

# Ruido ferroviario: material rodante



**Eduardo Latorre Iglesias<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Audiovisual y Comunicaciones. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.

Correo electrónico: eduardo.latorre.iglesias@upm.es

PACS: 43.50 Rq, 43.50 Ed

## Resumen

El ferrocarril es un medio transporte respetuoso con el medio ambiente y que responde a las demandas de movilidad de la vida moderna. Sin embargo, el ruido que produce tiene un impacto negativo tanto por la molestia que ocasiona a las personas que viven cerca de las vías de tren como para sus usuarios, que lo perciben como una fuente de molestia e incomodidad. Es por ello que en los últimos años la exigencia a los fabricantes en el cumplimiento de los límites de ruido se ha incrementado. Estos límites pueden venir impuestos por directivas internacionales o nacionales de obligado cumplimiento, o por los requisitos contractuales exigidos por los operadores. Es por ello que se hace necesario un conocimiento profundo de los mecanismos de generación de ruido de los distintos componentes del tren, tanto para elegir la estrategia de reducción de ruido adecuada como el desarrollo de herramientas de predicción precisas.

En este documento se analiza la problemática de ruido a la que se enfrentan los fabricantes de material rodante, se distinguen las distintas categorías de ruido presentes en un tren y se identifican las principales fuentes de ruido, sus mecanismos de generación y medios para su atenuación. Además, se repasan brevemente las herramientas experimentales y de simulación empleadas en la industria y, finalmente, se mencionan disciplinas y tecnologías incipientes que podrían marcar las futuras líneas de trabajo en el sector.

**Palabras clave:** ruido, vibraciones, tren, ferroviario.

## Abstract

Railways are an environmentally friendly means of transport well suited to modern society. However, the produced noise has a negative impact both on the people leaving nearby the railway tracks and on the train users, who perceive noise as a source of annoyance and discomfort. As a result, in the last years an increasing demand in the commitment with noise limits has been imposed to train manufacturers. This limits can be defined by international or national regulations or by contractual requirements settled by the operators. Therefore, it is necessary to know the mechanisms of noise generation of the different train noise sources, both to choose an efficient noise mitigation strategy and to develop precise prediction tools.

In this work the problem regarding noise faced by the train manufacturers is analyzed, the different categories of train noise sources are defined and the main noise sources, the noise generation mechanisms and means of noise control are identified and explained. Moreover, the experimental and prediction tools used in the industry are briefly discussed and, finally, new disciplines and technologies that could be applied in further development are suggested.

**Keywords:** noise, vibration, train, railway.

## 1. Introducción

El ruido producido por el material rodante (ya sea tranvía, metro, trenes de media y larga distancia o de alta velocidad) tiene un impacto medioambiental nega-

tivo, tanto por la molestia que origina a las personas que viven en el entorno de las vías como por el efecto que puede ocasionar en el medio natural. Es por ello que en los últimos años han surgido directivas internacionales y nacionales para limitar el ruido de emisión permitido a

material rodante. Por ejemplo, desde 2006 la Especificación Técnica de Interoperabilidad sobre Ruido (con sus siglas en inglés TSI noise) [1] es de aplicación en la Red Transeuropea de Ferrocarril; esta directiva establece valores máximos de ruido emitidos por material rodante de nueva construcción o que hayan sido modificados. En caso de incumplimiento de dichos límites el tren no podría operar entre países de la Unión Europea, con la consiguiente problemática para el operador para dar el servicio requerido y para el fabricante para cumplir los requisitos contractuales.

Además, el ruido es percibido por los usuarios como molesto, se asocia a una mala calidad del producto y es un indicador de mala calidad del servicio. Así, los operadores cada vez más frecuentemente establecen límites de ruido adicionales o más restrictivos que los de la normativa aplicable en cada país. Uno de los casos que mejor ilustran la creciente exigencia de los operadores a los fabricantes en materia de ruido es el proyecto High-Speed 2 (HS2), que tiene como objetivo la construcción de una línea de tren de alta velocidad en el Reino Unido. Este proyecto ha estado envuelto en polémica debido a su posible impacto medioambiental, incluyendo el potencial ruido al que estarían expuestas las viviendas próximas a la vía. Esto ha retrasado varios años la aprobación del proyecto y ha endurecido las exigencias a ruido y vibraciones que debe de cumplir el operador que gane la licitación, los requisitos para la demostración técnica de la viabilidad del cumplimiento de dichos límites y la penalización económica pro incumplimiento, que en este caso serían millonarias [2].

Por todo lo anterior, los fabricantes de trenes se ven en la necesidad de disponer de herramientas que les permitan estimar el ruido que producirá el tren en las desde las primeras fases del proyecto. Esperar a que el tren esté ya construido para evaluar el cumplimiento de los límites es arriesgado y es necesario abordar la problemática desde las primeras fases de diseño del tren. Esto permitiría detectar potenciales riesgos y tomar medidas de control preventivas, más baratas y con menor impacto que las correctivas. Para ello, son necesarios modelos de predicción de ruido que sean precisos y que tengan un coste computacional bajo y un tiempo de cálculo acorde con las exigencias de un proyecto real.

Tanto para el desarrollo de las herramientas de predicción como para tomar las acciones correctoras adecuadas será necesario conocer los mecanismos de generación de ruido de cada una de los elementos o componentes que generan ruido en un tren, además de contar con herramientas de análisis adecuadas para evaluar la contribución de cada una de ellas al ruido global producido. Una aproximación al problema únicamente

desde el punto de vista acústico sería insuficiente: ésta ha de ser multidisciplinar para poder valorar el efecto de las medidas de control de ruido aplicadas al correcto funcionamiento del componente. Aquí entrarán en juego otros factores tanto económicos como técnicos (consumo, peso, resistencia al avance, seguridad, mantenimiento, cumplimiento con normativas, etc.) que deberán de ser evaluados por el equipo técnico de proyecto antes de adoptar una solución.

Esta publicación tiene por objetivo dar una visión general de los distintos factores que entran en juego para abordar la problemática del ruido del material rodante. En la Sección 2 se presentan los estándares de aplicación para la medida del ruido producido por material rodante, las distintas categorías en las que se pueden clasificar los ruidos producidos por un tren se detallan en la Sección 3. Las Secciones 4, 5 y 6 presentan las principales fuentes de ruido mecánico, de rodadura y aerodinámico de trenes, explicando los distintos mecanismos de generación de ruido y medidas para su control. En la Sección 7 se presenta un resumen de las principales técnicas experimentales para la estimación del ruido producido por los diferentes componentes del tren, mientras que la Sección 8 se centra en las herramientas de simulación utilizadas en la industria. Finalmente, la Sección 9 propone posibles líneas futuras de trabajo basadas en las tendencias tecnológicas actuales.

## 2. Estándares de medida de ruido de material rodante

Cabe distinguir dos tipos de ruido a evaluar en función de donde se localice el receptor: ruido exterior y ruido interior. Las normativas internacionales y nacionales anteriormente citadas limitan el ruido exterior máximo que puede emitir un tren, ya sea en uno o varios receptores específicos o en un área determinada. En este caso se trata de limitar la exposición a ruido de personas que vivan cerca de las vías, proteger el silencio necesario para el desarrollo de actividades que ocurran en zonas colindantes e incluso del hábitat natural de ciertos animales. En cuanto al ruido interior, éste no suele estar regulador por directivas pero sí limitado por requisito del cliente, a fin de mejorar el confort y calidad percibida por los usuarios. Dos son los estándares utilizados para las medidas de ruido de trenes: la UNE-EN-ISO 3095:2013 [3] para ruido exterior, y la UNE-EN-ISO 3381:2011 [4] para ruido interior. A continuación se resume la metodología de medida definida en cada uno de ellos.

