

UN NUEVO MÉTODO DE CÁLCULO DE NIVELES DE RUIDO DEBIDOS AL FERROCARRIL

Andoni Borjabaz Modrego, Ernesto García Vadillo

Escuela T.S. Ingenieros Industriales. Universidad del País Vasco

Alda. Urquijo s/n, 48013 - Bilbao

Tel.: 94.427.80.55; Fax: 94.441.40.41

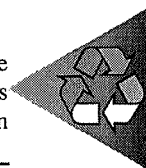
Email: impgavae@bi.ehu.es

RESUMEN

Se presenta un método de obtención de los niveles de ruido medioambiental producidos por el tráfico ferroviario en el entorno de la vía. El trabajo se restringe al caso de propagación por vía aérea en líneas de superficie. Se indican los factores considerados con el fin de dotar al método de la máxima generalidad posible, y de hacerlo apto para estudiar tanto las situaciones propias de ferrocarriles ligeros, como las de ferrocarriles urbanos, ferrocarriles de velocidad alta y líneas de alta velocidad. Se comparan estos factores con los considerados en otros métodos existentes. Se consideran igualmente las situaciones en las que el ruido debido al tráfico ferroviario se añade al ruido medioambiental producido por el tráfico de carretera. Se muestra la influencia que la directividad en la emisión de la rodadura ferroviaria tiene sobre los niveles de inmisión. Los factores antes referidos se han implementado en el paquete IMPACT, desarrollado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco. Mediante dicho paquete se han obtenido los ejemplos que se presentan al final de la ponencia.

1. INTRODUCCIÓN

Al igual que los restantes medios de transporte, el ferrocarril es causante de niveles de ruido que pueden llegar a valores elevados en la proximidad de la vía. Ante situaciones ya existentes con niveles de ruido superior a lo admisible, resulta necesaria la adopción



de costosas medidas correctoras, como instalar barreras acústicas, cuya eficacia es preciso conocer con anterioridad a su incorporación. Por otra parte, en el caso de nuevos proyectos ferroviarios, las disposiciones legales vigentes obligan a la realización del estudio de impacto ambiental, uno de cuyos aspectos es la valoración del impacto acústico, y la consideración de las posibles medidas correctoras.

Todo ello obliga a contar con herramientas de simulación de los niveles de ruido medioambiental debidos a la circulación ferroviaria. Dichas herramientas deben ser capaces de caracterizar con precisión la potencia de emisión de las diversas fuentes del ferrocarril en movimiento (rodadura, posibles juntas de carril, paso por cruzamientos, ruido aerodinámico, ruido del pantógrafo, señales acústicas producidas por el tren, ruido de los motores de tracción), así como la potencia de emisión de otras fuentes estáticas en la vía, como por ejemplo las posibles señales acústicas en los pasos a nivel. Asimismo, debe ser posible caracterizar la propagación del sonido por vía aérea, -teniendo en cuenta que algunas de las fuentes anteriores son de tipo lineal y otras de tipo puntual- y caracterizar las diferentes atenuaciones que se producen debidas el aire, a la humedad o a los diversos tipos de terreno. Las herramientas de simulación deben considerar igualmente los eventuales campos reverberantes que se producirán en situaciones de edificaciones próximas a la vía, así como la influencia de taludes en el terreno, de pantallas o de otros edificios que den lugar a una difracción del sonido.

Las diferentes administraciones ferroviarias han adoptado normativas en las que se consideran los factores antes mencionados. Sin embargo sus hipótesis de partida llevan a resultados extremadamente dispares. A petición del European Rail Research Institute (ERRI), Van Leeuwen ha comparado entre sí el *Modelo de Predicción Nórdico*, el modelo de *British Rail*, el modelo del *Channel Tunnel*, el *Modelo Inglés* preparado por el *Transport Research Laboratory (TRL)*, el *Modelo Holandés*, el *Shall 03* alemán, el modelo también alemán de *Rheda TV7630*, el *Método Japonés*, los modelos franceses del *CETUR* y *Mithra-fer*, el modelo suizo *Semibel*, y los modelos austríacos *ÖAL 30 simple* y *ÖAL 28/30*. Su aplicación al estudio del ruido producido por un mismo tren con una barrera absorbente de 2 metros de altura interpuesta entre tren y receptor muestra una disparidad de resultados entre los diferentes modelos que oscilan entre los 8,0 y 14,9 dB(A).

