

## METODOLOGÍAS DE PREDICCIÓN PARA PROYECTOS DE PROTECCIÓN ACÚSTICA Y VIBRATORIA EN NUEVAS LÍNEAS DE FERROCARRIL

PACS: 43.50.Lj

Alarcón Rovira, Gabriel; Solé Bosquet, Jaume; Sánchez Venegas, Ángel  
SENER, Ingeniería y Sistemas, S.A.  
Provença, 392  
08025 Barcelona  
Tel: 932 283 355  
Fax: 932 283 322  
E-mail: gabriel.alarcon@sener.es

### ABSTRACT

The application of the Ley Española del Ruido 37/2003, which transposes the Directive 2002/49/EC, and of the laws approved by the autonomous communities is leading (and it will do more in the next future) to the need of specific noise and vibration protection projects for the new infrastructures. Moreover, the profusion of new projects in whole Spain (AVE, high-speed, subways, etc.) and the foreseen increase of the rail-cargo trade emphasize this situation.

This article describes the methodology for the description and prediction, as well as for protection projects, of noise and vibration pollution developed by SENER. These techniques have already been successfully used for the last two years in a significant number of actual projects, after the appropriated test and updating in previous works.

### RESUMEN

La aplicación de la Ley Española del Ruido 37/2003, que transpone la Directiva Europea 2002/49/EC, y de las leyes aprobadas por las distintas comunidades autónomas está conduciendo (y lo hará más en un futuro) a la necesidad de redactar proyectos específicos de protección contra el ruido y las vibraciones para las nuevas infraestructuras ferroviarias. Además, la profusión de nuevos proyectos en España (AVE, velocidad alta, metropolitanos, tranvías, etc.) y el incremento previsto del tráfico ferroviario de mercancías acentúan esta situación.

Este artículo describe la metodología de trabajo para la descripción y predicción, y para proyectos de protección, de la contaminación acústica y vibratoria desarrollada por SENER. Estas técnicas ya han sido aplicadas con éxito durante los últimos 2 años en diferentes proyectos reales, tras la oportuna puesta a punto en trabajos anteriores.

### INTRODUCCIÓN

Para la realización de los trabajos en proyectos de protección acústica y vibratoria, es necesario desarrollar las siguientes actividades: Análisis de la normativa aplicable, Análisis de la zona objeto de estudio, Descripción (en cuanto a inmisión a ruido y vibraciones) de la

situación actual, Análisis de las características constructivas proyectadas y Predicción de los niveles de inmisión esperables.

Los siguientes capítulos describen la metodología propuesta por SENER, que ya está siendo adoptada en múltiples proyectos con excelentes resultados: Nuevo trazado A.V.E. Figueres-Perpinyà (lado español), remodelación de vías ferroviarias La Torrassa-Sants, integración de la alta velocidad en la ciudad de Valencia, etc.

## ANÁLISIS DE LA NORMATIVA APLICABLE

Los elementos normativos comunes de aplicación en los proyectos españoles son [1-4]:

- Ley Española 37/2003 del Ruido, promulgada el 17 de noviembre de 2003 y publicada en el B.O.E. del 18 de noviembre de 2003. El reglamento de la cual se encuentra pendiente de aprobación. Varias comunidades autónomas recurrieron la Ley Española.
- Ley de ruido de la comunidad autónoma correspondiente, aunque todavía no se han sido elaboradas por todas las comunidades autónomas y algunas de las existentes no son técnicamente compatibles con la ley española por ser anteriores a ésta.
- Ordenanzas municipales del ayuntamiento o ayuntamientos afectados.

Adicionalmente a lo anterior, deben considerarse también los requerimientos acústicos (pocas veces vibratorios) efectuados en la Declaración de Impacto Ambiental (D.I.A.) para el tramo o subtramo objeto de estudio. La normativa y requisitos aplicables difieren ocasionalmente en cuanto a las magnitudes a evaluar, y a las responsabilidades por inmisión acústica. Es, por tanto, necesario establecer una completa comparativa entre la legislación aplicable a cada caso. Los conceptos más relevantes que recogen estas leyes suelen ser los límites de inmisión máximos (dependientes de la zonificación adoptada y de los horarios) y lo relacionado con la contaminación generada durante las obras (maquinaria utilizada, protecciones, horarios, detonaciones, etc.).

