

Nuevos desarrollos para reducir la emisión acústica del ferrocarril

Reducing noise emission of suburban railways

Ernesto García-Vadillo¹; Rakel Robles-Ampudia²; Olatz Oyarzabal³; Javier Astarloa⁴

¹Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Departamento de Ingeniería Mecánica, Bilbao-España. Email: ernesto.garciavadillo@ehu.eus

²Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Departamento de Ingeniería Mecánica, Bilbao-España. Email: rakel.robles@ehu.eus

³Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), Departamento de Ingeniería Mecánica, Bilbao-España. Email: olatz.oyarzabal@ehu.eus

⁴Euskal Trenbide Sarea – Red Ferroviaria Vasca, Bilbao-España. Email: jastarloa@ets-rfv.eus

DOI: <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1802>

Resumen

En el presente artículo se abordan de una manera accesible los últimos avances encaminados a reducir el ruido ferroviario. Tras una descripción introductoria de las principales fuentes de ruido de los vehículos ferroviarios, se muestra la gran inversión investigadora que se está realizando en Europa para controlar y reducir ese ruido, indicando los principales proyectos de investigación en curso, especialmente a través de la iniciativa Público-Privada Shift2Rail. El artículo se concentra en dos aspectos: el ruido de rodadura y su relación con la condición superficial del carril y el chirrido producido en las curvas y su control. El artículo

muestra los resultados de un nuevo diseño de vía en placa, orientado a una fácil reparación en caso de que la placa sea dañada por circunstancias diversas (efectos sísmicos, inundaciones, etc.) y basada en el apoyo continuo de carril, de manera que se suprima la frecuencia y el modo natural de pinned-pinned.

Palabras clave:

Ruido ferrocarril, rodadura, squeal

Abstract

This article addresses in an accessible way the latest advances aimed at reducing railway noise. After an introductory description of the main sources of noise in railway vehicles, the paper describes the great research investment that is being made in Europe to control and reduce this noise, indicating the main research projects in progress, especially through the Public-Private Initiative Shift2Rail. The article focuses on two main aspects: rolling noise and its relationship with rails surface condition and the squealing noise produced in sharp curves and its control. The article also shows the results of a new slab track design, aimed at an easy repair in case the slab is damaged by various circumstances (seismic effects, floods, etc.) and based on continuous rail support, so that the pinned-pinned natural frequency and mode are suppressed.

Keywords:

Railway noise, rolling noise, squealing noise

Introducción

La disminución de los niveles de ruido ambiental se ha convertido, en nuestros días, en uno de los grandes retos de la ingeniería de diseño. El desarrollo y progreso de los países lleva a que temas no vitales pasen a un primer plano, y esto es lo que ha sucedido con la sensibilidad hacia el ruido. De entre todas las fuentes de ruido, destacan por su importancia las relacionadas con el transporte, entre las cuales se incluye la producida por los ferrocarriles.

Al igual que sucede en los aviones y en los vehículos de carretera, también en los vehículos de ferrocarril se estudia por separado el problema del ruido emitido desde los propios vehículos ferroviarios hacia el exterior, y el problema del ruido en el interior del vehículo. Para el estudio del ruido emitido al exterior se consideran las fuentes de ruido de esos vehículos ferroviarios como si estuvieran asociadas a la trayectoria que siguen por la vía. Algo semejante sucede con el ruido medioambiental del tráfico de carretera y con el tráfico urbano en el interior de ciudades, para cuyo estudio se asocia la emisión sonora a la calle, carretera, autovía o autopista. Igualmente, con el ruido de aviones y helicópteros la emisión se asocia a la trayectoria que siguen por el aire.

Por otra parte, con una metodología diferente, se estudia el ruido que las fuentes acústicas de esos vehículos transmiten al interior de ellos mismos y soportan los pasajeros.

En el caso del ferrocarril, las principales fuentes de ruido que deben considerarse son:

- 1.- La debida a la rodadura, de ruedas de acero sobre carril de acero.
- 2.- La debida a los impactos que las ruedas producen a su paso por juntas de carril -donde no han sido reemplazadas por el carril continuo soldado-, así como a los impactos debidos al paso por cruzamientos en desvíos, travesías, escapes y bretelles.
- 3.- La producida por la mayoría de los vehículos ferroviarios cuando se inscriben en curvas de radio reducido o cuando, al paso por desvíos de maniobras, toman la rama desviada. Este ruido, semejante a un chirrido, es designado por su denominación inglesa "squeal".
- 4.- El ruido aerodinámico, que únicamente presenta importancia para velocidades suficientemente elevadas.
- 5.- El ruido debido a la tracción, sea diésel o eléctrica.

Existen otras fuentes de ruido del ferrocarril, también de importancia, pero cuya relación con el vehículo es indirecta:

6.- La debida al paso de los trenes por puentes, dando lugar a que el conjunto de la estructura del puente se excite e irradie ruido al entorno.

7.- Las señales acústicas producidas por el propio tren, que en determinadas líneas no pueden omitirse por razones de seguridad, o bien las producidas por los avisadores acústicos de los pasos a nivel con barrera. En este último caso, la responsabilidad de ese ruido es una responsabilidad compartida entre carretera y ferrocarril.

8.- El ruido producido en el entorno de las estaciones de clasificación durante las operaciones necesarias para la propia clasificación de los trenes de mercancías, así como el ruido producido por las maniobras en las estaciones de viajeros. En este último caso se incluye el ruido producido por la megafonía de anuncio de trenes.

9.- El ruido producido por los trenes especiales -dresinas, bateadoras, amoladoras de carril, etc.- durante las operaciones de mantenimiento de la vía. Este ruido tiene el agravante de ser producido, casi siempre, durante el periodo nocturno.

