



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

**INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN**

Título del proyecto:

**ANÁLISIS DEL NUEVO MÉTODO DE CÁLCULO
CNOSSOS-EU
PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RUIDO**

Urko Peral Martínez

Miguel Arana Burgui

Pamplona, 10 de septiembre de 2012

ÍNDICE

1. Introducción.....	7
1.1. Objeto del proyecto.....	8
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Directiva.....	9
1.3.1. Objetivos.....	9
1.3.2. Ámbito de aplicación.....	9
1.3.3. Definiciones.....	9
1.3.4. Elaboración de mapas estratégicos de ruido.....	10
1.3.5. Planes de acción.....	10
1.3.6. Información a la población.....	10
1.4. Modelos anteriores.....	10
1.4.1. NMPB. Modelo francés.....	10
1.4.2. RLS90, CORTN, SP96. Otros standard europeos.....	12
1.4.2.a. Modelo de fuente en los tres standard.....	12
1.4.2.b. Comparación de los modelos.....	15
1.4.2.c. Conclusión.....	15
1.5. Objetivo de unificación.....	16
2. CNOSSOS. Ruido de tráfico rodado.....	17
2.1. Descripción de la fuente sonora.....	18
2.1.1. Clasificación de vehículos	18
2.1.2. Número y posición de las fuentes sonoras equivalentes.....	22
2.1.3. Clasificación de asfaltos.....	23
2.2. Emisión de la potencia sonora.....	25
2.2.1. Consideraciones generales.....	25
2.2.1.a. Vehículo individual.....	25
2.2.1.b. Tráfico fluido.....	26
2.2.2. Condiciones de referencia.....	27
2.3. Componente “Rolling noise”.....	28
2.3.1. Ecuación general.....	28
2.3.2. Contribuciones $\Delta L_{WR,road}$ y $\Delta L_{WR,region}$	29
2.3.2.a. Tipo de calzada.....	29
2.3.2.b. Corrección regional.....	29
2.4. Componente “Propulsion noise”.....	30
2.4.1. Ecuación general para condiciones de velocidad constante.....	30
2.4.2. Contribuciones $\Delta L_{WP,road}$ y $\Delta L_{WP,other}$	31
2.4.2.a. Tipo de calzada.....	31
2.4.2.b. Otros.....	32
2.4.3. Contribuciones $\Delta L_{WP,acc}$, $\Delta L_{WP,grad}$	32

2.4.3.a. Aceleración.....	32
2.4.3.b. Gradiente de la carretera.....	33
2.4.3.c. Efecto combinado de aceleración y gradiente de carretera para vehículos de categorías 2 y 3.....	33
2.5. Contribución de las distintas correcciones.....	34
2.5.1. Efecto del tipo de calzada.....	34
2.5.1.a. Principio general.....	34
2.5.1.b. Efecto de la edad en las propiedades del ruido de la calzada.....	35
2.5.2. Directividad de la fuente.....	36
2.5.3. Efectos adicionales.....	37
2.5.3.a. Efecto de la temperatura del aire en la emisión de rolling noise.....	37
2.5.3.b. Humedad de la calzada.....	38
2.5.3.c. Sistema de montaje de neumáticos en camiones.....	39
2.5.3.d. Peso del vehículo y anchura del neumático.....	40
2.5.3.e. Neumáticos añadidos.....	40
2.5.3.f. Furgonetas de repartición.....	41
2.5.3.g. % de vehículos diesel.....	41
3. CNOSSOS. Modelo de propagación.....	42
3.1. Formulación del modelo.....	43
3.1.1. Consideraciones geométricas	43
3.1.1.a. Segmentación de la fuente.....	43
3.1.1.b. Trayectorias de propagación.....	43
3.1.1.c. Reflexiones en fachadas y otros obstáculos verticales.....	43
3.1.1.d. Datos de entrada para el cálculo punto a punto.....	44
3.1.2. Modelo de propagación del sonido.....	45
3.1.2.a. Atenuación punto a punto: Formulación general.....	45
3.1.2.b. Atenuación geométrica.....	46
3.1.2.c. Absorción atmosférica.....	47
3.2. Exceso de atenuación.....	47
3.2.1. Difracción, reflexión del terreno y dispersión.....	47
3.2.2. Proceso recursivo.....	48
3.3. Atenuación por difracción.....	49
3.4. Atenuación del terreno.....	51
3.4.1. Modelo de terreno cóncavo.....	51
3.4.1.a. Atenuación del terreno por segmentos cóncavos.....	52
3.4.1.b. Coeficiente de reflexión de onda esférica.....	53
3.4.1.c. Factor de ponderación geométrica.....	54
3.4.1.d. Factor de coherencia.....	55
3.4.2. Ponderación fresnel.....	57
3.4.2.a. Ponderación fresnel básica.....	57
3.4.2.b. Ponderación fresnel modificada.....	59
3.4.2.c. Frecuencia de transición.....	60
3.4.3. Modelo de transición.....	61

