

## MEDICIÓN EN CAMPO CERCANO DEL RUIDO EMITIDO POR TRENES DE ALTA VELOCIDAD: POSIBILIDADES Y RETOS

Jaume Solé Bosquet <sup>1\*</sup>  
Pierre Huguenet <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> SENER Mobility S.A.U.

### RESUMEN

La progresiva implantación de líneas ferroviarias de alta velocidad junto con la creciente preocupación por el impacto ambiental que conllevan ha destacado la necesidad de aminorar su emisión de ruido hasta niveles que puedan resultar aceptables. En ferrocarriles de alta velocidad cobra importancia el ruido aerodinámico, difícil de atenuar por emitirse a mayor altura. Por ello, los requisitos de emisión de ruido aerodinámico en nuevas unidades deben ser exigentes y debe ser posible evaluar cuantitativamente y de manera sencilla las diferentes contribuciones. El artículo presenta una posibilidad sencilla para lograrlo, indicando los retos asociados y las vías adecuadas para superarlos.

### ABSTRACT

High speed railway lines are increasingly being operated in many countries, often with remarkable commercial success. In parallel, environmental issues related to noise emissions are gaining importance. On top on classic railway noise sources (motor, rolling noise) high speed lines have significant aerodynamic noise emissions. Some of the most important of these aerodynamic noise emissions are placed in the upper parts of the train, and for this reason are harder to mitigate by means of conventional noise barriers. For this reason, aerodynamic noise requirements for new rolling stock shall be demanding and numerically evaluable in a reasonably simple way. This article presents a straightforward approach for achieving this numerical evaluation of aerodynamic noise emission levels in high-speed trains, indicating the challenges involved and possible strategies for overcoming them.

**Palabras Clave**— high-speed railways, aerodynamic noise, noise apportionment, near field, high pressure microphones, Aeronoise, HS2, Shift2Rail, TRAFIC, pass-by measurements.

### 1. INTRODUCCIÓN

La creciente implantación de líneas ferroviarias de alta velocidad, unida a la cada vez mayor sensibilidad ambiental con respecto a sus emisiones asociadas de ruido, han motivado la realización de múltiples estudios especializados al respecto. Una de las iniciativas recientes más remarcables es el proyecto “Aeronoise”, de la Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC). Este proyecto se ha orientado a proponer una nueva metodología de medición de ruido al paso de unidades ferroviarias, tal que cumpla los siguientes requisitos:

- Permita discernir (de manera cuantitativa) las contribuciones de ruido aerodinámico, particularmente las originadas en las partes más altas del tren (por ser más difíciles de atenuar mediante barreras acústicas).
- El procesado de la información medida debe ser sencillo en comparación con los procesados usuales en mediciones utilizando *arrays* de micrófonos.
- La instrumentación debe utilizar micrófonos de medición comerciales (disponibles en catálogo de fabricantes especializados) y de coste moderado.

El proyecto *Aeronoise* se encuentra actualmente en fase de finalización, esperándose la publicación del informe final con los detalles de la metodología propuesta para finales de 2023.

### 2. VENTAJAS DE LAS MEDICIÓN EN CAMPO CERCANO DEL RUIDO FERROVIARIO AL PASO

Las mediciones de ruido ferroviario al paso clásicas, a las distancias-tipo de 7.5m y 25m según el estándar ISO-3095 [1], presentan el inconveniente de que las contribuciones de las diferentes fuentes aparecen ya muy mezcladas en los puntos de medición. Ello es así dado que la diferencia de distancias entre el punto de emisión y el punto de medición

\* **Autor de contacto:** [jaume.sole@sener.es](mailto:jaume.sole@sener.es)

**Copyright:** ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

es baja, y también a que suele existir visibilidad directa entre el punto de emisión de cada fuente de ruido y el punto de medición en dicho *set-up*.