De todos los ruidos anteriores, los más puramente mecánicos son los relacionados con la rodadura y con el squeal y será en ellos en los que se centre este trabajo.

Progresos en Europa en la supresión del ruido ferroviario

La investigación en contaminación por ruido y vibraciones del ferrocarril comenzó en Europa a finales de la década de los 70, mediante la cooperación de los miembros de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) a través de su oficina de Ensayos y Experimentación (ORE), bajo la denominada Cuestión C163. Estos trabajos de investigación se prolongaron durante muchos años alrededor del

En los años siguientes se completaron una serie de proyectos de investigación, sobre ruido en el ferrocarril, entre los que cabe destacar SILENT TRACK y SILENT FREIGHT, orientados al desarrollo conceptual de soluciones ferroviarias más silenciosas; METARAIL, centrado en las normativas de medición de ruido y monitorización, COST BENEFIT ANÁLISIS, para optimizar las actuaciones dirigidas a la reducción de ruido y EUROSABOT, dirigido al desarrollo de zapatas sobre la base de los sistemas actuales de frenado.

Dentro del V Programa Marco de Investigación de la Unión Europea (UE) se desarrollaron los proyectos STAIRRS (Strategies and Tools to Assess and Implement Noise Reducing Measures for Railway Systems) que concluyó a finales de 2002; RENVIB, orientado al desarrollo de modelos de predicción de vibración y a las actuaciones para la disminución de vibraciones; HARMONOISE, encaminado al desarrollo de un modelo de predicción de ruido ferroviario de aplicación en la Unión Europea y terminado a finales de 2004; e IMAGINE, comenzado en 2005. Estos últimos proyectos no son específicos del ruido ferroviario, y abarcan disciplinas más amplias como la propagación de ruido medioambiental, la realización de mapas de ruido y la ordenación del territorio. Bajo el VI Programa Marco de Investigación de la UE se comenzaron los proyectos SILENCE y QCity, que abarcan el ruido de todos los medios de transporte terrestre, y se centran en los entornos urbanos.

Además, el VI Programa Marco promovió el proyecto URBANTRACK, centrado en la vía urbana para tranvías y trenes ligeros, incluyendo su baja emisión sonora y CALM II (Advanced Noise Reduction Systems). Dentro de este mismo VI Programa Marco se constituyó EURNEX, cuyo Polo 7º está dedicado a medioambiente y ferrocarril incluye temas de ruido, compartidos con los Polos 3º y 6º dedicados respectivamente al vehículo ferroviario y a la infraestructura ferroviaria (incluyendo ambos aspectos de la emisión acústica).

Dentro de los Proyectos del VII Programa Marco de Investigación destacaron: RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) hasta 2013; ACOUTRAIN, encaminado a simplificar y mejorar el proceso de certificación acústica del nuevo material rodante, en particular en relación con las

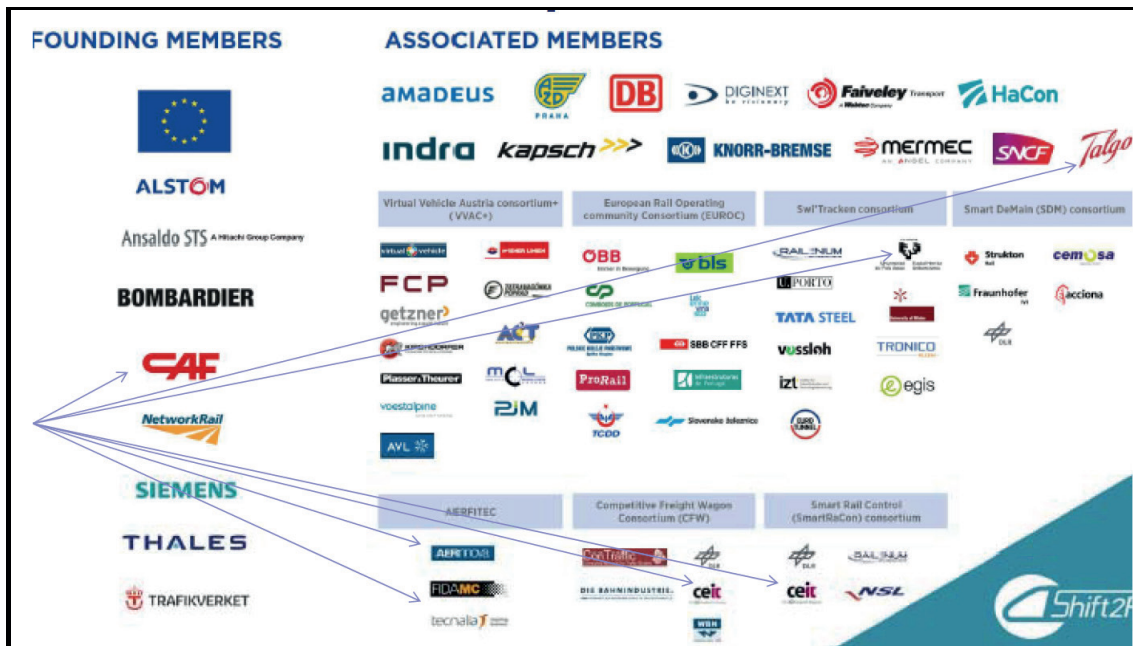
Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad; y QUIESST (QUIetening the Environment for a Sustainable Surface Transport) muy centrado en las barreras acústicas, y encaminado tanto a transporte de carretera como a transporte de ferrocarril.