### 2.1. Ruido exterior

Para la medida del ruido exterior la UNE-EN-ISO 3095:2013 [3] distingue tras situaciones diferentes:

- ruido con el tren parado (*standstill*),
- ruido de paso del tren (*pass-by*),
- ruido de aceleración,
- ruido de frenado.

Para las medidas en *standstill* se definen un número de posiciones de micrófono alrededor del tren (o de vagones que sean representativos) con una separación entre ellos de entre 3 y 5 m. Cada micrófono se debe de situar a 7,5 m del eje de la vía y a una altura de 1,2 m sobre el raíl. El nivel de presión sonora es promediado en el tiempo en cada posición (durante 20 segundos) y espacialmente considerando todas las posiciones de medida. En algunos casos también se requiere identificar el punto de medición con mayor nivel de ruido. El equipamiento que funciona normalmente cuando el tren está parado debe de estar funcionando a su carga normal (por ejemplo: unidades de aire acondicionado, equipos de refrigeración, convertidores auxiliares, compresores...). Típicamente, las fuentes de ruido más importantes en este ensayo son los ventiladores de las condensadoras de las unidades aires acondicionados (*Heating, Ventilation and Air Conditioning*, HVAC), ventilación de equipos auxiliares, compresores y ruido impulsivo debido a la descarga del sistema de frenado.

En cuanto a las medidas de *pass-by* se define una posición de medida de referencia a 7,5 metros del eje de la vía y una altura de 1,2 m sobre el raíl. En caso de velocidades de tren iguales o superiores a 200 km/h se podría, como alternativa, medir a 25 metros del eje de la vía y a una altura de 3,5 m sobre el raíl. El ruido de paso se calcula como el promedio temporal desde que la parte frontal del tren pasa por delante del micrófono (es decir, cruza la línea imaginaria perpendicular que une el eje de la vía y el micrófono), hasta que la parte trasera hace lo propio. La velocidad de paso del tren ha de ser su velocidad máxima de operación,  $v_{\max}$ ; para trenes que operen a velocidades de más de 80 km/h a de incluirse una medida también a esta velocidad. Las condiciones en que se haya la vía y su estructura tienen un gran impacto en el ruido de paso del tren. Por ello, la norma UNE-EN-ISO 3095:2013 define un espectro de rugosidad de raíl máximo y un *Track Decay Rate* (TDR) mínimo (en la Sección 5 se detalla la relación entre estos parámetros y el ruido de rodadura generado). Las principales fuentes de ruido en este caso dependen de la velocidad operacional del tren y, por tanto, del tipo de tren. Cabe destacar el ruido de rodadura y de tracción como fuentes de ruido principales común a todos ellos, y el ruido aerodinámico en trenes de alta velocidad.

Para ensayos de *aceleración*, la medida del nivel máximo emitido durante la misma se realiza a 7,5 m del eje la vía, mientras que el nivel de ruido promedio duran-

te la aceleración se evalúa a 25 m. La aceleración debe de realizarse de manera continua hasta alcanzar los 40 km/h y, a partir de ahí, reducir el esfuerzo de tracción y mantener la velocidad constante hasta recorrer la distancia estipulada. En este caso la mayor contribución suele ser la del motor y la caja de cambios. En el ensayo de *frenado* la magnitud a medir es el  $L_{\text{TPAF}}(t)$  y se debe de considerar el valor máximo de cada serie de medición. Se debe de realizar un frenado completo a partir de 30 km/h y terminado en parada. Las posiciones de medida admiten cierta tolerancia ante la dificultad de preveer la posición exacta donde terminará el frenado.

## 2.2. Ruido interior

El ruido interior se mide según el estándar UNE-EN-ISO 3381:2011 [4]. Se recomiendan entre cinco y siete posiciones de micrófono distribuidas a lo largo del vagón, a 1,2 metros de altura desde el suelo para viajeros sentados y a 1,6 m para viajeros de pie; se deben de considerar las posiciones donde se esperan mayores niveles de ruido: por ejemplo encima de los ejes y en el centro del compartimento (si es cerrado). También ha de evaluarse el ruido en cabina en la posición del oído del conductor. Se distinguen cuatro configuraciones de ensayo: con el vehículo a velocidad constante, acelerando, decelerando y parado. En el primer caso, se medirá el ruido promediado durante 20 s para velocidades acordadas entre fabricante y cliente, siendo muy habitual medir a la máxima velocidad. El requisito puede evaluarse como el valor de ruido máximo o promediado en los distintos puntos de medida. Al tratarse de ruido interior cabe distinguir las fuentes de ruido en función de la naturaleza del medio en la que se produce la propagación de la excitación: transmisión aéreo (a través del aire) o estructural. Ateniéndose a esta clasificación, a continuación se citan las principales fuentes de ruido interior:

- *Ruido aéreo*: el ventilador de la evaporadora de las unidades HVAC, encargado de suministrar la ventilación al interior del tren suele ser la principal fuente de ruido para ensayos en estático; para ensayos a velocidad constante destacan el ruido de rodadura y fuentes aerodinámicas de baja frecuencia. El aislamiento acústico proporcionado por el suelo del tren es crucial en este caso. Suelos compuestos, suelo flotante, etc. permiten un mayor aislamiento, reduciendo el ruido aéreo en el interior.
- *Ruido estructural*: destaca la transmisión de vibración desde el motor y caja de cambios al chasis del tren para ensayos en dinámico, o del compresión en estático. En este caso es recomendable el desacoplamiento mecánico de estos elementos y el chasis del tren mediante conexiones elásticas. También evitar o minimizar la excitación de reso-

nancias estructurales que coincidan con la frecuencia de excitación.

### 2.3. Influencia del lugar del ensayo

Para llevar a cabo las medidas definidas anteriormente la correcta elección de la vía y entorno de ensayo es fundamental. No debe olvidarse que el objetivo de estos ensayos es medir el ruido producido por el material rodante exclusivamente, y no por la vía. Debido a la dificultad de separar la contribución de tren y vía al ruido total en el punto de medida, debe minimizarse el ruido emitido por la vía. Una manera de hacerlo es limitando la rugosidad máxima del rail y fijando un TDR mínimo. Aún así, en los estándares no se fijan niveles mínimos de rugosidad ni máximos de TDR, por lo que distintas vías, aún cumpliendo los requisitos de la norma, emitirán distintos niveles de ruido.

En cuanto al entorno, idealmente las medidas deben de ser realizadas en campo libre; esto es, en un entorno donde no haya ningún obstáculo que pueda perturbar la propagación del sonido y generar reflexiones (por ejemplo edificios colindantes). Existen ciertas pistas de ensayo que presentan características cercanas a campo libre y donde se garantiza un mantenimiento adecuado de la vía: Velim, CEF Valenciennes y Wildenrath, por citar algunas. Sin embargo, es habitual que en los contratos se detalle que los límites de ruido deben de cumplirse en las vías del cliente. Esto puede llevar a problemas en la validación del tren ya que rara vez se puede garantizar el correcto estado de la vía -sobre todo si está en uso- y el entorno puede distar mucho del campo libre necesario: paso del tren por viaductos (con barreras laterales) y túneles, por ejemplo. Si bien, en estos casos se disminuirá el ruido radiado al exterior, el ruido interior aumentará considerablemente.