Con respecto a la instrumentación convencional definida en el estándar ISO-3095, las ventajas asociadas a una estrategia de medición de ruido en campo cercano son las siguientes:

- La diferencia comparativa de distancias entre el punto de emisión de cada fuente de ruido y las diferentes posiciones de medición puede ser más grande, favoreciendo la identificación de fuentes dominantes y su cuantificación.
- Es posible aprovechar el propio cuerpo del tren como apantallamiento de unas fuentes de ruido respecto de otras, con la consiguiente mejora en la identificación de fuentes.

Ambas ventajas redundan en una mayor posibilidad de identificar y cuantificar por separado las diferentes fuentes de ruido implicadas.



**Figura 1.** Antecedentes de mediciones en campo cercano de ruido al paso de una unidad de alta velocidad, realizadas en la red de Adif en el marco del proyecto de alta velocidad británico HS2 [2].

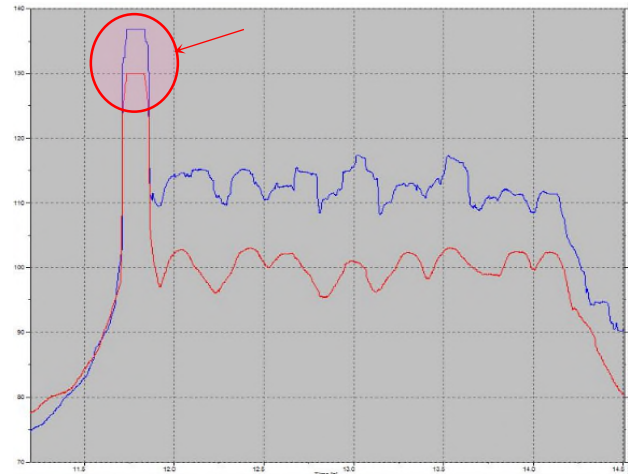
### 3. RETOS ASOCIADOS A LAS MEDICIONES EN CAMPO CERCANO DE RUIDO AL PASO DE UNIDADES DE ALTA VELOCIDAD

En paralelo a las ventajas, la realización de mediciones en campo cercano de ruido al paso de trenes de alta velocidad presenta diferentes retos de orden práctico. Los más relevantes son los siguientes:

- Necesidad de un soporte cercano para los micrófonos que esté sólidamente fijado y no plantee el riesgo de caer accidentalmente en la vía y e impactar con el tren. Los trípodes clásicos, en función de su altura y distancia, pueden plantear problemas serios al respecto.
- Consideraciones de seguridad. Los problemas asociados son dobles: el riesgo de colisión de soportes o sensores contra la vía, y el riesgo

eléctrico en caso de contacto accidental con la catenaria en micrófonos instalados a gran altura.

- Saturación de las membranas de los micrófonos por la onda de presión cuasi-estática a la llegada del tren (ver figura 2). Esta onda cuasi-estática de alta presión puede invalidar cualquier medición acústica al inicio del paso del tren, particularmente en los micrófonos situados a menor altura a causa del efecto suelo en la presión.



**Figura 2.** Saturación de la membrana de los micrófonos de medición bajos cercanos debido al pico de presión cuasi-estática al inicio del paso del tren. Datos obtenidos en los ensayos de referencia para HS2 en la red de Adif [2].

### 4. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

La experiencia previa alcanzada indica que las dificultades identificadas en la sección anterior pueden ser abordadas con éxito, de acuerdo con las siguientes estrategias:

- Aprovechamiento de estructuras preexistentes al lado de la vía, tales como postes o portales de catenaria. Estas estructuras presentan la ventaja de estar sólidamente cimentadas y constituir una base robusta para la instalación de micrófonos, con una mínima distorsión en la medida a causa de reflexiones en su propia superficie.
- Justificación de la seguridad de las medidas en base a los siguientes factores: mínima masa de los sensores asociados (menor a la de un pájaro que pudiera accidentalmente impactar en el tren), fijación segura de cables mediante bridas de seguridad (incluso de acero si las circunstancias lo aconsejan), instrumentación y des-instrumentación de la vía fuera de su horario de operación.

