vía superficial o túnel) que caracteriza el comportamiento vibratorio de la superestructura, el terreno de propagación que determina la atenuación de la vibración con la distancia y las viviendas objeto del estudio.

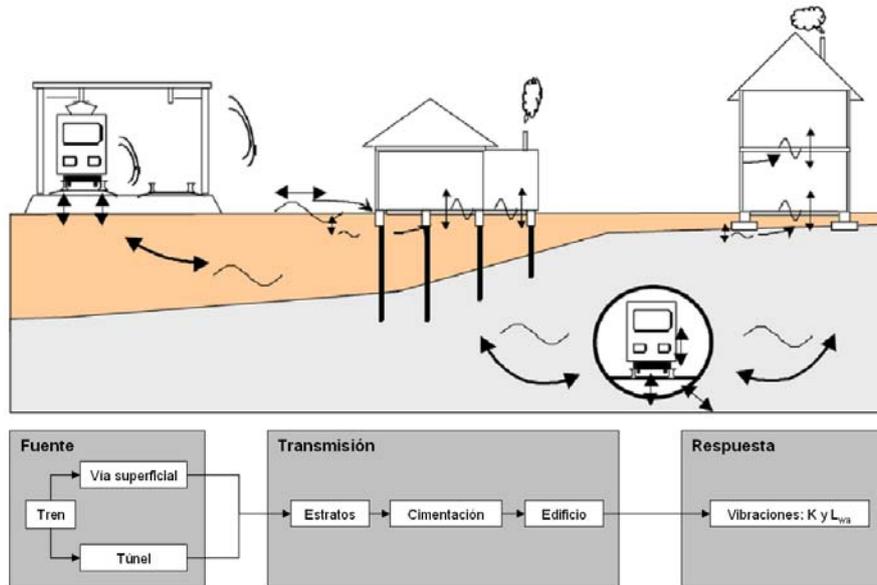


Figura 3. Proceso de propagación de la energía vibratoria

### Emisor

La excitación vibratoria de la vía es debida al paso del tren, que dependerá del tipo de vehículos que circulan por la vía, su composición y su velocidad máxima de paso. Estas características son función del tipo de tren y del punto del trazado.

La aplicación de estas cargas en los modelos de elementos finitos se realiza transformando las distribuciones estáticas de pesos por eje a una sucesión de cargas puntuales en movimiento con la velocidad de paso del tren, en el dominio de la frecuencia. En la figura 4 se muestra la disposición de ejes y distribución de masas para dos casos particulares.

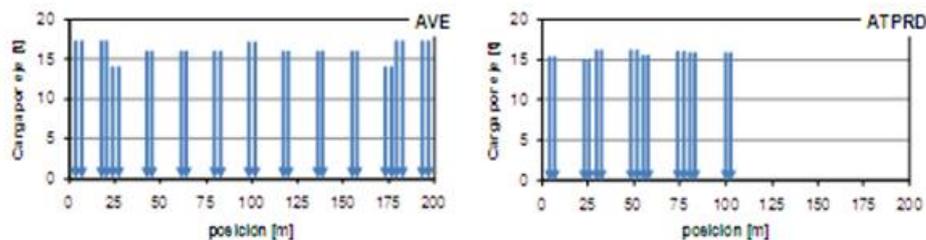


Figura 4. Disposición de ejes y distribución de masas

### Transmisión

El tipo de vía y de terreno determina la transmisión de la energía vibratoria entre el vehículo y la edificación.

Los tipos de vía pueden dividirse en primer lugar por vía en superficie y vía en túnel. En cada uno de ellos puede encontrarse una muy variada tipología de secciones de los que se puede ver una ejemplo en las Figuras 5 y 6 respectivamente. Esta configuración particular para cada punto del estudio debe ser reflejada en los modelos de propagación específicos a desarrollar.