El Grupo de Trabajo europeo en Ruido de Ferrocarril, cuyas tareas habían comenzado ya a finales de 1999, planteó el problema de la interoperabilidad en lo que respecta a ruido emitido por los vehículos, así como la creación de unas tarifas por uso de la vía en relación con el ruido emitido.

La UIC, a la vista de la Directiva Europea sobre ruido medioambiental en vigor desde 2002, creó la “UIC Noise Creation Standard”, que planteaba los límites de los niveles de ruido a 25 m del plano medio de vía, en función del tipo de vehículo y su velocidad.

Desde 2015 hasta 2024 la Joint Undertaking Shift2Rail es la iniciativa Público-Privada que, con el soporte de la Comisión Europea, canaliza la práctica totalidad de la investigación en materia ferroviaria en Europa. Su estructura se muestra en la Figura 1 en la que las flechas señalan los miembros vinculados al País Vasco.

Figura 1. Estructura de Shift2Rail



Fuente: *Página web de Shift2Rail.org.*

Esta iniciativa de investigación ferroviaria incluye entre sus Cross-Cutting Activities, dentro del Programa de Innovación nº 5, correspondiente a Energía y Sostenibilidad, la subárea 5.2 titulada Ruido y vibración.

En este marco destacan los siguientes proyectos que se han realizado y se están realizando en la actualidad, accesibles en la referencia de Shift2Rail (2021):

- DESTINATE, “Decision supporting tools for implementation of cost-efficient railway noise abatement measures” (2016-2018), Open Call liderado por la Universidad Técnica de Berlín.
- FINE-1: “Future Improvement for Energy and Noise” (2016-2019), Call for Members liderada por Bombardier Transportation GMBH
- FINE-2: “Furthering Improvements in Integrated Mobility Management (I2M), Noise and Vibration, and Energy in Shift2Rail” (2019-2022), Call for Members liderada por la empresa Thales
- TRANSIT: “TRAIIn pass-by Noise Source characterlsation and separation Tools for cost-effective vehicle certification” (2019-2022) - Open Call

paralela a FINE-1 y -2, liderada por la Universidad de Southampton, ISVR.

Esta iniciativa público privada se enmarcaba dentro del Programa Marco de Investigación “Horizonte 2020”, el cual ha llegado a su término y ahora será relevado por el Programa Marco de Investigación “Horizonte Europa”, cuyo presupuesto para el periodo 2021-2027 asciende a 100.000 millones de euros (117.000 millones de USD), dedicados únicamente a investigación. Y dentro de este Programa Marco comenzará la nueva iniciativa Público-Privada de investigación Ferroviaria llamada “European Rail Joint Undertaking”, cuyo presupuesto total es de 1.212 millones de euros (1.418 millones de USD), con una cofinanciación de 600 millones de euros de la Unión Europea.

Fruto de las investigaciones de todos estos años son las Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad, que en lo que respecta al ruido ferroviario se concreta en la *Especificación técnica de interoperabilidad aplicable al subsistema «material rodante, locomotoras y material rodante de viajeros»*, y que concreta los límites de emisión que no deben superar los vehículos ferroviarios como se puede ver en el correspondiente documento Unión Europea (2014).

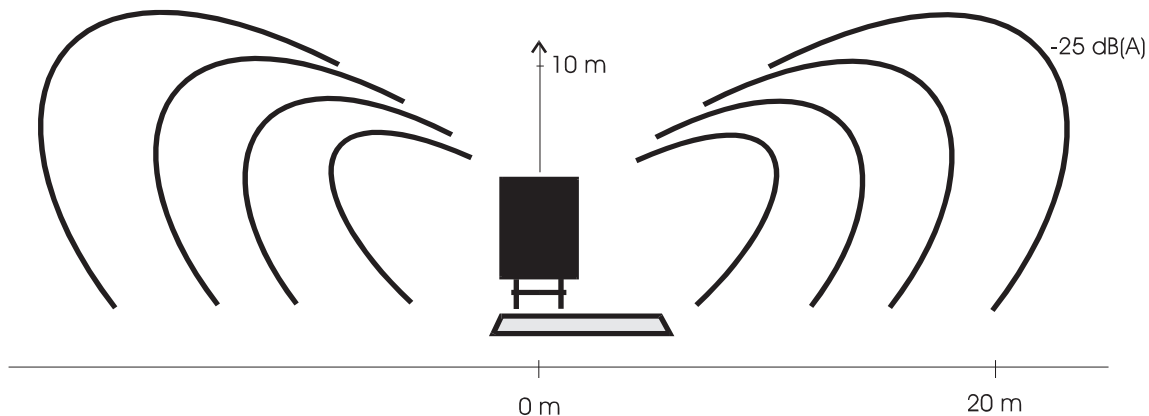
Igualmente, debe destacarse el procedimiento común en Europa para computar el ruido medioambiental de todas las fuentes principales, incluyendo el ruido ferroviario, publicado por Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti y Fabienne Anfosso-Lédée (2012), y el libro blanco sobre ruido que ha publicado el Grupo de Trabajo de Interacción Rueda-Carril de la UIC, como UIC Rail System Department (2020)

Ruido normal de rodadura y control del desgaste ondulatorio

En general, la propagación medioambiental del ruido del ferrocarril a velocidades convencionales se produce fundamentalmente en la dirección perpendicular a la vía y horizontalmente, como se indica en la Figura 2. En ella puede apreciarse que la propagación en el eje vertical es muy reducida. Esto se debe a que las

fuentes fundamentales de emisión de ruido son las ruedas rodando sobre el carril, las cuales se comportan como un dipolo en cada eje montado.

Figura 2. Propagación medioambiental del ruido ferroviario.



Fuente: *Elaboración propia.*

Además, a velocidades convencionales, en las que el ruido aerodinámico no es relevante, la caja del vehículo proporciona un cierto apantallamiento frente a la propagación vertical.