## 3. Categorías de fuentes de ruido

Las fuentes de ruido de un tren pueden dividirse tres categorías principales en función del mecanismo físico que las origine. Además, cada una de ellas será dominante dependiendo de la velocidad a la que vaya el tren y, por tanto, dependiendo del tipo de tren [5]. La primera categoría son fuentes de tracción. Este tipo de ruido es muy eficiente (es decir, la relación entre la energía mecánica y la energía sonora radiada es alta) pero tiene una dependencia con la velocidad baja. El segundo tipo de ruido es el de rodadura, que tiene una eficiencia acústica y una dependencia con la velocidad moderada. Finalmente, el ruido aerodinámico es el de menor eficiencia acústica pero el que tiene una dependencia con la velocidad mayor. La Figura 1 muestra dicha dependencia para los tres tipos de ruido. El ruido de tracción es predominante a velocidades bajas, típicamente por debajo de los 30 km/h,

y por ello es el ruido principal en trenes de mercancía. El ruido de rodadura domina a velocidades entre 40 y 250 km/h aproximadamente, y esto hace que deba de ser tenido en cuenta para todo tipo de trenes: mercancía, tranvía, metro, media y larga distancia y alta velocidad. Finalmente, en ruido aerodinámico comienza a dominar a partir de velocidades de tren de 300-320 km/h, siendo solo relevante para trenes de alta velocidad. En las secciones 4, 5 y 6 se detallan las principales fuentes de ruido pertenecientes a cada una de estas categorías.

## 4. Ruido de maquinaria

Aunque son numerosos los equipos que generan ruido en un tren, en esta sección van a tratarse en detalle únicamente el ruido producido por motores electromagnéticos y por las unidades HVAC, por su importancia tanto en el ruido exterior como interior del tren.

### 4.1. Motores electromagnéticos

Los principales mecanismos de generación de ruido de un motor electromagnético de un tren pueden resumirse en tres [7]:

- Ruido electromagnético producido por las fuerzas de Maxwell que se generan en las interacciones entre los imanes y sus ranuras.
- Ruido aerodinámico producido por el ventilador encargado de enfriar el motor.
- Ruido mecánico producido, por ejemplo, por los rodamientos. Este tipo de ruido suele ser significativamente menor que los dos anteriores.

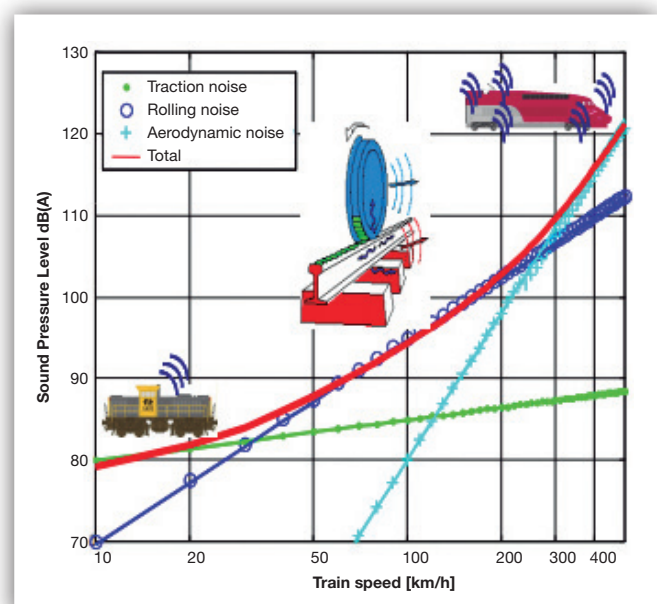


Figura 1. Dependencia de las distintas categorías de fuentes de ruido en un tren con su velocidad [6].

El ruido electromagnético se caracteriza por un fuerte carácter tonal. Su contenido en frecuencia depende de la estrategia de control aplicada, siendo una de las más utilizadas la basada en la modulación del ancho del pulso (*Pulse Width Modulation*, PWM). Ésta es una técnica de control para máquinas eléctricas de velocidad variable basada en la generación de un pulso de voltaje de ancho variable. El control por PWM genera armónicos de voltaje y corriente adicionales en el bobinado, estando la frecuencia del ruido relacionada con la frecuencia de la señal de control. Cuando la frecuencia de excitación debida a las fuerzas electromagnéticas coincide con una resonancia estructural del motor el ruido radiado será considerable. Como modificar el diseño del motor es tarea complicada, para evitar el acoplamiento entre resonancia y excitación es más eficiente trabajar sobre esta última. [8]. Mediante una correcta optimización de la señal de control, puede conseguirse reducciones de hasta 10 dB en el ruido de pico [8].

Los ventiladores utilizados para enfriar los motores suelen estar fijados al propio eje del motor. Por ello, el ruido aerodinámico tonal que producen se incrementa con la velocidad de giro y su frecuencia depende de ésta y del número de palas. Además, se producirá ruido de banda ancha debido a las turbulencias generadas. Este ruido puede reducirse optimizando el diseño del de las palas del ventilador, reduciendo su tamaño para evitar efectos de bloqueo debido a su confinamiento en el interior del motor y reducir la resistencia al flujo, etc [9].

#### 4.2. Aire acondicionado

El aire acondicionado de un tren genera ruido tanto hacia el exterior como en su interior. Los ventiladores de la condensadora suelen ser muy potentes y mover un caudal de flujo elevado, produciendo mucho ruido. En este caso la directividad del ruido juega a favor ya que el máximo de radiación se encuentra en el eje del ventilador, esto es apuntando verticalmente. Esto hace que la energía sonora que se propaga hacia el lateral de la vía sea mucho menor y, por ello, su incidencia en el ruido exterior limitada. Aun así, es una fuente a tener en cuenta para medidas en estacionario.

Sin embargo, la situación es mucho menos favorable cuando se trata de ruido interior. El ruido propagado al interior del vagón o de la cabina depende en gran medida de la arquitectura del sistema de distribución del aire, es decir, de los conductos y difusores. Un problema típico es el ruido tonal producido por el paso de pala del ventilador de la evaporadora, que se propaga a través de los conductos. Una solución para atenuar este ruido es forrar de material absorbente acústico dichos conductos y/o añadir un silenciador acústico compuesto por varios

baffles también forrados. Cuanto mayor sea la superficie forrada por el material absorbente más se atenuará dicho ruido.

Los ventiladores suelen elegirse en función del caudal que deben entregar y las pérdidas de carga que tendrán que soportar al instalarlos en su configuración final. Con esos datos se selecciona su punto de trabajo óptimo, que suele ser también el más silencioso. Sin embargo, en la práctica las pérdidas de carga reales en el tren pueden distar de aquellas calculadas en las fases de diseño, llevadas a cabo mediante simulación. Esto hace que el ventilador no trabaje en ese punto óptimo y lo haga más forzado, produciendo más ruido. Al añadir un silenciador y/o material absorbente se reduce la sección de paso del aire, esto es, se aumenta la carga "vista" por el ventilador. Para dificultar más la situación, el ruido de paso de pala suele ser de baja frecuencia (en torno a 300-400 Hz) lo que hace que, para que sea eficaz, el grosor del material absorbente (normalmente espumas porosas) deba ser considerable. Esto reducirá más la sección de paso del flujo haciendo que el ventilador genere más ruido. Es por ello crucial la colaboración entre los ingenieros de sistema HVAC y expertos en dinámica de fluidos y acústica desde las fases iniciales de diseño para lograr un óptimo funcionamiento del sistema.