Por ello, aunque el empleo de dichos métodos -o de otros basados en planteamientos semejantes- permite realizar un estudio de impacto acústico que satisfaga la normativa legal, podría resultar inapropiado para conocer con precisión los niveles de inmisión de ruido que se van a producir en zonas especialmente críticas. Este caso se presenta, por ejemplo, en edificios de nueva construcción en los que se prevén zonas con recovecos, o con superficies altamente irregulares, y resulte necesario afinar, todavía en fase de proyecto, en el cálculo y dimensionamiento correcto de los acristalamientos y aislamientos de fachadas.



A continuación se muestran los factores tenidos en cuenta en el método aquí expuesto.

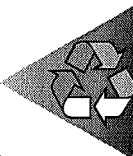
2. CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES

Existe una gran disparidad en cuanto a la ubicación de las fuentes sonoras del material móvil que establecen los diversos métodos de cálculo de predicción sonora. Así, por ejemplo, en el Modelo del *TRL* se establece que la línea de fuentes acústicas de todos los vehículos deben considerarse ubicadas sobre la cabeza del carril más cercano a la zona de estudio, excepto en el caso de locomotoras diesel a plena tracción, en las que la línea de fuentes debe colocarse elevada 4 metros por encima del carril antes mencionado. También el modelo alemán de *Rheda* asume que la fuente debe considerarse en la cabeza del carril más cercano, mientras que los modelos franceses del *CETUR* y *Mithra-fer* consideran que la fuente debe estar sobre dicha cabeza de carril, pero 0'65 y 0'8 metros, respectivamente, por encima de ella. El *Modelo Holandés* supone que el ruido de la rodadura debe distribuirse en dos zonas, una sobre la cabeza del carril y otra 0'5 metros por encima de la cabeza del carril. Otros modelos consideran que debe suponerse la fuente de ruido en el plano medio de vía, bien sea a la altura de la cabeza del carril, como *Shall 03*; o bien 0'3 metros por encima del carril, como en los modelos austríacos *ÖAL 30 simple* y *ÖAL 28/30*; o bien 0'5 metros por encima, como en el *Modelo Nórdico* tradicional. En el modelo del *Channel Tunnel* la fuente se coloca en la entrecaja a 0'5 metros por encima de la cota de carril.

En el antes mencionado modelo del *TRL*, como en la mayoría de los modelos disponibles, la potencia acústica de las fuentes se especifica en dB(A) con unos valores de referencia fijos, que únicamente distinguen si se trata de material tractor o remolcado, y en este segundo caso si el material es de viajeros o de mercancías, de 2 ó 4 ejes, y con frenos de disco o de zapata. La influencia del tipo de vía y su estado se incorporan mediante factores de corrección, y la influencia de la velocidad de circulación se incorpora mediante una recta de ajuste.

Recientemente Ringheim ha actualizado el *Modelo Nórdico*, conduciendo a una modificación de sus hipótesis de partida, entre las que cabe destacar la supresión de la hipótesis de fuente única para definir la potencia de emisión del material móvil. Por el contrario, en el *Nuevo Modelo Nórdico* se definen las fuentes en siete bandas de octava, localizando cada una de ellas a una altura por encima del carril que oscila entre los 2'0 m, para el ruido de 63 Hz y los 0'3 m para el ruido de 500 Hz.

A diferencia de los métodos anteriores, en el método expuesto en esta ponencia se trabaja en bandas de tercio de octava, ubicando las fuentes de manera diferenciada según su naturaleza, y definiendo cada una de ellas con la totalidad del espectro que le corresponde. En el caso de la rodadura, ese ruido se atribuye al velo de las ruedas, y se sitúa a la altura de las cajas de grasa, con la directividad que corresponde a cada frecuencia de



emisión, según puede encontrarse, por ejemplo, en los trabajos de Fingberg, en conjunción con los trabajos de Thompson.