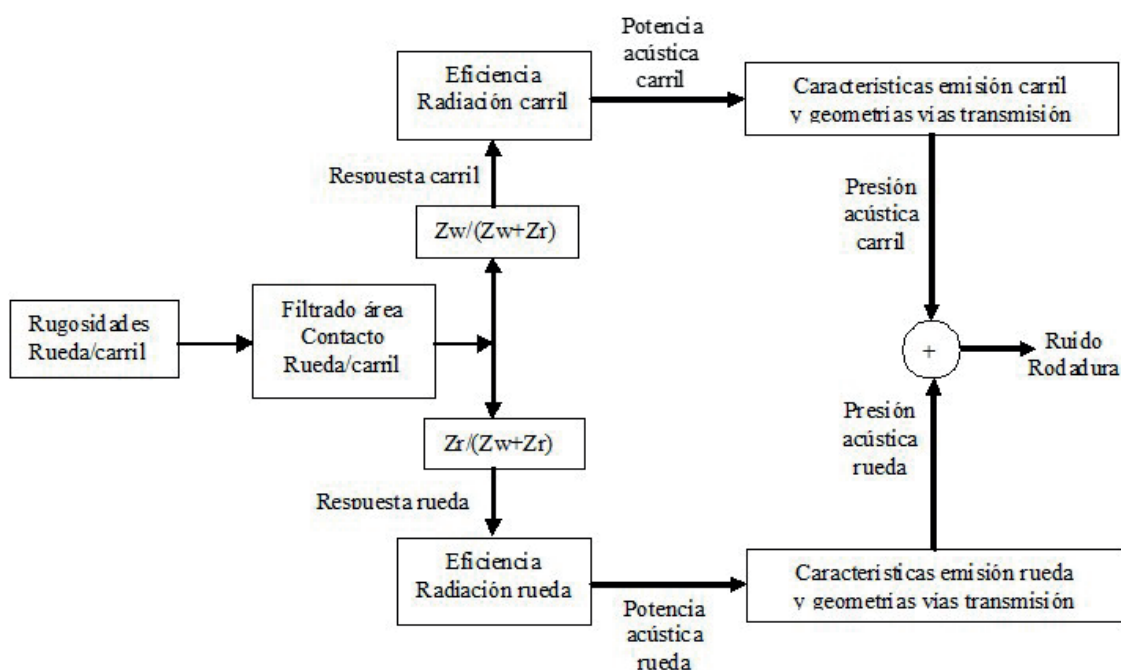
Se suele admitir que el nivel de presión sonora de este ruido de rodadura, L_p expresado en decibelios, aumenta con la velocidad V aproximadamente según la fórmula (1).

$$L_p = L_{p_0} + 30 \log_{10} (V / V_0) \quad (1)$$

en la que L_{p_0} es el nivel de ruido a la velocidad V_0 .

El ruido producido por la rodadura se debe a una serie de factores que, actualmente, se conocen con una cierta precisión. De los varios modelos desarrollados, el más completo se debe a Thompson (2009), quien, sobre la base del modelo previo de Remington, confeccionó un paquete informático denominado TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software). El esquema básico de este tipo de modelos se muestra en la Figura 3.

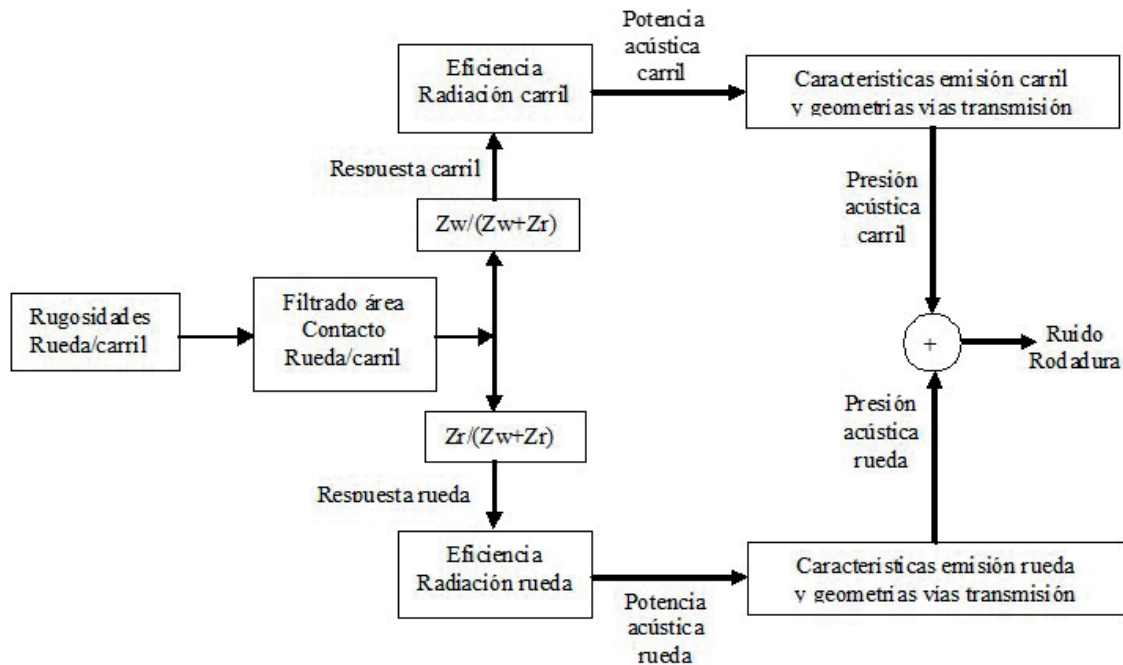
Figura 3. Modelo para el estudio del ruido de rodadura.