Destaca en estas legislaciones la poca extensión e importancia concedida a los apartados dedicados a la contaminación por vibraciones, en contraste con la cada vez mayor sensibilidad ciudadana con este fenómeno. El parámetro especificado es en ocasiones el índice de percepción vibratoria K y en otras el  $L_{aw}$ , con aplicación de ponderaciones espectrales de 1-80 Hz. Es frecuente que deban asegurarse estos límites en el interior de las viviendas.

## ANÁLISIS DE LA ZONA OBJETO DE ESTUDIO

Es necesario determinar un conjunto de receptores tipo sobre los cuales efectuar medidas de niveles de inmisión actuales (ver figura 1).

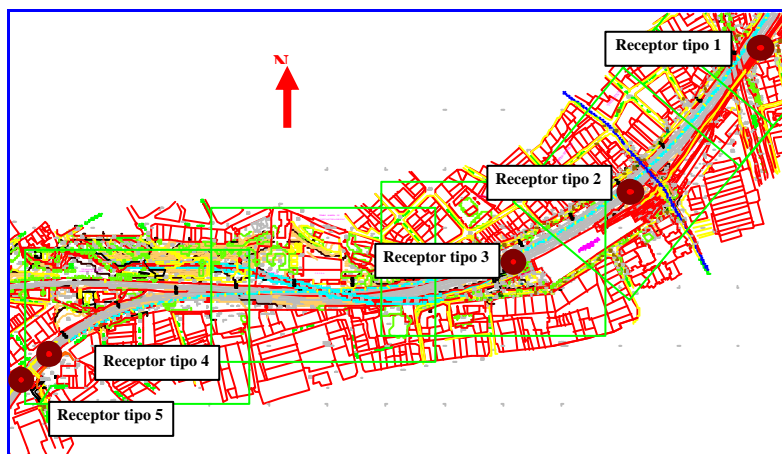


Figura 1: Ejemplo de la elección de receptores tipo en una zona

Estos receptores tipo se deben seleccionar entre las áreas más críticas desde el punto de vista acústico y vibratorio, prestando especial importancia a la presencia de hospitales u otras instalaciones de especial sensibilidad en la zona afectada. La selección intenta que se cubran las zonas con mayor densidad de viviendas cercanas, o bien con viviendas que por su gran proximidad resulten particularmente afectadas. En el caso de las vibraciones, se seleccionan edificios tipo en cuanto a su comportamiento vibratorio: tipo de estructura, forjados, época de construcción, etc. Y la caracterización geológica (suelo-tipo). Además de la posición en plano de los receptores escogidos, se incluyen secciones del alzado y documentación fotográfica sobre los mismos (ver figura 2).

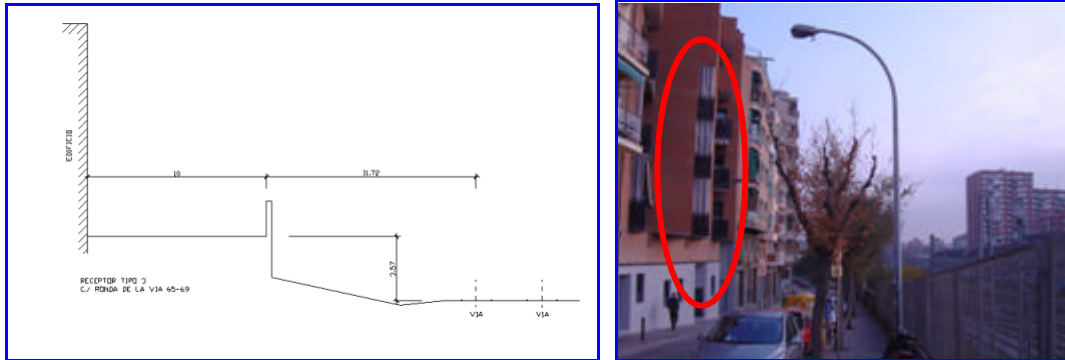


Figura 2: Ejemplo de sección transversal y fotografía en un receptor tipo

## DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El primer paso para la determinación de la exposición actual a ruido y vibraciones consiste en la “asignación de vías”. Es decir, la recolección de los datos suficientes para determinar cuántos trenes circulan en los distintos tramos horarios por cada una de las vías existentes en cada receptor, discriminando igualmente entre tipos de tren.