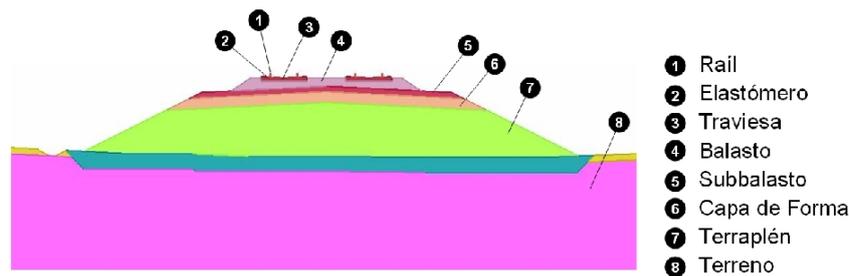


Figura 5. Sección de vía en superficie

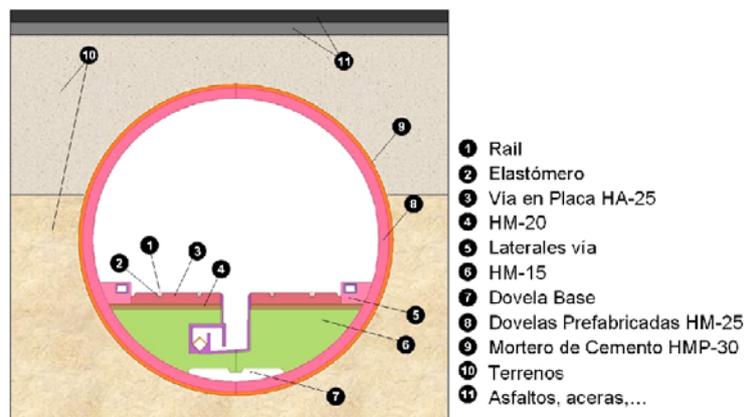


Figura 6. Sección de vía en túnel

### El terreno

El terreno transmite la energía vibratoria entre la vía y la base del edificio. En los modelos de elementos finitos se tomará en consideración la tipología del terreno que es función del tramo, los estratos, la distancia y/o profundidad entre la vía y la edificación. Los datos del terreno necesarios para realizar los cálculos se obtienen de los estudios geotécnicos de la zona, además de la caracterización vibratoria del terreno realizada anteriormente.

### Modelos de elementos finitos

Los modelos de elementos finitos utilizados para el cálculo de los niveles de vibración combinan para cada punto el tipo de vía (en superficie, túnel, viaducto) con los estratos de terreno correspondientes.