3.4.3.a. Segmentos convexos y coeficientes.....	61
3.4.3.b. Atenuación del terreno convexo.....	62
3.5. Refracción atmosférica.....	63
3.5.1. Perfil de la velocidad del sonido.....	63
3.5.2. Analogía del terreno curvo.....	64
3.6. Dispersión por turbulencia atmosférica.....	65
4. CNOSSOS. Predicción.....	66
4.1. Cálculo teórico de los valores “Rolling noise” y “Propulsion noise” para un determinado vehículo.....	67
4.2. Valores “Fuente inferior” y “Fuente superior”	68
4.3. Potencia instantánea de la fuente, $L_{W,0}$	69
4.4. Potencia media por unidad de longitud, $L_{W',eq,line}$	69
4.5. Predicción del Nivel de Presión Sonora en el receptor, L_{Aeq}	70
4.6. Ejemplo.....	71
5. Campaña de medidas y dispositivo experimental.....	75
5.1. Descripción del caso práctico.....	76
5.2. Dispositivo experimental.....	77
6. Resultados.....	78
6.1. Caso particular.....	79
6.1.1. Cálculo del L_{Aeq} a partir de los datos obtenidos en el sonómetro.....	79
6.1.2. Cálculo del $L_{W,0}$ a partir de los datos obtenidos en el sonómetro.....	81
6.2. Exposición de los resultados.....	82
6.2.1. $L_{W,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades.....	83
6.2.2. $L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades.....	84
6.2.3. $L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías.....	85

7. Análisis de los datos y comparativa.....	86
7.1. Análisis.....	87
7.1.1. $L_{w,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades.....	87
7.1.2. $L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades.....	87
7.1.3. $L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías.....	88
7.2. Comparación entre las medidas tomadas y las predicciones del CNOSSOS.....	88
Conclusiones.....	90
Referencias.....	92
Anexos.....	94
Anexos del capítulo 2.....	94
Anexo 2-1. Tabla de coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos en tráfico rodado.	
Anexo 2-2. Coeficientes de corrección para el efecto de la temperatura en la emisión de rolling noise.	
Anexo 2-3. Tabla de coeficientes de corrección para el efecto del tipo de calzada en la emisión de rolling noise.	
Anexo 2-4. Coeficientes para el efecto de neumáticos antideslizantes en la emisión de rolling noise.	
Anexos del capítulo 3.....	101
Anexo 3-1. Linealización de perfiles de velocidad de sonido logarítmicos.	
Anexos del capítulo 6.....	104
Anexo 6-1. $L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades (gráficas).	

CAPÍTULO 1: Introducción

1. Introducción

1.1. Objeto del proyecto

Este trabajo nace, entre otros, por el interés del autor acerca de los campos de la acústica y su aplicación práctica en los ámbitos del ruido en tráfico rodado. Gracias a la ayuda y orientación del profesor Miguel Arana Burgui se ha conseguido incidir en el impacto ambiental que provoca el ruido de un vehículo al circular por una vía. De esta manera se han podido comparar los niveles medidos con los que predice el nuevo estándar europeo, que actualmente se encuentra en un periodo de prueba.

En los primeros apartados se explicará el contexto en el que se encontraban la mayoría de países de la Unión Europea, citando y comparando brevemente algunas de las características de los modelos que fueron vigentes en la anterioridad. Más adelante se detallará el nuevo modelo que se quiere implantar para todos los países de la UE y se pondrá en práctica para valorar la incertidumbre de sus predicciones respecto de los datos que se pueden medir en carreteras Navarras.