Fuente: *Elaboración propia.*

En todos los casos la causa fundamental de este ruido es la rugosidad superficial de ruedas y carriles. Dicha rugosidad da lugar a la imposición de unos desplazamientos relativos entre rueda y carril, que provocan fuerzas de interacción dinámica de alta frecuencia. En el caso de carriles, esa rugosidad puede adoptar una forma ondulatoria cuya amplitud puede llegar, en casos límites, a valores pico-pico de hasta 0,1 mm. Se trata, en esos casos, de un problema típico conocido con el nombre de desgaste ondulatorio o corrugación. La fotografía siguiente (Figura 4), correspondiente a una línea del Norte de España, muestra uno de esos casos, pudiendo apreciarse el mal estado superficial en la cabeza del carril.

Figura 3. Modelo para el estudio del ruido de rodadura.



Fuente: *Elaboración propia.*

En todos los casos la causa fundamental de este ruido es la rugosidad superficial de ruedas y carriles. Dicha rugosidad da lugar a la imposición de unos desplazamientos relativos entre rueda y carril, que provocan fuerzas de interacción dinámica de alta frecuencia. En el caso de carriles, esa rugosidad puede adoptar una forma ondulatoria cuya amplitud puede llegar, en casos límites, a valores pico-pico de hasta 0,1 mm. Se trata, en esos casos, de un problema típico conocido con el nombre de desgaste ondulatorio o corrugación. La fotografía siguiente (Figura 4), correspondiente a una línea del Norte de España, muestra uno de esos casos, pudiendo apreciarse el mal estado superficial en la cabeza del carril.

Figura 4. Ejemplo de corrugación.



Fuente: *Elaboración propia.*

El control de este desgaste ondulatorio lo realizamos mediante sistemas que han evolucionado con los años, y en la actualidad empleamos una regla R2S del fabricante húngaro Metalelektro, mostrada en la Figura 5.

Figura 5. Sistema de medida de corrugación utilizado actualmente en la UPV/EHU de Bilbao.

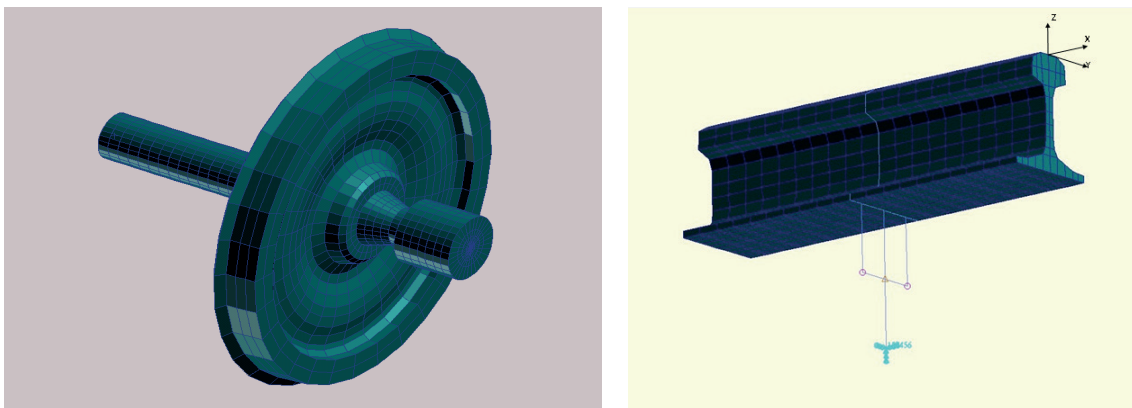


En general, este tipo de desgaste puede apreciarse a simple vista a pesar de que, en ocasiones, su profundidad es del orden de las centésimas de milímetro, como los autores tienen comprobado desde antiguo y puede verse en Vadillo et al (1998). Para poder detectarlo visualmente es preciso encontrar la adecuada orientación de la luz solar. Los autores de este artículo han desarrollado modelos que trabajan en el dominio de la frecuencia y modelos que trabajan en el dominio del tiempo. Un ejemplo de los primeros es el mostrado en I. Gómez, E. G. Vadillo, J. Santamaría (2006). Mientras que una descripción de los modelos que han desarrollado en el dominio del tiempo o del espacio se ha publicado en N. Correa, E.G.Vadillo, J. Santamaria, J. Herreros. (2016).

La modelización de ruedas o ejes montados y de carril mediante el Método de los Elementos Finitos (MEF) se muestran en la Figura 6, y permiten conocer las funciones de respuesta en frecuencia, o receptancias, de ruedas y vía. Dichas receptancias se definen como la relación entre el desplazamiento de la vibración

y la fuerza de excitación, para cada valor de la frecuencia. Se obtienen tanto de forma teórica mediante el MEF como de forma experimental.

Figura 6. Uno de los *modelos de elementos finitos de rueda y vía utilizados en la UPV/EHU.*



Pero mientras que la rueda es de dimensión finita, y por tanto tiene resonancias, en el caso del carril sólo aparecen resonancias a baja frecuencia. Para frecuencias superiores, debido a la longitud infinita del carril, éste se comporta propagando longitudinalmente las ondas estructurales, que a bajas frecuencias son: de flexión vertical; de flexión lateral; de torsión; longitudinal y de flexión del alma.

Las figuras 7 a 9 muestran las 6 primeras ondas para el carril, mientras que la Figura 10 muestra la receptancia vertical en el centro del vano (izquierda) y sobre la durmiente (derecha) de un tipo específico de vía en placa STEDEF, específicamente empleada por la UPV/EHU para calibrar el modelo y compararlo con resultados experimentales.