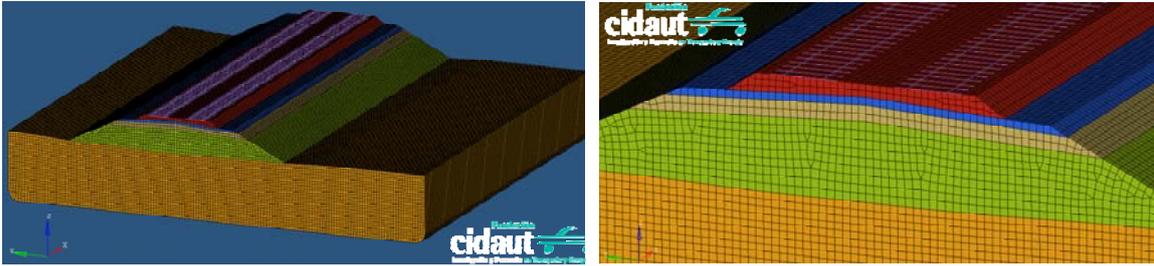


Figura 7. Modelo de elementos finitos para vía superficial

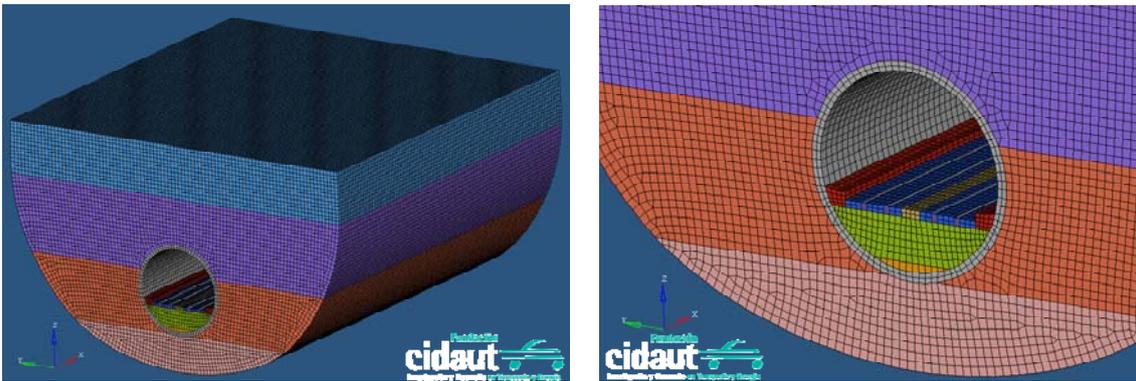


Figura 8. Modelo de elementos finitos de túnel

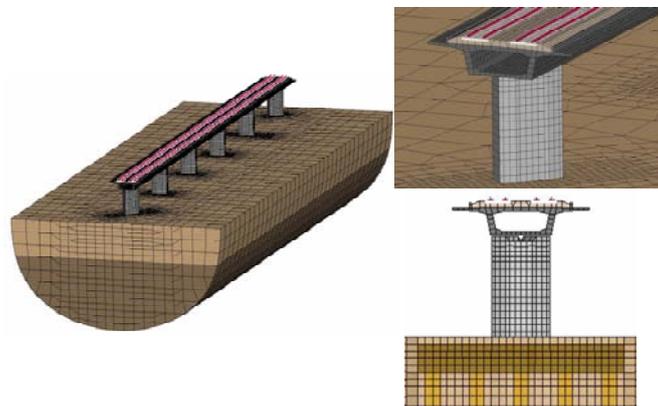


Figura 9. Modelo de elementos finitos de viaducto

Los raíles y traviesas (en el caso de vía sobre balasto) son modelados con elementos de tipo viga y el resto de componentes (balasto, terraplén, terreno, hormigón...) mediante elementos sólidos. Todos los cálculos se realizan en el dominio de la frecuencia, utilizando el método directo.

### Receptor

Las vibraciones transmitidas por el terreno debidas al paso de los trenes se evalúan finalmente en los edificios donde son susceptibles de ser percibidas por las personas. Los niveles de vibración en un edificio dependen de la energía de vibración que llega a sus cimientos, el acoplamiento de los cimientos del edificio al terreno, y la propagación de la vibración a través

de la construcción. Cuando las vibraciones del terreno excitan los cimientos del edificio, éste comienza a moverse y las ondas de vibración se propagan por toda la estructura. En general, el acoplamiento entre el terreno y los cimientos produce una reducción en los niveles de vibración que depende de la masa y la rigidez del cimiento, cuanto mayor sea la masa del cimiento, menor es la respuesta.

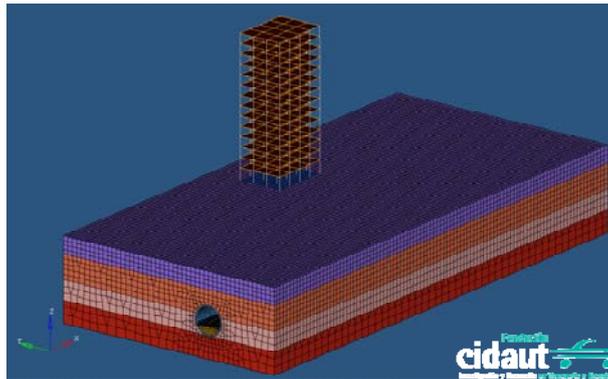


Figura 10. Modelo de elemento finitos de una vía en túnel que incluye el modelado de un edificio

### Resultados de los niveles de vibración

Los resultados de los cálculos de los modelos numéricos de elementos finitos consisten en los niveles de vibración previsible, índice de vibración  $L_{aw}$  y  $K$  obtenidos en cada uno de los casos, para los puntos de interés de la Línea de Alta Velocidad. En caso de no cumplir con los límites establecidos se deberán diseñar sistemas aislantes de vibraciones adecuados a cada caso que limiten la transmisión de vibraciones.

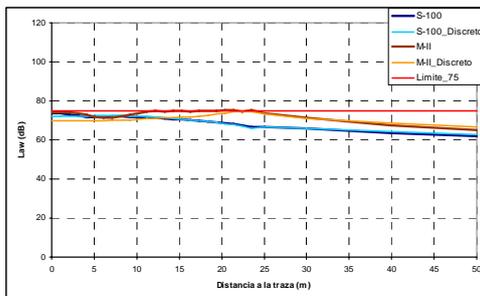


Figura 11. Curvas  $L_{wa}$  (dB)

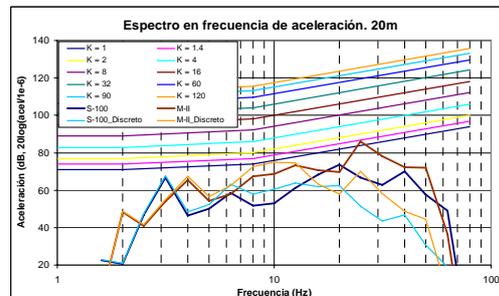


Figura 12. Curvas  $K$  (dB)

### BIBLIOGRAFIA

- [1] - ISO 2631-2:1989; "Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)"
- [2] - ISO 2631-2:2003; "Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)"