## 5. Ruido de rodadura

El ruido de rodadura es generado por la interacción entre rueda y rail en la región de contacto. Al existir rugosidad en la superficie de ambos componentes (siendo ésta del orden de micras) se producen variaciones en la fuerza ejercida por la rueda sobre el rail que provocan la vibración de ambas estructuras y la consiguiente radiación de ruido. Parte de la vibración transmitida al rail se propaga a lo largo del mismo, y parte se transmite a las traviesas y al balastro de la vía. Cada componente dominará en un rango de frecuencias del espectro de ruido. Este rango depende de la velocidad del tren, pero de forma orientativa podría decirse que ruido del rail es preponderante entre 500 y 2000 Hz y que, a frecuencias más altas, es la rueda la que radia mayor ruido. A frecuencias menores a 500 Hz las traviesas y el balastro son más ruidosos.

La rugosidad de rail y rueda puede medirse siguiendo las directrices de la norma UNE-EN 15610:2020 [10]. Además de la rugosidad, el ruido radiado por el rail depende en gran parte de las características de su fijación a las traviesas. Unas fijaciones más rígidas harán que el acoplamiento entre rail y traviesa sea mayor y, por tanto, se transmita más energía vibratoria desde el rail a las propias traviesas y al balastro. Esto, que es indeseable desde el punto de vista del mantenimiento de la infraes-

estructura y del impacto de la vibración del tren en edificios adyacentes a la vía, es muy beneficioso para reducir el ruido producido por el rail ya que su vibración será menor y, por consiguiente, también lo será el ruido radiado. Al contrario, si se utilizan almohadillas elásticas entre rail y traviesa (*rail pads*) estos elementos estarán desacoplados y habrá una menor transmisión de vibración al balastro, pero mayor energía vibratoria en el rail. El parámetro utilizado para caracterizar las almohadillas y que puede relacionarse directamente con el ruido de rodadura emitido es su rigidez dinámica. Ésta puede medirse en laboratorio aplicando la metodología definida en la norma PNE-prEN 17495 [11] que está pendiente de aprobación.

Además de la rugosidad de rueda y rail y la rigidez dinámica de las almohadillas, otro parámetro que juega un factor importante es el *Track Decay Rate* (TDR). Este parámetro sirve para cuantificar el decaimiento de la vibración a lo largo del rail. A mayor TDR, más rápido decaerá la vibración y menor será el ruido radiado, y viceversa. La norma UNE-EN 15461:2008+A1:2011 establece el método de medición del TDR [12].

Para reducir el ruido de rodadura se puede actuar tanto sobre la rueda como sobre el raíl. A continuación, se detallan algunas de las medidas de reducción de ruido más comunes:

- *Rueda*: el control del ruido en la rueda puede llevarse a cabo mediante la optimización de su forma para reducir su eficiencia de radiación (esto es, la relación entre velocidad vibratoria y la energía sonora radiada), modificando el diámetro de la rueda (los modos de vibración de ruedas más pequeñas estarán a frecuencias más altas) o la forma del velo. Pueden conseguirse disminuciones de ruido muy significativas (entorno a 5 dBA), similares a las que se pueden obtener añadiendo amortiguadores [13]. Otro medio de control de ruido en ruedas es la adición de amortiguamiento adicional, que puede lograrse mediante distintos mecanismos: capas de material viscoelástico entre la rueda y un panel metálico en configuración sandwich (*constrained layer*) [14], resonadores sintonizados [15], amortiguadores en anillo (*ring dampers*) [16], entre otros. En el caso de soluciones que incluyan material viscoelástico la principal limitación son las temperaturas elevadas que pueden degradar el material. Esto hace que no sean adecuados para ruedas con freno en la banda de rodadura (*tread brakes*) [5]. La Figura 2 muestra amortiguadores de la empresa Schrey & Veit montados en una rueda monobloque.

Como alternativa a las ruedas monobloque compuestas de acero surgen las ruedas elásticas (*resi-*

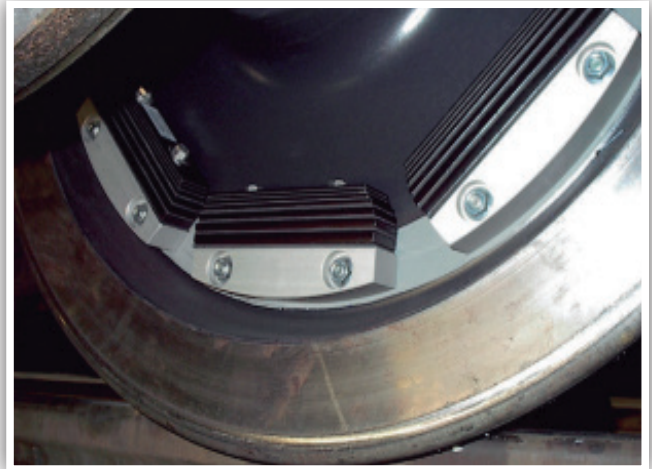


Figura 2. Instalación de rail dampers del fabricante Schrey & Veit [17].

*lient wheels*), que tienen un elemento de goma entre la banda de rodadura y la parte interior de la rueda. Esta introduce aislamiento entre la banda de rodadura y el velo de la rueda (reduciendo la generación de ruido), y además introduce amortiguamiento adicional a la rueda. Son muy utilizadas en tranvías, donde la suspensión en el bogie es menor que en otro tipo de trenes. No es tan resistente como las ruedas monobloques, así que por seguridad su uso se ha limitado en trenes que circulan a mayor velocidad.

- *Rail*: como se ha comentado anteriormente, el ruido producido por el rail depende de su rugosidad y la rigidez dinámica de las fijaciones a las traviesas. Para reducir la rugosidad del rail puede aplicarse *rail grinding*, técnica que consiste en pulir la superficie del rail para dejarla lo más lisa posible. Puede llevarse a cabo mediante distintos métodos como son carritos o pequeñas máquinas de uso manual o locomotoras especialmente equipadas para ello. Si se disminuye la rigidez de las fijaciones del rail más energía vibratoria se transmitirá al balastro, con la consiguiente disminución del TDR. Esto puede conseguirse utilizando almohadillas con una menor rigidez dinámica. Otra manera de disminuir el TDR es el uso de amortiguadores (*rail dampers*) a lo largo del rail. La Figura 3 muestra *rail dampers* del fabricante Voestalpine instalados a lo largo de una vía con balastro.

Además del ruido de rodadura, existen otros tipos de ruido relacionados con la interacción entre la rueda y el rail como el ruido de chirrido (*squeal noise*) que se produce por el rozamiento entre estos elementos en curvas de poco radio, o el ruido de impacto producido por la rueda en los desvíos y cambios de vía. No se entrará en más detalle sobre ellos en este artículo.



Figura 3. Rail dampers del fabricante Voestalpine instalados en una vía con balastro [18].

## 6. Ruido aerodinámico

Dentro de esta categoría se incluyen varias fuentes de ruido generadas por distintos mecanismos aerodinámicos. Los principales componentes del tren que generan ruido aerodinámico son los siguientes:

- pantógrafo y su cavidad (*recess*),
- bogie,
- testero,
- cavidad entre vagones,
- equipamiento montado sobre el techo del tren,
- rejillas, huecos, pequeñas cavidades y
- capa límite turbulenta (TBL).