En definitiva, este proyecto ha sido elaborado debido a la iniciativa del autor en conocer el campo de la acústica medioambiental y su impacto asociado al ruido en tráfico rodado. Y ha podido llevarse a cabo gracias a la ayuda del tutor que ha sido quien ha enfocado el trabajo en esa dirección.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este Proyecto Fin de Carrera ha sido evaluar la incertidumbre existente entre el nuevo modelo de predicción de ruido para tráfico rodado, CNOSSOS, y las medidas tomadas en varias carreteras de Navarra. De esta manera se ha podido definir cual de las medidas para cada tipo de asfalto que predice el nuevo estándar se asemeja mejor a las tomadas in-situ.

Otro de los objetivos ha sido redactar unas conclusiones que pudiesen ser lo más fiables posibles, para de este modo poder disponer de una buena valoración del modelo CNOSSOS. En este caso, debido a que el mayor número de medidas obtenidas ha sido para los vehículos de categoría 1 o vehículos ligeros, las comparaciones realizadas con estos últimos serán las de mayor fiabilidad.

Por último, se ha informado de las variadas normativas y modelos que regulan el nivel de ruido en tráfico rodado. Se ha comenzado explicando la primera directiva que se creó con el fin de analizar e informar sobre el ruido existente, entre otros en las carreteras, para más adelante comparar los primeros modelos y estándares que surgieron en distintos países. De este modo, el lector se puede hacer una idea de la evolución de estas normativas y así facilitar la comprensión del nuevo modelo CNOSSOS, que es explicado detalladamente en los apartados 2, 3 y 4 de este proyecto.

1.3. Directiva 2002/49/CE

La finalidad de esta directiva es proporcionar una base para desarrollar y complementar el conjunto de medidas comunitarias existente sobre el ruido emitido por las principales fuentes sonoras (vehículos e infraestructuras de ferrocarril y carretera, aeronaves, equipamiento industrial y de uso al aire libre y máquinas móviles) para desarrollar medidas adicionales a corto, medio y largo plazo.

1.3.1. Objetivos

Establecer un enfoque común destinado a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos nocivos, incluyendo las molestias de la exposición al ruido ambiental. Con este fin, se aplicarán progresivamente las medidas siguientes:

- a) Elaboración de mapas de ruido
- b) Información sobre el ruido ambiental y sus efectos
- c) Implementación de planes de acción con vistas a prevenir y reducir el ruido ambiental

Asimismo, la directiva tiene por objeto sentar unas bases que permitan elaborar medidas comunitarias para reducir los ruidos emitidos por las principales fuentes, ya mencionadas anteriormente.

1.3.2. Ámbito de aplicación

Se aplicará al ruido ambiental al que estén expuestos los seres humanos, en particular en zonas urbanizadas, parques públicos, zonas tranquilas en campo abierto, proximidades de centros escolares y hospitales, y en otros edificios y lugares vulnerables al ruido.

1.3.3. Definiciones

Se definen varios conceptos como el ruido ambiental, efectos nocivos, molestia... así como los parámetros que pretende armonizar esta Directiva. Entre otros:

- a) Ruido ambiental: Sonido exterior no deseado o nocivo generado por las actividades humanas, incluido el ruido emitido por los medios de transporte, por el tráfico rodado, ferroviario y aéreo y por emplazamientos de actividades industriales.
- b) L_{den} (indicador de ruido día-tarde-noche): Nivel de ruido, en dBA, que se determina aplicando la siguiente fórmula.

$$L_{den} = 101g \frac{1}{24} \left(12 * 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{evening} + 5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{night} + 10}{10}} \right)$$

Ecuación 1.1.

donde:

L_{day} es el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos diurnos de un año y al que le corresponden 12 horas diarias.

$L_{evening}$ es el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos vespertinos de un año y al que le corresponden 4 horas diarias.

L_{night} es el nivel sonoro medio a largo plazo, ponderado A, determinado a lo largo de todos los periodos nocturnos de un año y al que le corresponden 8 horas diarias.

1.3.4. Elaboración de mapas estratégicos de ruido

La Directiva comprende la elaboración de mapas de ruido en todas las aglomeraciones con más de 250.000 habitantes y a todos los grandes ejes viarios cuyo tráfico supere los seis millones de vehículos al año, grandes ejes ferroviarios cuyo tráfico supere los 60.000 trenes al año, y grandes aeropuertos presentes en su territorio.