Esta distinción permite tener en cuenta que la directividad del ruido de rodadura es debida prioritariamente a las ruedas, cuyo comportamiento se puede aproximar en determinados casos al de dipolos incoherentes, como muestra Ford. El método aquí expuesto se ha concebido para modelizar y trabajar con directividades tan complejas como se desee. La figura 1-a muestra un caso particular de dichas directividades correspondiente a la frecuencia de 1000 Hz. Sin embargo, por razones prácticas y siguiendo a Thompson, es posible reducir sin pérdida de rigor la envolvente de los lóbulos de directividad a la de un dipolo para los movimientos axiales de rueda y a la de un monopolo para los movimientos radiales. La figura 1-b muestra estos tipos de directividades.

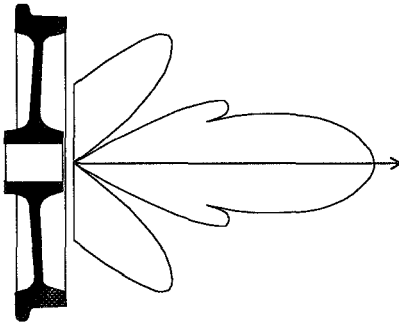


Figura 1-a: Directividad del ruido de rodadura.

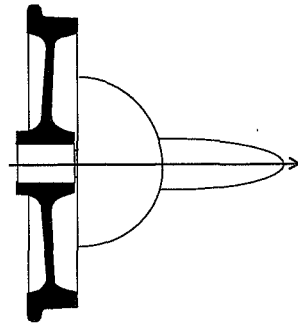


Figura 1-b: Directividad monopolar y dipolar.

El método expuesto también permite tener en cuenta las directividades del ruido aerodinámico en los casos de alta velocidad. Mientras que el ruido producido por las interacciones del flujo con las singularidades y discontinuidades del vehículo, incluido el pantógrafo, es dipolar, el ruido de las turbulencias de la capa límite sobre las superficies planas, lisas y rígidas de la caja es cuadrupolar.

3. PROPAGACIÓN DEL RUIDO

En la mayoría de los casos a estudiar es imprescindible modelizar en 3D tanto la ubicación de las fuentes, como la zona de inmisión y los obstáculos a la propagación. Sin embargo, existen una serie de situaciones particulares en que el problema puede abordarse como un problema en 2D, bien sea en planta o en sección vertical, con el consiguiente ahorro en tiempo computacional y una mayor sencillez de interpretación de los resultados.



Un caso típico en el que el método desarrollado por los autores permite que el problema se aborde sin error en 2D es aquel en el que interesa conocer los niveles de ruido en una sección vertical perpendicular a la vía, siendo ésta una vía recta, en la que el tren circula a velocidad uniforme, con todas las fuentes de emisión de ruido estacionarias, y no existiendo puntos singulares en la vía, como por ejemplo cruzamientos. Se trata de una propagación cilíndrica de ruido, en la que las directividades de las fuentes también pueden ser incorporadas a la modelización.

El caso anterior puede extenderse a situaciones en que, manteniéndose la rectitud en la geometría de la vía, su longitud sea finita de valor L . Se trata de los casos en que existe un tramo de vía recta comprendida entre dos túneles.

Es fácil demostrar que, en campo libre, los niveles de presión sonora en el caso antes descrito de propagación lineal, L_p , valen:

$$L_p = L_w - 10 \log_{10}(2p) - 10 \log_{10} d + 10 \log_{10} [2 \operatorname{tag}^{-1}(L/2d)] \quad (1)$$

siendo:

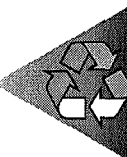
- L_p : el nivel de presión sonora en el punto de inmisión en dB re 2e-5 Pa.
- L_w : el nivel de potencia por unidad de longitud de cada fuente en dB re 10e-12 W/m.
- d : La distancia perpendicular en metros entre cada fuente y el punto de inmisión considerado.
- L : La longitud del tramo de vía recta que está emitiendo ruido, expresada en metros.