- Uso de micrófonos especiales planos de alta presión (ver figuras 3 y 4), disponibles comercialmente con capacidades de medición de hasta 184 dB.



**Figura 3.** Ejemplo de micrófono comercial plano de alta presión (modelo GRAS 48LA), capaz de medir 184 dB.

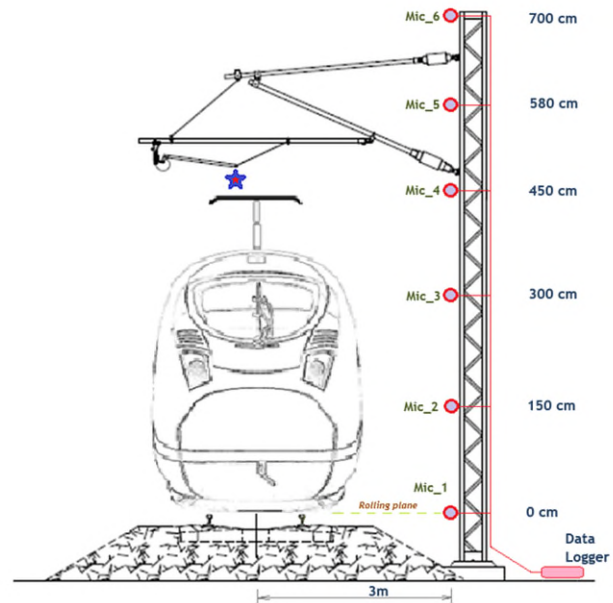


**Figura 4.** Instrumentación vibro-acústica en campo cercano utilizando un micrófono comercial plano instalado en la traviesa de una línea de alta velocidad, combinado con acelerómetros instalados en el raíl [2].

#### 4. AERONOISE: HACIA UNA PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN ACÚSTICA EXTENDIDA

Tomando como base la experiencia adquirida durante los ensayos de mediciones en campo cercano realizados en la red española de Adif por encargo de HS2, se ha desarrollado a instancias de la UIC una nueva metodología de medición acústica. Esta metodología, desarrollada en el ámbito del proyecto UIC *Aeronoise*, consiste en una propuesta de instrumentación y postproceso comparativamente simple, capaz de proporcionar una cuantificación espacial discreta de las diferentes fuentes de ruido implicadas en el paso a alta velocidad de una unidad ferroviaria. Más concretamente, la propuesta se basa en una instrumentación con 6 micrófonos instalados a diferentes alturas en un poste de catenaria (ver

figura 5), a una distancia de referencia de 300cm al eje de la vía. El uso de postes de catenaria como soporte de los micrófonos, aun no siendo imprescindible, resulta conveniente desde el punto de vista de la simplicidad y de la seguridad (cabe destacar que dichos postes, además de su solidez estructural, están siempre derivados a masa eléctrica).



**Figura 5.** Instrumentación en campo cercano propuesta en el marco del proyecto *Aeronoise* de la UIC [3].

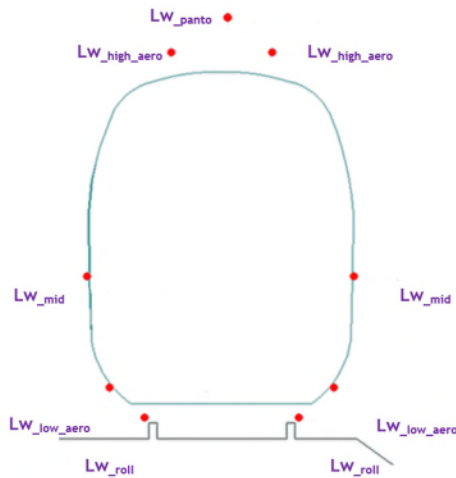
Las siguientes subsecciones detallan los tres pasos fundamentales en la estimación de los niveles de emisión de ruido a diferentes alturas, a partir de los niveles de ruido medidos en los 6 micrófonos de referencia en la figura 5.