1.3.5. Planes de acción

Se garantizará que las autoridades competentes elaboren planes de acción encaminados a afrontar, en su territorio, las cuestiones relativas al ruido y a sus efectos, incluida la reducción del ruido, si fuese necesaria, en los puntos citados anteriormente.

1.3.6. Información a la población

Los estados miembros velarán por que los mapas estratégicos de ruido que hayan realizado, y en su caso aprobado, y los planes de acción que hayan elaborado se pongan a disposición y se divulguen entre la población de acuerdo con la legislación comunitaria pertinente. Además esta información deberá ser clara, inteligible y fácilmente accesible y deberá incluir un resumen en el que se recogerán los puntos principales.

1.4. Modelos anteriores

1.4.1. NMPB. Modelo francés.

Diversos países habían desarrollado su modelo de predicción del ruido de tráfico rodado. En este caso se explicará el modelo francés (NMPB), y más adelante el alemán (RLS90), el inglés (CORTN) y el de países nórdicos (SP96). El objetivo de tales modelos es predecir el ruido que una nueva vía de circulación generará en sus alrededores. Para ello se asigna una potencia acústica a la fuente con las variables de densidad del tráfico, composición, velocidad, tipo de asfalto y pendiente de la vía. Posteriormente se introducen correcciones debidas a la propagación, distancia a la

vía, reflexiones, barreras, absorción del suelo y aire... configurando el modelo de propagación.

El método está basado en el concepto de la trayectoria de propagación. Entre fuente y receptor pueden existir varias trayectorias dependiendo de la topografía y obstáculos y, en cada uno de ellos, puede estar asociado el término de nivel sonoro $L_{Ai,LT}$. A pesar de los modelos anteriores, el modelo francés tiene en cuenta las condiciones meteorológicas estándar, como sugiere la ISO 9613, para ajustar la previsión a largo plazo. Son clasificadas en dos tipos: condiciones meteorológicas “favorables para la propagación” y “condiciones acústicas homogéneas” (correspondientes a las condiciones empleadas en el antiguo modelo francés).

Por lo tanto, el nivel de predicción a largo plazo para cada trayectoria $L_{Ai,LT}$ es evaluada añadiendo los términos correspondientes a estas dos condiciones:

$$L_{Ai,LT} = 10 \log \left(p_i 10^{(0.1L_{Ai,F})} + (1-p_i) 10^{(0.1L_{Ai,H})} \right)$$

Ecuación 1.2.

Donde $L_{Ai,F}$ y $L_{Ai,H}$ son los niveles globales evaluados respectivamente para condiciones favorables y homogéneas, y p_i representa la probabilidad de ocurrencia de las condiciones favorables. Estos niveles son calculados para cada banda de octava y para cada trayectoria desde la fuente de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} L_{Ai,F} &= L_{A,w} - A_{div} - A_{atm} - A_{grd,F} - A_{diff,F} \\ L_{Ai,H} &= L_{A,w} - A_{div} - A_{atm} - A_{grd,H} - A_{diff,H} \end{aligned}$$

Ecuación 1.3.

Para cada trayectoria el algoritmo calcula tres atenuaciones diferentes: la propagación geométrica A_{div} y la absorción atmosférica A_{atm} , que son las mismas en ambas fórmulas, y las atenuaciones límite A_{bnd} , que dependen de las condiciones de propagación y son determinadas por el efecto del suelo (A_{grd}) y la difracción (A_{diff}).

El nivel de potencia sonora $L_{A,w}$ es evaluado considerando el flujo por hora Q , y directamente obteniendo el nivel por hora equivalente en dBA, E , asociado a un vehículo ligero o pesado. Mediante este procedimiento la potencia acústica de una fuente puntual que representa una carretera viene dada por:

$$\begin{aligned} L_{Awi} &= [(E_L + 10 \log Q_L) + (E_P + 10 \log Q_P)] + \\ &+ 20 + 10 \log(I_i) + R(j) \end{aligned}$$

Ecuación 1.4.

Donde E_L y E_P son los niveles de emisión para vehículos ligeros y pesados, l_i la longitud en metros de la carretera considerada y $R(j)$ es el valor del ruido espectral normalizado que viene dado en el CEN 1793-3 (1995) que tiene en cuenta el comportamiento de la frecuencia del sonido en la propagación.