En el caso más general en 3D, las fuentes deben ser modelizadas como puntuales, y es fácil comprobar que la expresión anterior se transforma en:

$$L_p = L_w - 10 \log_{10}(4p) - 20 \log_{10} r \quad (2)$$

siendo:

- L_p : el nivel de presión sonora en el punto de inmisión en dB re 2e-5 Pa.
- L_w : el nivel de potencia de cada fuente puntual en dB re 10e-12 W/m.
- r : La distancia en metros entre cada fuente y el punto de inmisión considerado.



La ecuación anterior puede incorporar la influencia de la directividad, sin más que añadir el sumando del Índice de Directividad $DI(\theta, \varphi)$, que debe ser expresado en función de la orientación, y cuyo valor es:

$$DI(\theta, \varphi) = 10 \log_{10} DF(\theta, \varphi) \quad (3)$$

siendo $DF(\theta, \varphi)$ el factor de directividad definido, para cada dirección, como el cociente entre la intensidad emitida por la fuente en esa dirección y la emitida por una fuente omnidireccional de igual potencia.

4. DIFRACCIÓN Y ABSORCIONES

El modelo desarrollado por los autores contempla la difracción del sonido, realizando el cálculo a partir del Número de Fresnel N_i (Norton) obtenido según:

$$N_i = \frac{2\delta_i}{\lambda} \quad (4)$$

donde δ_i es, para cada caso, la diferencia de longitud entre el camino recorrido por el sonido por propagación directa y el obligado a recorrer por difracción, y λ es la longitud de onda de cada banda de tercio de octava. Para la implementación se ha considerado la

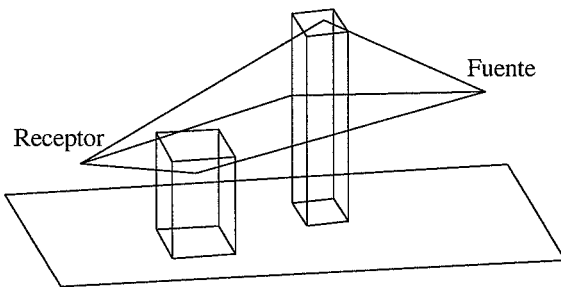


Figura 2: Propagación del ruido por difracción en 3D

difracción del ruido alrededor de todas las caras principales de pantallas u obstáculos como se ve en la figura 2. En dicha figura se representan con forma de prismas dos edificios interpuestos entre zona de emisión de ruido ferroviario y zona de receptores. En este caso, la atenuación A_T en dB lograda por la existencia de un obstáculo como los de la figura viene expresada por:

$$A_T = -10 \log_{10} (10^{-A_1/10} + 10^{-A_2/10} + 10^{-A_3/10}) \text{ dB} \quad (5)$$

donde A_1 , A_2 , y A_3 son las atenuaciones individuales obtenidas por cada uno de los caminos principales de propagación.



El modelo aquí presentado considera la atenuación debida al terreno propuesta por Rathe, y la atenuación debida a la atmósfera en función del grado de humedad según ISO 9613. Por otra parte, se consideran las reflexiones múltiples previa definición en bandas de tercio de octava de los coeficientes de absorción de todas las superficies implicadas. Se ha implementado un algoritmo de cálculo de reflexiones en 3D previendo el valor de 20 para el grado máximo de reflexión múltiple.

5. RESULTADOS

A continuación se presenta el resultado obtenido con el método anterior para la modelización acústica, en una localidad del País Vasco, de un paso a nivel. En dicho paso a nivel carretera y ferrocarril tienen una responsabilidad compartida en la emisión de ruido al entorno. Todas las figuras muestran la planta del lugar en estudio, apareciendo los edificios indicados en color negro.

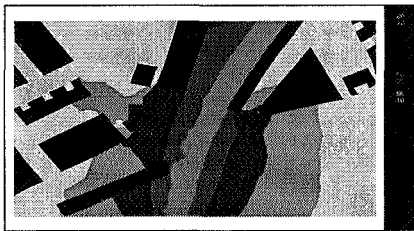


Figura 3: Niveles sonoros debidos exclusivamente al Ferrocarril.