Figura 7. Onda n° 1, de elongación (izquierda) y onda n° 2 de torsión (derecha).

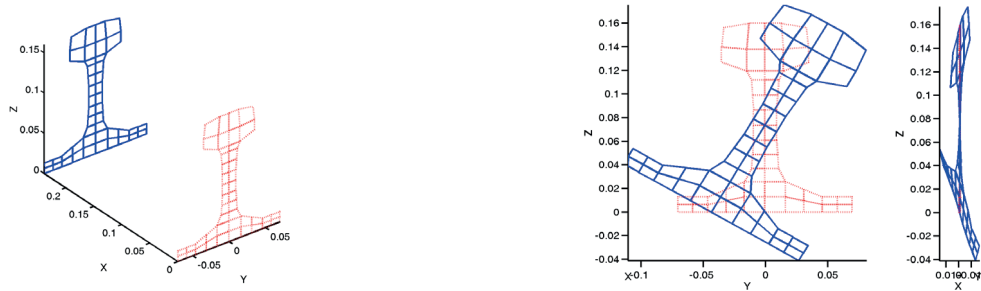


Figura 8. Onda n° 3, vertical de decaimiento (izquierda) y onda n° 4 vertical de propagación (derecha).

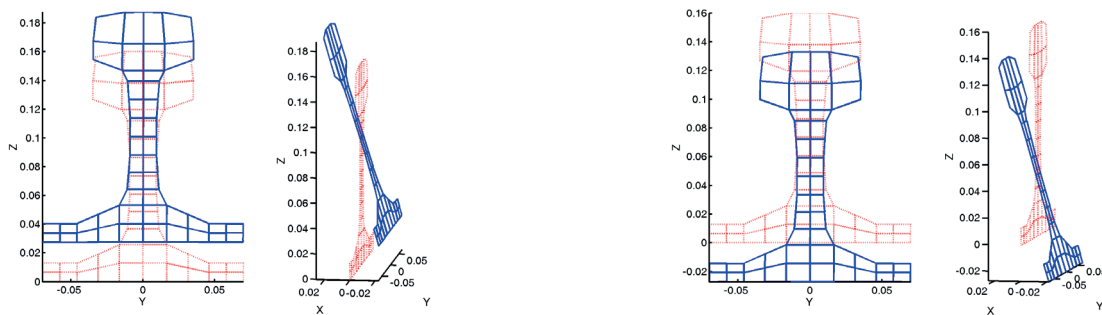


Figura 9. Onda n° 5, lateral de decaimiento (izquierda) y onda n° 6 lateral de propagación (derecha).

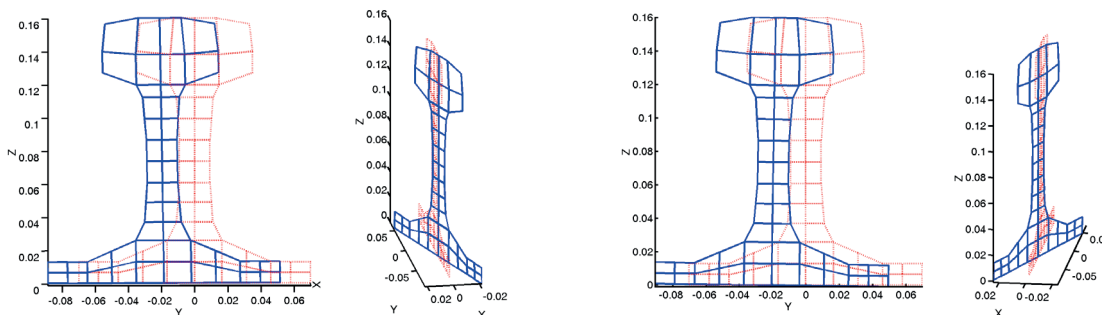
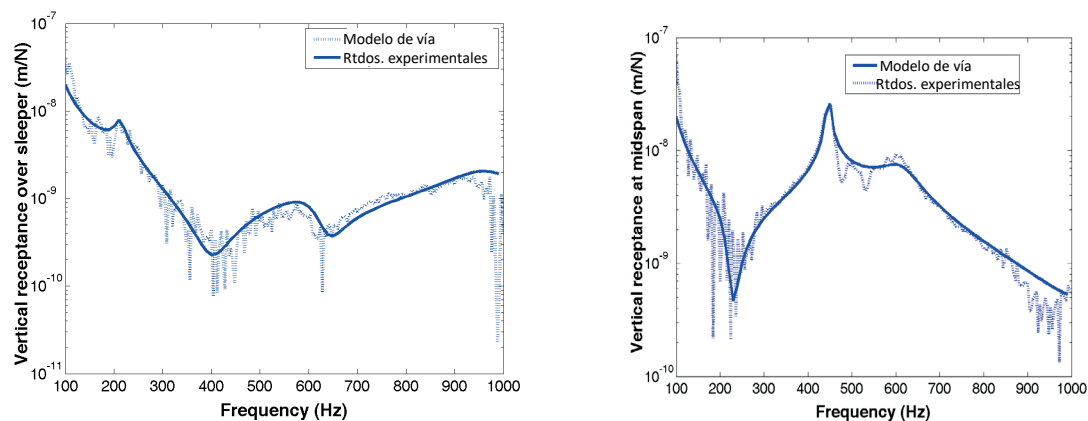


Figura 10. Receptancia vertical en el centro del vano (izquierda) y sobre la durmiente (derecha), comparando resultados teóricos y experimentales obtenidos en la UPV/EHU.