### Mediciones de ruido

Se realizan dos operaciones fundamentales:

- Toma de medidas: Medida del nivel de presión sonora a 2 metros de la fachada y 1,5 metros de altura durante el paso de tren. Durante el ensayo se registra asimismo el nivel de ruido de fondo propio de cada receptor tipo en ausencia de circulación de trenes. Además, se posicionan dos micrófonos paralelos a la vía y a una cierta distancia de tal forma que permitan determinar la velocidad de paso en cada punto.
- Procesado de los datos: realización de los cálculos pertinentes para determinar el nivel de presión sonora equivalente ponderado A, para los distintos tramos horarios, en cada uno de los receptores tipo seleccionados.

Los resultados de las mediciones se expresan como un binomio formado por el nivel de presión sonora equivalente durante el intervalo del paso del tren, y el tiempo de este paso. En cada registro de presión sonora-tiempo se localiza la meseta producida por el paso del tren, se determina el tiempo de paso y se calcula el nivel de presión sonora equivalente para ese intervalo. Dicho nivel equivalente se describe como el valor de presión sonora que, manteniéndose constante durante el intervalo de paso del tren, proporcionaría igual energía que el perfil provocado por el paso del tren. La figura 3 ilustra este concepto.

Debe observarse que la elección del intervalo de paso de tren no requiere excesiva precisión ya que, a un intervalo mayor de tiempo, se obtendrá un nivel equivalente menor, pero este nivel perdurará más tiempo y viceversa. Así, la energía contenida en ambos casos resulta muy parecida para pequeñas variaciones del intervalo de paso de tren. La toma de medidas redundantes en un mismo punto, entendiéndose dos o más registros para un mismo tipo de tren pasando por la misma vía, permite una determinación más precisa y fiable de estos datos [5].

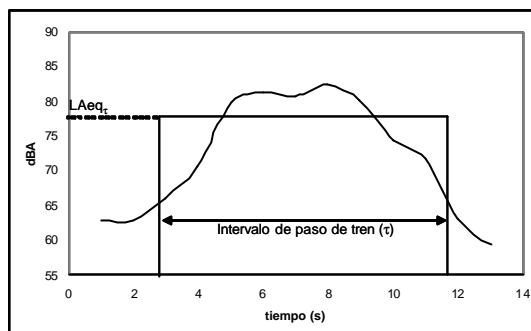


Figura 3: Determinación del nivel equivalente de ruido al paso del tren

A partir de estos datos y de la “asignación de vías”, se calculan los niveles equivalentes en cada receptor tipo. Conociendo cuántos trenes de cada tipo circulan por cada vía y el intervalo de paso de cada uno de ellos, se calculan durante cuántos segundos los receptores están expuestos a los niveles equivalentes de cada tren y vía, por tramos horarios. A los segmentos de tiempo de la franja horaria no afectados por paso de trenes se les asigna el nivel de ruido de fondo tomado durante las medidas. A partir de estos datos, se establece el nivel sonoro equivalente diurno y nocturno en dBA, según especifica la legislación aplicable.

#### Mediciones de vibraciones

Se procede a realizar un conjunto de mediciones de campo en los receptores tipo seleccionados, de acuerdo con la siguiente metodología:

- Se dispone un punto de medición lo más cercano posible a la vía y otro punto a pie del edificio receptor tipo estudiado.
- Para caracterizar el comportamiento del terreno, se realizan varias medidas a distintas distancias en la dirección perpendicular a las vías.
- Cuando el estudio forma parte del proyecto constructivo, se efectúan medidas tanto en la base del edificio como en distintas plantas del mismo, a fin de cuantificar la amplificación vibratoria introducida por el edificio. En los proyectos básicos se opta por inferir el comportamiento de los edificios a través del de otros edificios similares, haciendo uso de la base de datos de SENER.

En cada uno de los puntos de medición se dispone un acelerómetro sísmico de alta sensibilidad (ver figura 4). La fijación de los acelerómetros utilizados se efectúa mediante soldadura fría a un enganche metálico especialmente preparado.

Con el objetivo de distinguir el fenómeno de generación de vibraciones causadas por el paso de los trenes de otros (circulaciones de metros, actividades industriales locales, tráfico de vehículos en las calles, etc.) se realizan una serie de mediciones de vibraciones en ausencia de circulación de trenes.