##### 5.1. Cálculo preliminar de factores de visibilidad acústica

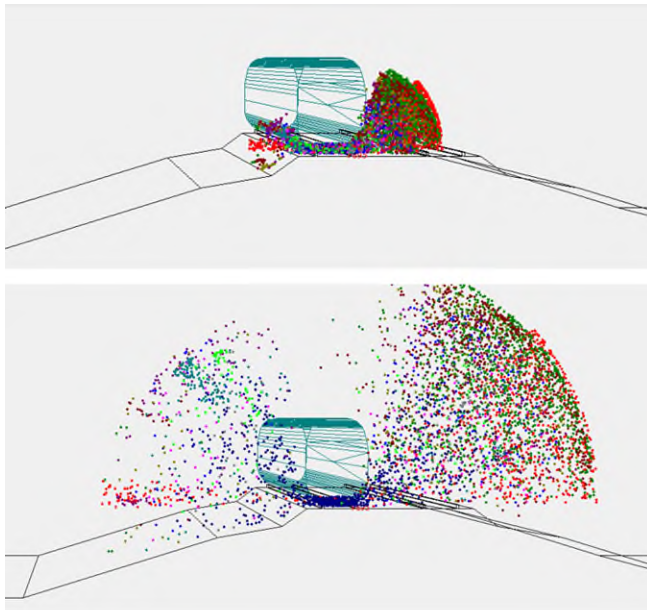
El primer paso en la metodología consiste en el cálculo de los factores de transferencia entre las fuentes lineales de emisión de ruido consideradas en el modelo (ver figura 6) y los diferentes micrófonos en el *set-up* mostrado en la figura 5. Estos factores de transferencia son referenciados como *factores de visibilidad acústica*; nomenclatura escogida por reflejar de manera intuitiva el papel del cuerpo del tren en el enmascaramiento relativo de las diferentes fuentes de ruido en los diferentes puntos de medición acústica descritos en la figura 5.

El cálculo de dichos *factores de visibilidad acústica* puede realizarse mediante simulación acústica de trazado masivo de rayos, utilizando al efecto herramientas especializadas (ver figura 7). Si bien se trata de una tarea que comúnmente se reserva a técnicos especializados, el método *Aeronoise* propone como alternativa simplificada el uso de factores de visibilidad acústica pre-calculados. Estos factores de visibilidad acústica pre-calculados pueden encontrarse en el

documento metodológico del proyecto *Aeronoise* [3], para las posiciones de medición y fuentes de ruido indicadas en las figuras 5 y 6 respectivamente. Se ofrecen en dicho documento dos diferentes juegos de factores de visibilidad precalculados, uno calculado con la sección típica de un tren de alta velocidad y un piso, y otro con la sección típica de un tren de alta velocidad de dos pisos.



**Figura 6.** Fuentes elementales de ruido ferroviario previstas en el proyecto *Aeronoise* [3]. Para las fuentes situadas por debajo del techo del tren cada fuente se divide en dos de igual nivel de emisión, situadas cada una a un lado del tren.



**Figura 7.** Estimación analítica de factores de visibilidad acústica en un tren tipo utilizando software especializado de trazado de rayos acústicos (*Odeon*).