Algunos de estos modelos han permitido poner a punto un método que realiza una optimización de los parámetros de la vía (separación entre durmientes; masa de la durmiente; rigidez vertical de las placas elásticas de asiento; etc) todavía en fase de diseño, con vistas a minimizar la tendencia a la corrugación como se describe en Oyarzabal, Gómez, Santamaría G. Vadillo (2009). En estos estudios se tiene en cuenta la dispersión física de los parámetros dinámicos de la vía. Se debe subrayar que los diferentes tipos constructivos de vía (balasto, en placa STEDEF, Rheda 2000, etc) pueden tener comportamientos muy distintos de cara a la aparición de corrugación, tanto en velocidad convencional -como puede verse por ejemplo en O. Oyarzabal, N. Correa, E. G. Vadillo, J. Santamaría, J. Gómez (2011)- como en alta velocidad -como puede verse por ejemplo en N. Correa, O. Oyarzabal, E. G. Vadillo, J. Santamaría, J. Gómez (2011).

Ruido anómalo de rodadura: squeal

El problema del squeal se presenta en algunos vehículos ferroviarios durante su inscripción en curvas cerradas, y consiste en la emisión de un ruido muy agudo, generalmente por encima de los 3.000 Hz, que se mantiene durante un cierto tiempo.

En ocasiones, el origen del problema ha sido atribuido erróneamente a un doble punto de contacto entre alguna de las ruedas que circulan sobre el carril exterior a la curva y dicho carril. En esas condiciones, uno de los puntos de contacto hubiera sido un punto de rodadura y el otro un punto de deslizamiento, dando lugar a la consiguiente fricción, y por tanto al chirrido. Esta es una situación que siempre ha de evitarse, como muestra Santamaría (2009), también por el desgaste anómalo que origina. Bajo esa hipótesis el ruido hubiera tenido que proceder del carril exterior a la curva. No es fácil apreciar la procedencia de un ruido de una frecuencia tan elevada, y por tanto no es inmediato percibir que el ruido procede en realidad del carril contrario.

Una manera de identificar sin error el origen de dicho ruido es emplear una sonda de intensidad acústica, en lugar de simples micrófonos. En el dominio de la frecuencia, el signo de la intensidad, positivo o negativo, muestra la localización de la fuente del ruido. La Figura 11 muestra un caso estudiado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU en el que se utilizó con éxito esta técnica.

Otra manera de corregir el problema consiste en el empleo de aros sintonizados con las ruedas del tren. El principio en el que se basa su funcionamiento es el de dos chapas metálicas separadas por un elastómero. La Figura 12 muestra un caso en el que dichos aros fueron utilizados en una colaboración con el Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU, lográndose que se suprimiera totalmente el squeal, con reducciones de hasta 25 dB(A). En la figura se llega a percibir que los aros fueron pintados con pintura reflectante.

Figura 11. Sonda de Intensidad Acústica clavada a la durmiente.



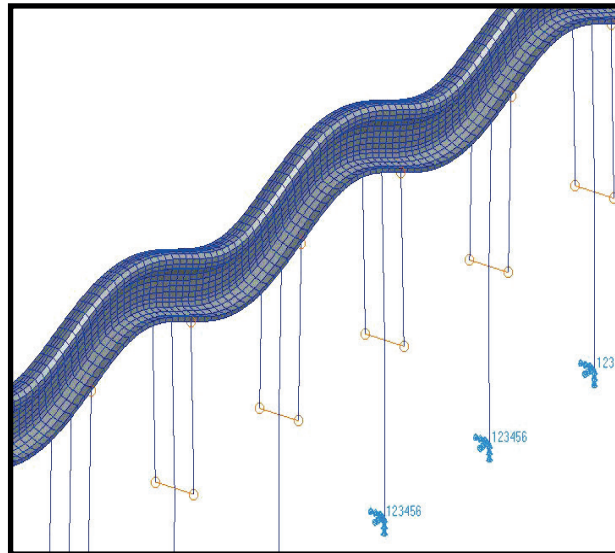
Figura 12. Unidad con ruedas dotadas de aros para suprimir el squeal.



Una vía de apoyo continuo para eliminar el pinned-pinned

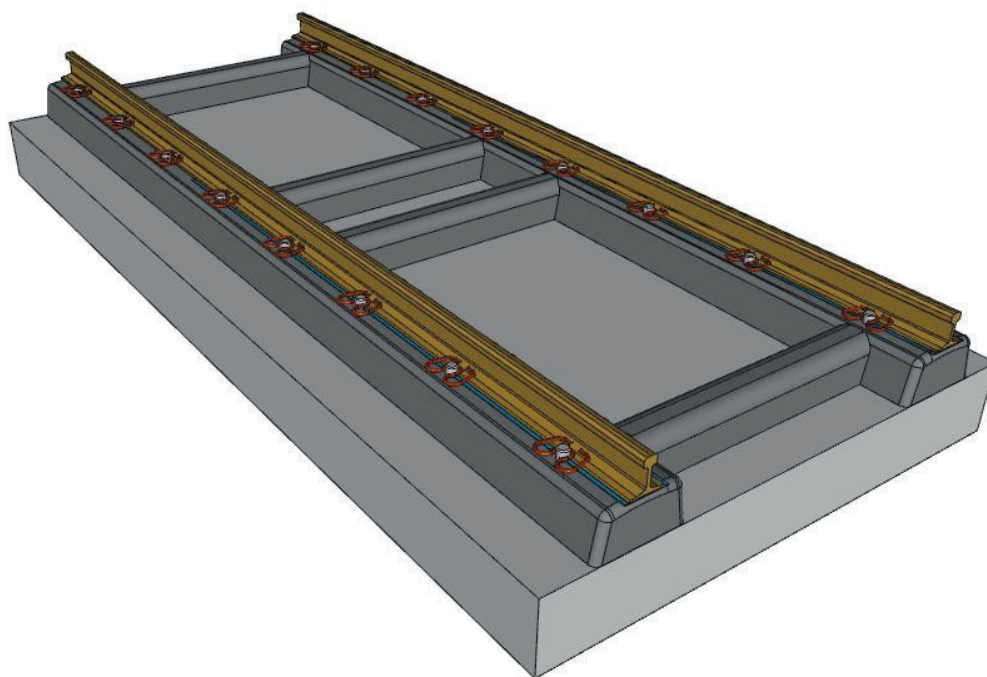
Se conoce con el nombre de resonancia pinned-pinned a la frecuencia natural y al modo correspondiente en los que el carril vibra de manera que los puntos apoyados sobre las durmientes permanezcan inmóviles. Este modo puede verse en la Figura 13.