Figura 4: Ejemplo de fijación de algunos acelerómetros sísmicos en uno de los receptores

## Correlación de modelos

El objetivo de la construcción de los modelos de predicción es doble: por un lado, obtener la descripción detallada del estado de contaminación actual de todo el tramo objeto del estudio, no sólo los puntos medidos, y por el otro, validar (mediante correlación) el método de simulación que se empleará para predecir el impacto futuro.

Tomando como base la cartografía 3D de la zona, se procede a efectuar el modelado acústico del trazado y de los receptores actuales (ver figura 5). Se utiliza software de simulación acústica comercial como Mitra o CadnaA, que ofrecen la posibilidad de incorporar las variables más significativas al respecto: Planos topográficos del terreno y edificaciones, barreras acústicas, tipos de suelo, condiciones meteorológicas, etc. Los resultados se muestran tanto en planta como en alzado, en aquellas localizaciones donde el comportamiento sea más singular: ver figura 5.

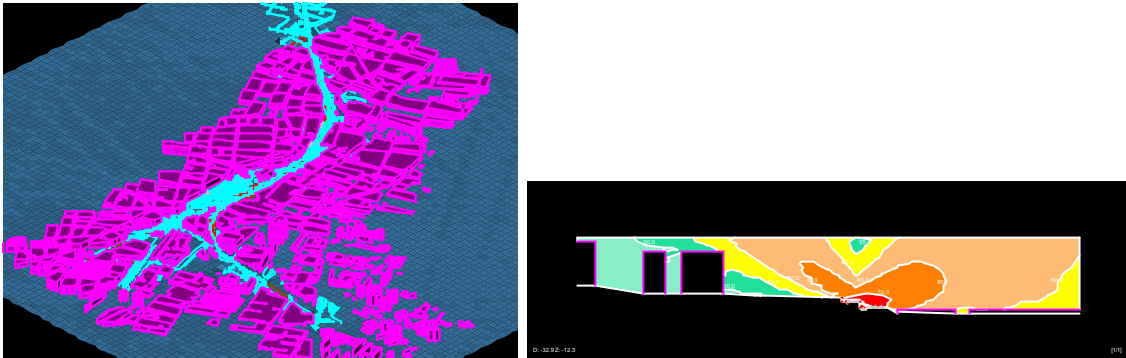


Figura 5: Ejemplos: modelo 3D y resultados de predicción (situación actual, corte vertical transversal)

Con el objetivo de inferir los valores de inmisión vibratoria actual y poder predecir los futuros, se realiza un estudio del comportamiento del terreno en cuanto a transmisión de vibraciones sobre la base de las mediciones realizadas. SENER ha desarrollado una metodología propia de predicción (no existen modelos estándar comerciales), basada en la aplicación de la ley clásica de Barkan con respecto a la distancia: ver figura 6. Esta metodología puede aplicarse tanto en el caso de remodelación de vías ya existentes como en trazados totalmente nuevos [6-8]. Debe prestarse especial importancia a la dependencia de los resultados de vibración con respecto a la velocidad de circulación de los trenes, especialmente cuando ésta puede ser alta (fenómenos de vibraciones trans-Rayleigh).

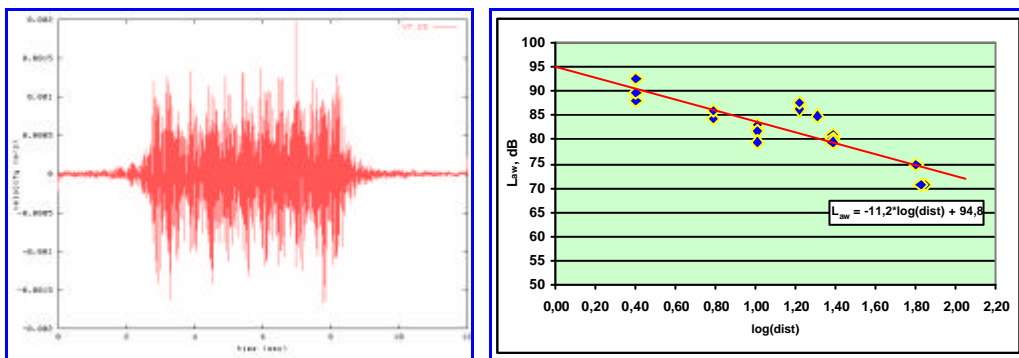


Figura 6: Ejemplo de vibraciones medidas y ley de amortiguamiento vibratorio obtenida en un receptor tipo

## **ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS PROYECTADAS**

Se analizan las actuaciones realizadas sobre las vías existentes o las características de las nuevas (en el caso de un nuevo trazado): soterramiento, conversión a ancho internacional, modificaciones de trazado, renovación o reposicionamiento de vías, cambios de usos (tipo de trenes, frecuencias y velocidades), aplicación de elementos anti-vibratorios en la supra-estructura, etc.