## 5.2. Resolución del sistema no lineal de ecuaciones asociado

Una vez estimados analíticamente los factores de visibilidad acústica, se procede a resolver el sistema de ecuaciones (no lineal si se ha planteado en dB), obteniéndose con ello la estimación de la potencia de emisión de cada una de las fuentes. Siendo el número de micrófonos superior al número de incógnitas de emisión (aunque algunas estén divididas en dos mitades iguales a cada costado del tren) el sistema típicamente alcanza solución. El procedimiento *Aeronoise* reportado en [3] incluye una serie de parámetros y directivas concretas para realizar dicha resolución utilizando el *solver* no lineal de la aplicación *Excel*, ampliamente disponible. La batería de pruebas realizada durante el desarrollo del método muestra, para el caso de fuentes con niveles conocidos, que el nivel de acierto obtenido es muy alto, salvo en el caso de las fuentes a bajo nivel (ruido de rodadura y aerodinámico). Por su cercanía espacial, la separación entre ambas fuentes requiere de procedimientos específicos que se describen resumidamente en la siguiente sección.

## 5.3. Separación del ruido de rodadura del aerodinámico a bajo nivel

Como se ha indicado, la separación de las fuentes situadas a baja altura (ruido de rodadura y ruido aerodinámico a baja altura) resulta inviable mediante el procedimiento descrito previamente, dada la cercanía espacial de ambas fuentes. Es posible, sin embargo, cuantificar globalmente mediante dicho procedimiento el conjunto de ambas emisiones a baja altura, y aplicar a posteriori técnicas específicamente diseñadas para alcanzar esta separación. El documento metodológico redactado dentro del proyecto *Aeronoise* [3] recoge diferentes sugerencias al respecto. Las sugerencias al respecto en dicho documento van desde las más sencillas basadas en leyes empíricas validadas en estudios previos, hasta las más avanzadas basadas en la medición de la rugosidad del raíl, el uso de software especializado de evaluación del ruido de rodadura (*TWINS*) u otras alternativas de reciente desarrollo analizadas dentro del proyecto europeo Shift2Rail TRANSIT [4][5].

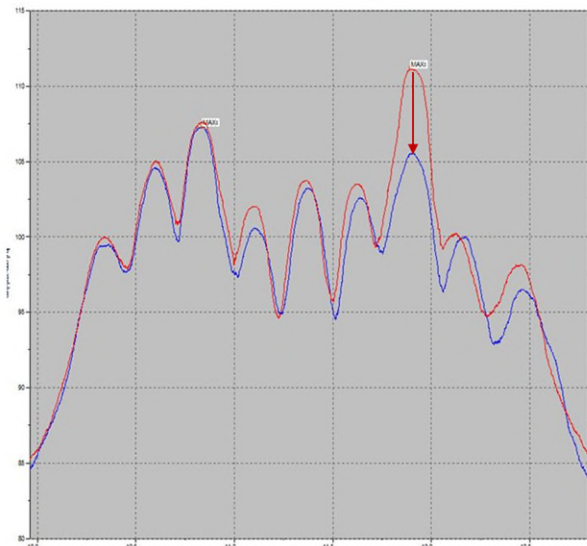
## 5.4. Refinamiento en la separación de ruido aerodinámico del pantógrafo y el ruido aerodinámico general a nivel de techo

Si bien el método anteriormente descrito permite alcanzar una razonable discriminación entre el ruido del pantógrafo, es posible mejorar dicha discriminación con técnicas alternativas. Las dos más destacables son las siguientes:

- Realización de diferentes pasos a la misma velocidad, unos con el pantógrafo levantado y otros con el pantógrafo bajado y tren moviéndose por inercia. De la comparación de niveles medidos es posible estimar la intensidad de emisión de ruido del pantógrafo por

separado (ver figura 8), y de ahí la remanente de nivel de ruido aerodinámico emitido a la altura del techo del tren.

- Aprovechando la circunstancia de ser el pantógrafo la fuente de ruido dominante a alta y muy alta velocidad en el indicador  $L_{p_{max}}$  es posible estimar la intensidad de emisión del pantógrafo asumiendo que en el micrófono más alto del *set-up*, durante el momento del máximo de ruido, el resto de fuentes de ruido son comparativamente negligibles en comparación con el pantógrafo. A partir de esta primera cuantificación y conociendo el valor del conjunto resulta posible cuantificar separadamente los niveles de emisión de ruido aerodinámico en la parte alta del tren.