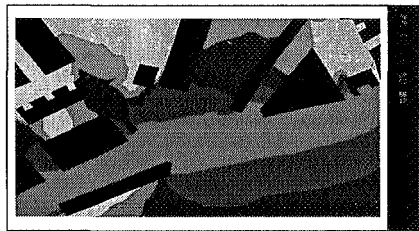


Figura 4: Niveles sonoros debidos exclusivamente a la carretera.

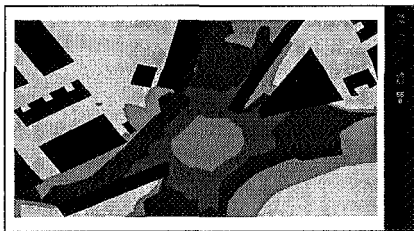


Figura 5: Niveles sonoros debidos exclusivamente al paso a nivel.

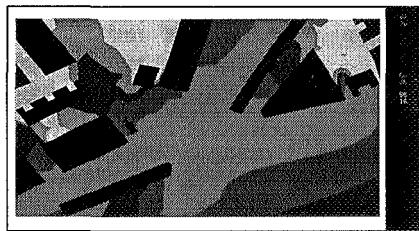
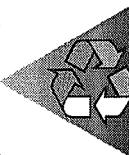


Figura 6: Niveles sonoros debidos a la actuación conjunta de todas las fuentes.

La figura 3 muestra, para la localidad antes mencionada, el nivel de ruido equivalente diurno producido en el caso urbano debido exclusivamente al tráfico ferroviario de una línea de cercanías. Las líneas de igual nivel sonoro corresponden a la frontera de los 70, 65, 60 y 55 dB(A). La figura 4 muestra la aportación debida exclusivamente al tráfico de carretera. La figura 5 muestra los niveles de emisión debidos a los avisadores acústicos



en el paso a nivel y la figura 6 muestra los niveles que se obtienen como resultado de la actuación conjunta de todas las fuentes antes mencionadas.

Seguidamente se muestra la influencia que puede tener la correcta consideración de la directividad de emisión de la rodadura ferroviaria. La figura 7 muestra en planta los niveles equivalentes nocturnos que producirá la explotación de un futuro ramal ferroviario en una localidad del País Vasco. Este ramal entroncará con una línea principal en el extremo izquierdo de la representación. La emisión sonora de esta línea principal no se ha considerado en el ejemplo que se presenta. La línea principal y el nuevo ramal confluyen en un desvío cuya existencia sí ha sido simulada en este ejemplo. La figura muestra las líneas de nivel sonoro de 55, 50, 45 y 40 dB(A). Los edificios se han representado en negro y corresponden, de derecha a izquierda, a dos bloques de viviendas con planta escalonada, a un colegio y a otro bloque de viviendas. La influencia de los cruzamientos se pone de manifiesto en el ensanchamiento de las líneas de nivel. En esta figura las directividades se han considerado esféricas para todas las bandas de frecuencia.

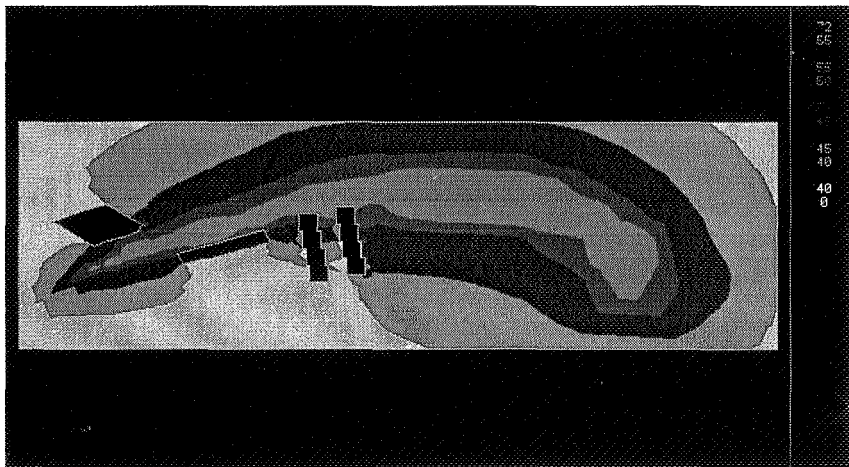


Figura 7: Niveles Leq nocturnos debidos a un nuevo ramal ferroviario. Simulación del ruido de la rodadura mediante directividades esféricas.