## PREDICCIÓN DE LOS NIVELES DE INMISIÓN ESPERABLES

Con la finalidad de evaluar el impacto acústico y vibratorio futuro, se procede a introducir en los modelos los cambios correspondientes a la nueva configuración. Junto con los cambios, se incluyen los parámetros de tráfico correspondientes a la nueva situación. Un ejemplo de los mapas de ruido y las predicciones de vibraciones que se obtienen se muestra en la figura 6.

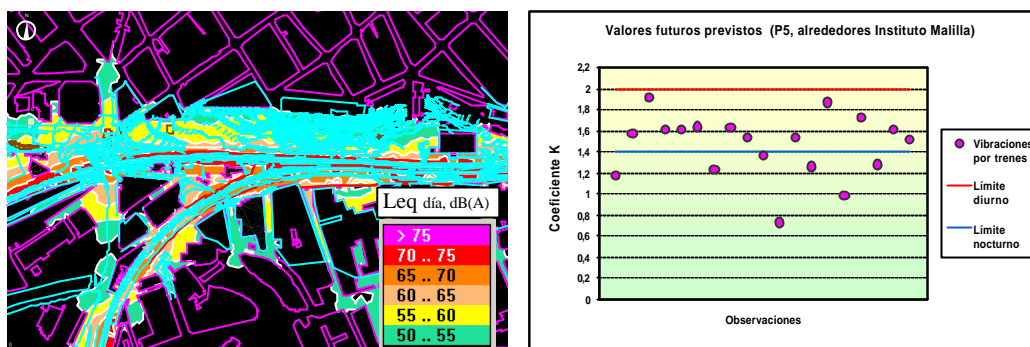


Figura 6: Ejemplo de resultados de la predicción: ruido (corte a 2 m de altura) y vibraciones.

En los casos que los resultados sobrepasen lo especificado, se proponen modificaciones a incorporar en el proyecto constructivo, haciendo uso de los modelos de predicción para evaluar su incidencia. Un ejemplo de ello, para la reducción de vibraciones, es la aplicación propuesta en uno de los proyectos realizados por SENER últimamente (ver figura 7).

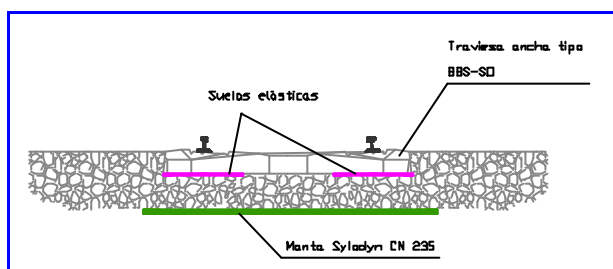


Figura 7: Ejemplo de esquema de una solución anti-vibración propuesta para una superestructura

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ley Española 37/2003 del Ruido.
- [2] Llei 16/2002, de Protecció Contra la Contaminació Acústica de la Generalitat de Catalunya.
- [3] Llei 7/2002 de Protecció Contra la Contaminació Acústica de la Generalitat Valenciana.
- [4] Directiva 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise.
- [5] Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Europ. Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise (2003)
- [6] Predicción y ensayo de transmisión de vibraciones en el terreno provocadas por trenes A.V.E. G. Alarcón, J. Solé, J. Romeu y M. Genescà. Tecni-Acústica, Bilbao (2003).
- [7] Test and prediction of free field vibrations caused by high-speed trains near the spanish candidate Iter site. G. Alarcón, J. Solé, J. Romeu y J. Cardona. ICSV-11, S. Petersburg (2004).
- [8] Characterization of ground vibration caused by trains for different configurations. J. Cardona, J. Romeu, M. Genescà y J. Solé. Inter-Noise, Río de Janeiro (2005).