Todos ellos, excepto la TBL, son protuberancias o cavidades que perturban el flujo de aire, generando turbulencias que producen ruido por sí mismas o que excitan mecanismos que producen ruido. De todas ellas, este capítulo se centrará en el pantógrafo y el bogie por ser normalmente los que más contribuyen al ruido de paso de trenes de alta velocidad [19]. En cuanto a las otras fuentes de ruido, se comentan de forma breve: la forma del testero cobra especial relevancia en la entrada del tren en túnel para evitar que se produzcan ondas de choque debido a la compresión del aire, y la generación del efecto de estruendo sonoro (*sonic boom*) en el extremo opuesto del túnel [20]; la capa límite desarrollada a lo largo de la superficie del tren puede interactuar con la cavidad entre vagones excitando sus modos propios o modos de Rossiter, teniendo el ruido generado mediante estos mecanismos un mayor impacto en el ruido interior; las rejillas, protuberancias y huecos a lo largo del tren que cumplen distintas funciones pueden ser también potenciales generadores de ruido tonal si el flujo excita sus resonancias. En la medida de lo posible, deben de evitarse que estos elementos estén expuestos directa-

mente al flujo incidente. Por último, la TBL es una fuente de carácter cuadrupolar y, por ello, tiene una eficiencia de radiación muy baja, pero se incrementa con la velocidad del tren y la superficie del tren a lo largo de la cual se desarrolla es muy extensa, por lo que el ruido producido podría no ser despreciable. Es de suponer que su importancia aumente en trenes de levitación magnética que se espera circulen a velocidades en torno a 500 km/h [21].

### 6.1. Pantógrafo

El ruido aerodinámico generado por los pantógrafos convencionales es de carácter tonal. Esto es debido a que uno el principal mecanismo de generación de ruido es el *vortex shedding*. Este mecanismo se produce cuando al interactuar con el aire incidente un cuerpo alargado (por ejemplo, un cilindro o una barra) se desprenden vórtices de manera periódica y alternativamente de su cara superior e inferior. Esto produce una fuerza fluctuante en la superficie del objeto que genera ruido de tipo dipolo. La amplitud del ruido aumentará proporcionalmente con la velocidad de flujo,  $U$ , mediante la relación  $U^6$ . La frecuencia de dicho pico vendrá definida como [22]:

$$f = St U/D \tag{1}$$

donde  $St$  es el número de Strouhal y  $D$  la dimensión característica de la barra o cilindro. La Figura 4 muestra el espectro de ruido típico producido por un pantógrafo. Dicho espectro fue obtenido durante medidas de ruido en el túnel de viento anecoico de Maibara (Japón) [23].

La contribución el pantógrafo al ruido promedio de paso del tren no suele ser relevante ya que produce un único pico en la historial temporal. Sin embargo, cuando el criterio a cumplir es de ruido máximo, normalmente éste es debido al pantógrafo. En países como Japón,

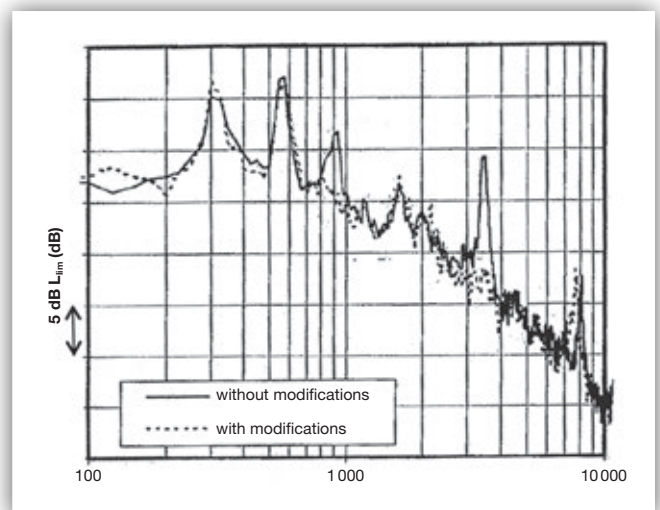


Figura 4. Espectro de ruido de un pantógrafo convencional medido en túnel de viento anecoico [23].

donde las vías del tren de alta velocidad (*Shinkansen*) pasan cerca de muchas poblaciones, está muy extendido el uso de pantallas acústicas a fin de reducir el impacto del paso del tren. En esta situación, el ruido del pantógrafo cobra especial relevancia: el resto de las fuentes de ruido son apantalladas por dichas barreras, pero éstas no tendrán efecto en el ruido del pantógrafo, situado a una altura superior a las mismas. Esto hace que el país nipón haya puesto muchos esfuerzos en el desarrollo de medidas de reducción del ruido de pantógrafo como son el uso de espumas metálicas porosas recubriendo el colector [24], control de flujo [25], reducción del número de barras y diseño aerodinámico [26], entre otros.

## 6.2. Bogie

A diferencia del ruido del pantógrafo, el ruido aerodinámico producido por el bogie y la cavidad en donde se instala es de banda ancha. En este caso no se distingue ningún mecanismo de generación de ruido periódico, sino que el ruido es producido por la recirculación de flujo turbulento alrededor de los componentes del bogie [5].

La amplitud de dicho ruido depende de la velocidad y del nivel de turbulencia del flujo incidente. Esto hace que el ruido aerodinámico del primer bogie sea mucho más elevado que el producido por el resto. Como fuente aislada el bogie no es la que más ruido produce, pero es una fuente significativa debido al elevado número de bogies que hay a lo largo del tren. Otra característica que lo hace relevante es que su energía sonora se encuentra principalmente en bajas frecuencias (por debajo de los 500 Hz). Esto hace que su transmisibilidad al interior del tren sea mayor, ya que los paramentos suelen proporcionar un menor aislamiento a ruido en bajas frecuencias.

La reducción del ruido del bogie no es tarea fácil. Puede abordarse en su generación, añadiendo deflectores antes de la cavidad que reduzcan drásticamente la velocidad del flujo que inciden en la misma. Otra estrategia es reducir su transmisión, añadiendo materiales absorbentes acústicos dentro de la cavidad que disipen parte del ruido generado. La problemática con estas soluciones es el espacio disponible para su instalación, su durabilidad al estar expuestos a suciedad y lluvia, su mantenimiento y requerimientos ignífugos. La solución más eficaz es el uso de pantallas que cierren la cavidad lateralmente. Éstas pueden estar recubiertas en su cara interior por material absorbente acústico. El beneficio de esta solución es doble: por un lado, se reduce el flujo que incide en la cavidad; por otro, se absorbe el sonido generado y se apantalla reduciendo su propagación al lateral de la vía. Esta solución, que se muestra en la Figura 5, es empleada en los *Shinkansen* japoneses [27]. El principal problema para su aplicación en Europa es el



Figura 5. Pantalla instalada en el lateral de la cavidad del bogie [27].

gálibo y ancho de los trenes, que provoca que parte de los componentes del bogie sobresalgan fuera de la cavidad, impidiendo su cierre [28].

## 7. Herramientas experimentales

La medida o cálculo de la fortaleza de cada una de las fuentes de ruido es de extrema importancia cuando se quiere estimar su contribución en un receptor. El parámetro más comúnmente utilizado para la medida de fortaleza de una fuente es la potencia acústica,  $L_w$ . Esta puede ser estimada mediante distintos métodos basados en medidas de presión sonora [29,30] o de intensidad sonora [31,32]. Para una precisión mayor, lo ideal es contar con un recinto especialmente diseñado a este fin como son una cámara anecoica o una cámara reverberante. Estos recintos permiten la aplicación de métodos de presión sonora con una precisión satisfactoria. Sin embargo, este tipo de medidas suelen ser responsabilidad de los proveedores de equipamiento y no suelen disponer de recintos de este tipo, por lo que tendrían que apoyarse en un laboratorio acústico externo.