La figura 8 representa los niveles que se obtienen en la misma situación anterior, si se tiene en cuenta que la directividad en las diez bandas de tercio de octava entre 25 y 200 Hz es de tipo esférico, mientras que la directividad en las 20 bandas de tercio de octava a partir de la de 250 Hz es de tipo dipolar. Como puede observarse, mientras que a una distancia reducida de la línea ferroviaria no se aprecian diferencias significativas, los niveles que se obtienen a mayores distancias de la línea sí presentan diferencias notables.



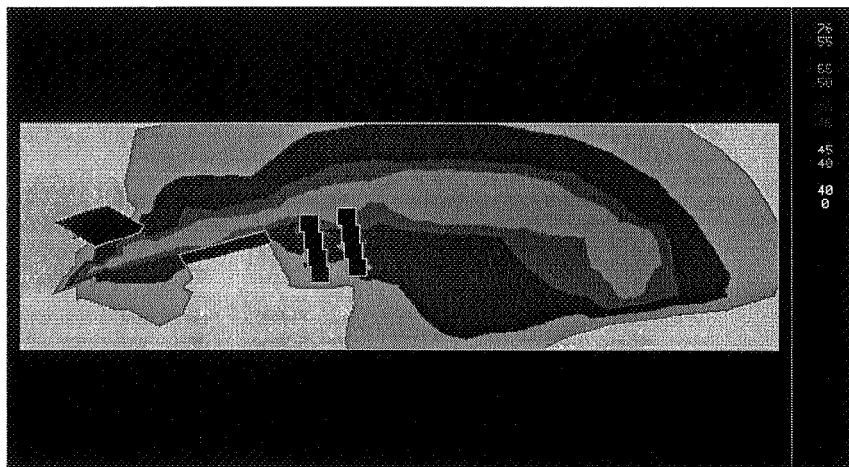


Figura 8: Simulación mediante directividades dipolares en medias y altas frecuencias.

6. CONCLUSIONES

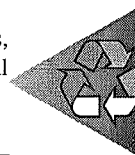
Se ha presentado un método de cálculo de los niveles de ruido medioambientales debidos a la circulación ferroviaria, que permite la máxima generalidad posible al considerar tanto los factores prioritarios en el estudio de la propagación a cortas, como a medias, o largas distancias desde la vía. En particular se considera la propagación directa, las reflexiones múltiples contra superficies absorbentes, la difracción alrededor de pantallas de longitud no infinita, edificios u otros obstáculos, la atenuación del aire y la humedad, así como la absorción del terreno. Los ejemplos incluidos en esta ponencia permiten comprobar, entre otros factores, la influencia de la directividad de la emisión de las fuentes.

7. BIBLIOGRAFÍA

Fingberg, U. - "A model of wheel-rail squealing noise", Journal of Sound and Vibration Vol 143, nº 3 (1990), pp. 365-377

Ford, R. D. - "Physical assesment of transportation noise", en Nelson, P. "Transportation Noise. Reference book", Butterworths, 1987.

ISO 9613-1 and -2 - "Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors, Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere; and Part 2: General method of calculation", Geneve, 1996.



van Leuven, J. J. A. - "Noise prediction models to determine the effect of barriers placed alongside railway lines", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 193, nº 1 (1996), pp. 269-276.

Norton, M. P. "Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers", Cambridge University Press, Cambridge, 1989.

Rathe, E. J. - "Computer model for noise propagation studies involving complex noise source and topographical characteristics". *Internoise 77* (1977), A154.

Ringheim, M. - "The New Nordic Prediction Method for railway noise", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 193, nº 1 (1996), pp. 277-282.

Thompson, D. J. - "Wheel-Rail noise generation, Part II: Wheel vibration", *Journal of Sound and Vibration*, Vol 161, nº 3 (1993), pp. 401-419.