Figura 13. *Modo de vibración pinned-pinned.*



Este modo puede presentar algunos problemas a largo plazo, debido al continuo paso de cada rueda por encima de una durmiente y seguidamente por la zona central del vano, y así sucesivamente. Este tipo de excitación se denomina excitación paramétrica y puede controlarse a base de un apoyo continuo del carril sobre losa de concreto prefabricada. La Figura 14 muestra una vía de este tipo que se encuentra en desarrollo por parte de los autores de este artículo, dentro del Proyecto Europeo In2Track3.

Figura 14. Vía con apoyo continuo sobre losa de concreto prefabricada en desarrollo dentro del proyecto In2Track3.



Conclusiones

En este artículo se han presentado algunos de los principales avances en el control y disminución del ruido del ferrocarril, desde el punto de vista mecánico y atendiendo a la fuente de emisión. Una parte de los aspectos mencionados (ruido de rodadura, ruido de squeal) se presentan también en otros ámbitos de la Ingeniería Mecánica, como en fenómenos de rodadura de acero sobre acero, fenómenos de laminación con rodillos de laminación, así como en el caso de frenos o de sierras de corte. El artículo también describe el importante esfuerzo investigador que Europa está realizando en orden a contar con un liderazgo en el sector ferroviario, para diseñar trenes más rápidos, seguros, baratos, ligeros, cómodos para los pasajeros, sencillos de mantener, con el menor consumo posible, respetuosos con el medioambiente y también más silenciosos. Por ello en el artículo se enumeran los importantes proyectos europeos de investigación dentro del campo del ruido ferroviario ya terminados y en curso de realización.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida de la European Horizon 2020 Joint Technology Initiative Shift2Rail a través de los contratos No 826255 (IN2TRACK2) y No 101012456 (IN2TRACK3). Los autores también desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación (MCI), a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) como entidades financiadoras a través del contrato PID2019-109483RB-I00, y también al Gobierno Vasco por su asistencia financiera a través de IT1764 -22, así como a la Fundación Euskoiker y a Euskal Trenbide Sarea por la colaboración en marcha.

Referencias bibliográficas

Shift2Rail. (2021). *List of all Shift2Rail Projects*. Recuperado de https://projects.shift2rail.org/s2r_projects.aspx

Unión Europea. (2014). *Reglamento (UE) No 1302/2014 de la Comisión de 18 de noviembre de 2014 sobre la Especificación técnica de interoperabilidad aplicable al subsistema «material rodante, locomotoras y material rodante de viajeros» del sistema ferroviario en toda la Unión Europea*. Diario Oficial de la Unión Europea, 12.12.2014.

Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée. (2012). *Common Noise Assessment Methods in Europe*. Luxembourg: European Commission - Joint Research Centre - Publications Office of the European Union.

UIC Rail System Department. (2020). *Train Track Interaction Sector – Acoustics, White Paper*. Paris: UIC Railway Technical Publications.

Thompson, D. J. (2009). *Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Oxford, UK: Elsevier

E. G. Vadillo, J. A. Tárrago, G. Garate, C. Angulo. (1998). Effect of sleeper distance on rail corrugation. *WEAR. Int Journ on the Sci and Tech of Friction, Lubric and Wear*, 217, 140–146.

I. Gómez, E. G. Vadillo, J. Santamaría. (2006). A comprehensive track modelisation for the improvement of corrugation models. *Journal of Sound and Vibration*, 291 (3), 522-534.

N. Correa, E.G.Vadillo, J. Santamaria, J. Herreros. (2016). A versatile method in the space domain to study short-wave rail undulatory wear caused by rail surface defects. *WEAR. Int Journ on the Sci and Tech of Friction, Lubric and Wear*, 352, 196-208. doi: 10.1016/j.wear.2016.02.012.

O. Oyarzabal, I. Gómez, J.Santamaría, E. G. Vadillo. (2009). Dynamic optimization of track components to minimize rail corrugation. *Journal of Sound and Vibration*, 319, 904-917.

O. Oyarzabal, N. Correa, E. G. Vadillo, J. Santamaría, J. Gómez. (2011). Modelling rail corrugation with specific-track parameters focusing on ballasted track and slab track. *Vehicle System Dynamics. Int. Journal of Veh. Mech. and Mobility*, 49, nº 6, 2011.

N. Correa, O. Oyarzabal, E. G. Vadillo, J. Santamaria, J. Gomez. (2011). *Rail corrugation development in high speed lines. WEAR. Int Journ on the Sci and Tech of Friction, Lubric and Wear*, 271.

J.Santamaría, E. G. Vadillo, O. Oyarzabal. (2009). Wheel-rail wear index prediction considering multiple contact patches. *WEAR. Int Journ on the Sci and Tech of Friction, Lubric and Wear*, 267, 1100-1104.