A fin de agilizar el proceso y abaratar los costes, la alternativa que se suele utilizar es la aplicación de métodos de intensidad acústica. Éstos permiten realizar las medidas en entornos de trabajo cotidianos con un ruido de fondo no controlado. Sin embargo, este método debe de ser aplicado con cautela porque se requiere cierto grado de experiencia en el uso del equipamiento y que las condiciones de trabajo de la máquina evaluada (velocidad de rotación, carga, modo de trabajo...) sean lo más próximas a las esperadas en el tren.

En cuanto a la estimación de la transmisión del ruido desde la fuente al receptor pueden utilizarse métodos de sustitución de fuentes. Un ejemplo es colocar una fuente



de referencia potencia acústica conocida en la posición del motor y medir el ruido en uno o varios receptores dentro del tren. De esta manera podemos estimar la función de transferencia a ruido aéreo. En el caso de transmisión estructural, puede utilizarse un martillo instrumentado con un sensor de fuerza y excitar las distintas conexiones entre la fuente de ruido y el chasis del tren. Así podremos estimar la función de transferencia desde cada punto de anclaje a uno o varios acelerómetros o micrófonos de referencia. Esto requiere de experiencia ya que el montaje de la fuente influirá en los resultados. Métodos más sofisticados para clasificación de fuentes de ruido y caminos de transmisión como el Transfer Path Analysis (TPA) o el Advance TPA (ATPA) [33] son de uso común en la industria.

En cuanto al ruido de rodadura, es muy complicado estimar la potencia sonora de la rueda y raíl por técnicas experimentales, ya que se requiere que el tren esté en marcha. Los bancos de ensayos para rueda tienen normalmente un ruido de fondo demasiado alto. Es por ello por lo que se utilizan métodos de cálculo en su lugar (ver Sección 8 para más detalles). Otro método para estimar la contribución de cada fuente de ruido en el receptor es la separación de fuentes. Para ello, pueden utilizarse arrays de micrófonos (como el mostrado en la Figura 6) combinado con técnicas de *beamforming* [34].

En este caso, el principal problema radica en la separación del ruido de rueda y raíl. Al estar muy próximos es muy complicado realizar dicha separación por el método antes indicado debido a las limitaciones de resolución espacial. Actualmente se está trabajando en técnicas de



**Figura 6.** Array de micrófonos utilizado durante medidas de ruido del paso del tren [34].

separación de ruido de rueda y raíl en el marco del proyecto de colaboración europeo Shift2Rail, y más en concreto en el subproyecto FINE-2. Algunos resultados ya han sido publicados [35].

## 8. Herramientas de simulación

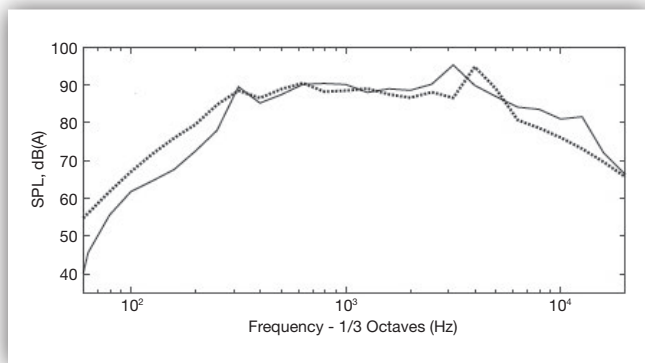
Las herramientas de simulación son de uso cada vez más común entre los fabricantes de trenes. Si bien, cuando un tren está ya construido las técnicas experimentales antes vistas permiten un análisis minucioso del ruido producido por el tren, cuando se trata del diseño de una variante de un tren existente, o de un tren completamente nuevo, no existe esa posibilidad.

Entre las distintas herramientas de simulación cabe distinguir aquellas aplicadas a nivel componente, cuyo objetivo es o bien el cálculo de la fortaleza de la fuente (i.e. potencia acústica); o bien estimar el efecto de medidas de mitigación de ruido. Para el cálculo de ruido de motores electromagnéticos la empresa francesa EOMYS ha desarrollado un software propietario llamado Manatee y otro software libre basado en Python con nombre Pyleecan [36]. El interés del sector en el cálculo del ruido motor se ha visto reflejado en el subproyecto PINTA, parte del proyecto europeo Shift2Rail, cuyo objetivo era el desarrollo de herramientas y metodologías para la simulación y reducción del ruido de motores de tracción [37].

En cuanto al ruido de rodadura el modelo de simulación de referencia en la industria es TWINS, desarrollado en el TNO en los años 90 [38]. TWINS utiliza métodos analíticos para el cálculo de la fuerza de contacto entre rueda y raíl, su vibración y ruido radiado, pero combina éstos con métodos numéricos para extraer los modos de vibración de la rueda. Recientemente han surgido métodos similares como, por ejemplo, CRoNOS que es utilizado por el fabricante CAF [39].

Respecto al ruido aerodinámico, pueden encontrarse modelos semi empíricos para el cálculo del ruido producido por el pantógrafo y el bogie [34,40,41]. Estos modelos son interesantes porque permiten estimar de manera rápida el impacto en el ruido de variaciones en la geometría de sus componentes. Así, pueden utilizarse como herramientas de ingeniería adecuadas a los tiempos de respuesta que se manejan dentro de un proyecto. La Figura 7 muestra la comparación entre el espectro de ruido de un pantógrafo medido en túnel de viento anecoico y calculado utilizando un modelo semi empírico para una velocidad de flujo de 350 km/h.

Con el desarrollo de la computación, el consiguiente incremento de la velocidad de cálculo y disminución de su coste cada vez es más frecuente el uso de modelos numéricos. Dentro de esta familia de herramientas de



**Figure 7.** Comparación entre el espectro de ruido de un pantógrafo medido en túnel de viento (línea continua) y calculado utilizando un modelo de predicción en componentes (línea punteada) para una velocidad de flujo de 350 km/h [40].

simulación hay diversos métodos atendiendo al compromiso que se desee entre precisión y velocidad de cálculo. Así, el cálculo directo del campo fluido y campo acústico mediante Direct Numerical Simulations (DNS) es muy preciso pero el más costoso, hasta el punto de que su uso parece, al menos hasta el momento, reservado a casos académicos. Métodos híbridos que resuelven las escalas de turbulencia más grandes y aproximan mediante modelos de turbulencia las escalas pequeñas son los más utilizados en la actualidad. Entre ellos destacan el Large Eddy Simulation (LES), Delayed Deattached Eddy Simulation (DDES) [42], Scale-Adaptative Simulations (SAS) [43], entre otros. Todos los métodos nombrados hasta ahora se basan en la resolución de la ecuación de Navier-Stokes. Sin embargo, ha irrumpido con fuerza el método de Lattice-Boltzman (LBM) que se basa en partículas ficticias que se propagan y colisionan consecutivamente dentro de una celosía discreta.

Para simulaciones del ruido del tren completo cada fabricante tiene su propio código. Suelen basarse en modelos analíticos para el cálculo de la propagación desde la fuente al receptor, incluyendo el efecto de apantallamiento del chasis del tren, las interferencias debidas a las reflexiones en el terreno, etc. Las entradas a dichos modelos suelen ser la potencia y directividad de cada una de las fuentes de ruido, su posición y la geometría del tren. En este sentido, Alstom cuenta con su herramienta de cálculo llamada SITARE [44], que permite además el cálculo mediante trazado de rayos (*ray tracing*) del campo sonoro dentro de la cavidad bogie. Otro ejemplo de software de simulación de ruido de tren completo es Brains de Bombardier [45].