**Figura 8.** Cuantificación del ruido de pantógrafo mediante pasos sucesivos con el pantógrafo levantado y bajado. Puede observarse la bajada en el pico de emisión del pantógrafo en el paso de la unidad con el mismo bajado.

## 6. CONCLUSIONES

La conclusión fundamental del presente artículo es que resulta posible alcanzar una razonable separación experimental de las diferentes contribuciones de ruido al paso de unidades de alta velocidad mediante un montaje en campo cercano utilizando un número moderado de micrófonos y de acuerdo con un procesado sencillo. Se han identificado los potenciales problemas, ofreciéndose vías concretas de solución.

Como se ha mencionado en la presente contribución, esta metodología ha nacido de los trabajos previos realizados para HS2 en la red española de alta velocidad de Adif, y ha constituido la base de los recientes desarrollos en el proyecto *Aeronoise* de la UIC, cuya propuesta metodológica completa en sus detalles es, como se ha mencionado, de inminente publicación [3].

## 7. REFERENCIAS

- [1] International Standards Organisation *ISO 3095:2013 "Acoustics — Railway applications — Measurement of noise emitted by railbound vehicles"*.
- [2] Solé Bosquet Jaume, Huguenet Pierre, Sica Gennaro, "Pass-by noise assessment of high-speed units by means of acoustic measurements in a perimeter close to the train" 13th International Workshop on Railway Noise (IWRN13), 2019.
- [3] UIC Aeronoise Team "Measurement and analysis systems to characterize the aerodynamic noise of high-speed trains - Technical Report: Methodology" (to be published before December 2023).
- [4] Shift2Rail TRAFIC project deliverable D2.1 "Train pass-by noise source characterization and separation tools for cost-effective vehicle certification. Report on state of the art, strategy, and requirements for new separation techniques", September 2020.
- [5] Shift2Rail TRAFIC project deliverable D3.2 "Train pass-by noise source characterization and separation tools for cost-effective vehicle certification. Track and vehicle separation and transposition techniques including theoretical description and proposal for full scale validation test campaign", January 2022.
- [6] UIC Aeronoise Team "Measurement and analysis systems to characterize the aerodynamic noise of high-speed trains - Technical Report: Benchmark Studies", June 2022.
- [7] A.Martens, J.Wedemann, N.Meunier, A.Leclere "High speed train noise – Sound source localization at fast passing trains" Forum Acusticum Sevilla, 2002.
- [8] X.Liu, J.Zhang, D.J. Thompson, E.L. Iglesias, G. Squicciarini, M. Toward and D. Lurcock "Aerodynamic noise of high-speed train pantographs: comparisons between field measurements and an updated component-based prediction model" *Journal of Applied Acoustics*, 175, 2021.
- [9] M.Genescà, J.Solé, J.Romeu, G.Alarcón "Pantograph noise measurements in Madrid-Sevilla high speed train (AVE)" *Internoise 2004*.
- [10] H.M.Noh "Noise-source identification of a high-speed train by noise source level analysis" *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: Journ. Rail and Rapid Transit* 0(0) 1–12, 2016.
- [11] Zhao Yue-Ying, Yang Zhi-gang, Li Qi-Liang, Xia Chao, "Analysis of the near-field and far-field sound pressure generated by high-speed trains pantograph system", *Applied Acoustics* 169, 2020.
- [12] Solé Jaume, Huguenet Pierre, Sica Gennaro, "Evolution of pantograph noise directivity at increasing speeds", *INTER-NOISE 2019, 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, Madrid, Spain, 2019.
- [13] Janssens, M.H.A., Dittrich, M.G., de Beer F.G., Jones C.J.C. "Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay" *Journal of Sound and Vibration* 293 (2006) 1007–1028.