En cuanto a ruido interior, además de tener en cuenta la potencia sonora y directividad de las fuentes de ruido se necesita calcular la función de transferencia desde la fuente a varios puntos en la superficie de los distintos paramentos del tren (suelo, muros laterales, etc.), su ais-

lamiento acústico y la respuesta al impulso del recinto interior del vagón o cabina.

## 9. Tendencias y futuras líneas de trabajo

En la actualidad diversos campos de la Acústica y el Control de Ruido y Vibraciones están en boga y, como consecuencia, su aplicación a la industria ferroviaria está siendo implementada. Por ejemplo, los avances recientes en metamateriales acústicos coincidiendo con el desarrollo de la impresión 3D son potencialmente aplicables a la resolución de problemas de ruido en ferrocarril. Dichos metamateriales permiten el diseño de estructuras más ligeras y de menos grosor que el necesario si se utilizan materiales porosos convencionales.

En cuanto al control de ruido estructural la tendencia es el uso de los denominados Acoustic black holes (ABH). Un ABH es un método de control pasivo de vibración que consiste en introducir una no homogeneidad en una estructura fina [46]. Ésta se basa en una combinación de reducción de rigidez y un incremento del amortiguamiento local mediante el uso de material viscoelástico, que provocan una reducción de la velocidad de la onda mecánica y un incremento muy significativo de su atenuación [46]. El diseño de carcasas de equipamiento basados en estas geometrías permitiría una gran atenuación de la vibración y una reducción significativa del ruido estructural dentro del tren. Sería necesario acomodar estas soluciones a las restricciones típicas de durabilidad, resistencia a choques, etc.

Técnicas de análisis de datos como aprendizaje máquina e inteligencia artificial (AI) permiten obtener más información de señales que actualmente ya se miden en el tren. Esto puede ser de gran ayuda para el mantenimiento predictivo, por ejemplo, de ejes o componentes del bogie a partir de la vibración medida, pero también podría utilizarse para control del ruido.

Las industrias están inmersas en un proceso de digitalización, lo que hace presagiar que las simulaciones numéricas estarán cada vez más presentes en el día a día de los ingenieros acústicos del sector ferroviario. Una posible aplicación de las simulaciones es la certificación virtual de trenes. En esta línea surgió hace pocos años el proyecto europeo ACOUTRAIN que buscaba simplificar el proceso de certificación de trenes nuevos. Para que los resultados de las simulaciones sean fiables y gocen de la confianza de los operadores y socios de proyecto es necesario conseguir metodologías de simulación validadas y con una incertidumbre controlada. A este respecto, ya se han empezado a publicar metodologías de estimación de incertidumbre de predicción [47, 48].

## 10. Conclusiones

La exigencia a los fabricantes de trenes en cuanto al cumplimiento de límites de ruido se ha incrementado en los últimos años, ya sea por las directrices internacionales y nacionales de obligado cumplimiento como por los requisitos contractuales del cliente. Esto hace que sea necesario contar con expertos en Acústica que identifiquen las principales fuentes de ruido del tren y que conozcan los mecanismos de generación de ruido para poder aplicar medidas de control eficaces. Además, es necesario invertir tanto en herramientas experimentales como de simulación para poder evaluar los riesgos durante todas las fases del proyecto y cuantificar el efecto de medidas de mitigación. La aplicación de los últimos avances en disciplinas como los metamateriales y los ABH podrían dar resultados prometedores. Además, el proceso de digitalización de la industria parece que potenciará el uso de simulaciones para el control del ruido, siendo uno de los objetivos la certificación virtual del tren.

## Referencias

- [1] TSI noise, Reglamento (UE) No 1304/2014 de la comisión. (2014, november, 26). *Sobre la especificación técnica de interoperabilidad aplicable al subsistema «material rodante-ruido»*. Disponible: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1304&from=ES>.
- [2] UK Gov., Department of Transport (2013, Nov. 25). *HS2 Phase One environmental statement volume 5: sound, noise and vibration*. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/hs2-phase-one-environmental-statement-volume-5-sound-noise-and-vibration>
- [3] *Aplicaciones ferroviarias. Acústica. Medición del ruido emitido por vehículos que circulan sobre carriles*. (ISO 3095:2013), UNE-EN ISO 3095:2014, 2014.
- [4] *Aplicaciones ferroviarias. Acústica. Medición del ruido en el interior de vehículos sobre carriles*. (ISO 3381:2005), UNE-EN ISO 3381:2011, 2011.
- [5] D.J.Thompson, *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*, 1st edition. Oxford, United Kingdom: Elsevier, 2008.
- [6] International Union of Railways (UIC). (2018, Apr.). *Environmental Noise Directive Development of Action Plans for Railways*.
- [7] EOMYS website, <https://eomys.com/e-nvh/technical-notes-on-electromagnetically-excited-noise-and-vibrations/article/review-of-noise-sources-in-electric-machines> (accessed Oct. 31, 2021).
- [8] A. Bistagnino, “Reducing noise pollution of urban areas: new advances for railway vehicles,” presented at the 7th Transport Research Arena (TRA), Vienna, Austria, Apr. 16-19, 2018,
- [9] <https://www.globalrailwayreview.com/article/75961/acoustic-noise-prediction-train-design/> (accessed Oct. 31, 2021).
- [10] *Aplicaciones ferroviarias. Acústica. Medición de la rugosidad de los carriles y de las ruedas relacionada con la generación de ruido de rodadura*. UNE-EN 15610:2020, 2020.
- [11] *Aplicaciones ferroviarias. Acústica. Determinación de la rigidez dinámica de los componentes de vía elástica relacionados con el ruido y la vibración. Almohadillas de carril y conjuntos de fijación de la vía*. PNE-prEN 17495, 2020.
- [12] *Aplicaciones ferroviarias. Emisión de ruido. Caracterización de las propiedades dinámicas de las secciones de vía para la medición del ruido de paso*. UNE-EN 15461:2008+A1:2011, 2011.
- [13] G. Hölzl, “A quiet railway by noise optimised wheels,” (in German). *ZEV p DET Glas. Ann.*, vol. 188 (1), pp. 20–23, 1994.
- [14] C. Jones, D.J. Thompson, A. Frid and M. Wallentin, “Design of a railway wheel with acoustically improved cross-section and constrained layer damping,” presented at the Internoise Conf., Nice, France, Aug. 27-30, 2000.
- [15] P. Bouvet, N. Vincent, A. Coblenz and F. Demilly, “Rolling noise from freight railway traffic: reduction of wheel radiation by means of tuned absorbers,” presented at the Internoise Conf., Nice, France, Aug. 27-30, 2000.
- [16] I. Lopez, J. Vinolas, J. Busturia and A. Castanares, “Railway wheel ring dampers,” presented at the Internoise Conf., Nice, France, Aug. 27-30, 2000.
- [17] <https://sundv.de/en/rail-vehicles/> (accessed Oct. 31, 2021).
- [18] <https://www.voestalpine.com/nortrak/en/products/Rail-Dampers/> (accessed Oct. 31, 2021).
- [19] C. Mellet, F. Letourneaux, F. Poisson and C. Talotte, “High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293, no. 3, pp. 535-546, 2006.
- [20] K. Kikuchi, M. Iida, and T. Fukuda, “Optimization of train nose shape for reducing micro-pressure wave radiated from tunnel exit”, *Journal of Low Frequency*

- Noise, Vibration and Active Control*, vol. 30(1), pp. 1-19, 2011
- [21] M. Ono, S. Koga and H. Ohtsuki, (2002). "Japan's superconducting maglev train". *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 5(1), pp. 9-15, 2002.
- [22] M.M. Zdravkovich, "Flow Around Circular Cylinders, Fundamentals," vol.1, Oxford, UK: Oxford University Press, 1997.
- [23] T. Lölgen, "Wind tunnel noise measurements on full-scale pantograph models," Proc. Joint ASA/EAA Meeting, Berlin, Germany, 1999.
- [24] T. Sueki, M. Ikeda and T. Takaishi "Aerodynamic noise reduction using porous materials and their application to high-speed pantographs," *Quarterly Report of RTRI*, Vol. 50(1), pp. 26-31, 2009.
- [25] T. Mitsumoji *et al.*, "Aerodynamic noise reduction of a pantograph panhead by applying a flow control method," in *Proc. of the 11th Int. Workshop on Railway Noise*, in Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems vol. 126, pp. 515-522, 2015.
- [26] T. Kurita *et al.*, "Reduction of pantograph noise of high-speed trains," *J. Mech. Syst. Transport. Logist.*, vol. 3(1), pp. 63-74, 2010
- [27] T. Kurita, "Development of external-noise reduction technologies for Shinkansen high-speed trains," *J. Envir. Eng.* vol. 6(4), pp. 805-819, 2011.
- [28] D.J. Thompson, E. Latorre Iglesias, X. Liu, J. Zhu, Z. Hu, "Recent developments in the prediction and control of aerodynamic noise from high-speed trains," *Int. J. Rail Transp.*, vol. 3(3), pp. 119-150, 2015.
- [29] *Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de las fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio en cámaras reverberantes.* (ISO 3741:2010), UNE-EN ISO 3741:2011, 2011.
- [30] *Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica y de los niveles de energía acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica. Métodos de laboratorio para cámaras anecoicas y semi-anecoicas.* (ISO 3745:2012), UNE-EN ISO 3745:2012, 2012.
- [31] *Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica de las fuentes de ruido a partir de la intensidad del sonido. Parte 1: Medición en puntos discretos.* (ISO 9614-1:1993), UNE-EN ISO 9614-1:2010, 2010.
- [32] *Acústica. Determinación de los niveles de potencia acústica emitidos por las fuentes de ruido por intensidad del sonido. Parte 2: Medición por barrido.* (ISO 9614-2:1996), UNE-EN ISO 9614-2:1997, 1997.
- [33] F.X. Magrans, P.V. Rodriguez, G.C. and C. des Prés, "Low and mid-high frequency advanced transmission path analysis," presented at the 12th Int. Congr. on Sound and Vibration, Lisbon, Portugal, Jul. 11-14, (2005).
- [34] X. Liu, J. Zhang, D.J. Thompson, E. Latorre Iglesias, G. Squicciarini, Z. Hu, M. Toward and D. Lurcock, "Aerodynamic noise of high-speed train pantographs: Comparisons between field measurements and an updated component-based prediction model," *Appl. Acoust.*, vol. 175, pp. 107791, 2021.
- [35] D.J. Thompson *et al.*, "Assessment of measurement-based methods for separating wheel and track contributions to railway rolling noise", *Appl. Acoust.*, vol. 140, pp. 48-62, 2018.
- [36] P. Bonneel, J. Le Besnerais, R. Pile, and E. Devillers, "Pylecan: an open-source Python object-oriented software for the multiphysic design optimization of electrical machines," presented at the 13th Int. Conf. on Electl Machines, Alexandroupoli, Greece, Sept. 3-6, 2018.
- [37] <https://cordis.europa.eu/project/id/730668/reporting/es> (accessed Oct. 31, 2021).
- [38] D.J. Thompson, B. Hemsworth, B and N. Vincent, "Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1: description of the model and method," *J. Sound Vib.*, vol. 193(1), pp. 123-135, 1996.
- [39] A. Guiral, M. Olazagoitia and E. Iturritxa, "CRoNoS Railway Noise Prediction Tool: Description and Validation Based on Field Tests," in *Proc. of the 13th Int. Workshop on Railway Noise*, in Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, vol. 150, 2021, pp. 581-588.
- [40] E. Latorre Iglesias, D. J. Thompson and M.G. Smith, "Component-based model to predict aerodynamic noise from high-speed train pantographs", *J. Sound Vib.*, vol. 394, pp. 280-305, 2017.
- [41] E. Latorre Iglesias, "Component-based Model to Predict Aerodynamic Noise from High-Speed Trains," Ph.D dissertation, Univ. Of Southampton, Southampton, UK, 2015.
- [42] J. Y. Zhu, Z. W. Hu and D.J. Thompson, "The effect of a moving ground on the flow and aerodynamic noi-

- se behaviour of a simplified high-speed train bogie,” *Int. J. Rail Transp.*, vol. 5(2), pp- 110-125, 2017.
- [43] J. Muñoz-Paniagua, J. García and B. Lehugeur, “Evaluation of RANS, SAS and IDDES models for the simulation of the flow around a high-speed train subjected to crosswind”, *J. Wind Eng. Ind. Aerod.* Vol. 171, pp. 50-66, 2017.
- [44] N. Gambard, J. Sapena and V. Planeau, “A methodology for exterior noise prediction of railways rolling stock,” presented at the 8th European Conf. on Noise Control, Edinburgh, Scotland, UK, Oct. 26-28, 2009.
- [45] A. Frid, U. Orrenius, T. Kohrs and S. Leth, “BRAINS the concepts behind a quick and efficient tool for prediction of exterior and interior railway vehicle noise,” presented at the Acoustics Conf, Nantes, France, Apr. 23-27, 2012.
- [46] A. Pelat, F. Gautier, S.C. Conlon and F. Semperlotti, “The acoustic black hole: A review of theory and applications,” *J. Sound Vib.*, vol. 476, pp. 115316, 2020.
- [47] E. Latorre Iglesias, J. Xia, M.E. Farooq, A. Bistagnino and J. Sapena, “Methodology to evaluate the uncertainty of train exterior noise prediction,” *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C*, vol. 233(18), pp. 6460-6472, 2019.
- [48] E. Latorre Iglesias, A. L. Gomes Neves, A. Bistagnino and J. Sapena, “Application to Real Cases of a Methodology to Evaluate the Uncertainty of Train Exterior Noise Predictions”, in *Proc. of the 13th Int. Workshop on Railway Noise*, in Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, vol. 150, 2021, pp. 225-233.



Envíese a: **Revista Española de Acústica - SEA**  
 e-mail: [secretaria@sea-acustica.es](mailto:secretaria@sea-acustica.es)  
<http://www.sea-acustica.es>

Estoy interesado en:

- **ASOCIARME A LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ACÚSTICA**
- **SUSCRIBIRME A LA REVISTA DE ACÚSTICA**

Apellidos: \_\_\_\_\_ Nombre: \_\_\_\_\_

Dirección para correspondencia: \_\_\_\_\_

C.P.: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_ Provincia: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_

Centro de trabajo: \_\_\_\_\_

Puesto de trabajo: \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

C.P.: \_\_\_\_\_ Ciudad: \_\_\_\_\_ Provincia: \_\_\_\_\_

Tel.: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_ e-mail: \_\_\_\_\_