Las predicciones del modelo NMPB han sido validadas por un gran número de campañas experimentales con variada topografía y condiciones meteorológicas, obteniéndose una muy buena correlación con los datos de ruido pero generalmente un nivel sobreestimado en las condiciones de propagación descendentes. El modelo actualizado (NMPB-ROUTES-2008) presenta una mejor estimación para estas condiciones, teniendo en cuenta las reflexiones en terraplenes, es capaz de evaluar la corrección debida a la difracción de las barreras de baja altura y ha puesto en marcha otras correcciones por reflexión.

1.4.2. RLS90, CORTN, SP96. Otros standards europeos

En este apartado se explican las diferencias entre tres de los más importantes standard europeos, comparando sus notables diferencias incluso en la evaluación de los niveles sonoro base a partir del modelo de fuente. La elaboración de un modelo de predicción del ruido de tráfico rodado debe contemplar, esencialmente, dos aspectos: el modelo de fuente y el modelo de propagación.

1.4.2.a Modelo de fuente en los tres standard

En la tabla 1.1. se presenta un cuadro comparativo de los modelos de fuente de los distintos standard, en el cual se indican los descriptores de ruido considerados en cada caso, rangos de velocidades considerados, distancia y altura de referencia, horarios y condiciones por defecto.

	RLS90 (Alemán)	CORTN (Inglés)	SP96 (Países nórdicos)
Índice	L _{Aeq} (Día), L _{Aeq} (Noche)	L10 (1h), L10 (18h)	L _{Aeq} , L _{AFqmax}
Velocidad	Máxima permitida. Rango permitido para ligeros: 30-130 Km/h Rango permitido para pesados: 30-80 Km/h	Máxima permitida.	Velocidad promedio. Rango permitido para ligeros: >30 Km/h Rango permitido para pesados: 30-90 Km/h
Distancia	25m	10m	10m
Altura	4m	0,5m	1,5m
Horario	Día: 06-22 Noche: 22-06	1h (la hora más ruidosa), 18h	24h (se puede realizar el cálculo para cualquier intervalo de t)
Pesados	2,8 T		3,5 T
Correcciones	Velocidad Superficie Gradiente Reflexiones	Velocidad Superficie Gradiente	Velocidad Superficie Gradiente
Condiciones por defecto	Ligeros 100 Km/h Pesados 80 Km/h Asfalto liso G < 5%	Velocidad asumida 75 Km/h No pesados	Asfalto denso, liso, con más de 1 año de antigüedad, con máximo tamaño de lámina de 12-16 mm, con temperaturas entre 10° y 20°. Variación de 0,1 dB/°C

Tabla 1.1. Comparación de los modelos de fuente en los distintos standard.

A continuación se describen las expresiones detalladas del descriptor elegido para la comparación.

RLS90

El nivel base se evalúa mediante la expresión:

$$L_{Aeq} = 37.3 + 10 \cdot \log\{Q \cdot (1 + 0.082 \cdot P)\} \quad (\text{dBA})$$

Ecuación 1.5.

donde:

Q: Densidad de tráfico, en vehículos/hora

P: Porcentaje de vehículos pesados (PMA > 2.8 Ton), en %

El término de corrección para una velocidad distinta de la asumida por defecto (100 Km/h para ligeros y 80 Km/h para pesados), es el siguiente:

$$Dv = L_{ligeros} - 37.3 + 10 \cdot \log \left[\frac{100 + (10^{0.1C} - 1) \cdot P}{100 + 8.23 \cdot P} \right]$$

Ecuación 1.6.

donde:

$$L_{ligeros} = 27.7 + 10 \cdot \log \left[1 + (0.02 \cdot V_{ligeros})^3 \right]$$

$$L_{pesados} = 23.1 + 12.5 \cdot \log V_{pesados}$$

$$C = L_{pesados} - L_{ligeros}$$

$$30 \text{ km/h} \leq V_{ligeros} \leq 130 \text{ km/h}$$

$$30 \text{ km/h} \leq V_{pesados} \leq 80 \text{ km/h}$$

Ecuaciones 1.7., 1.8. y 1.9.

CORTN

El índice descriptor del nivel sonoro es el percentil L10 (nivel sonoro sobrepasado durante el 10% del tiempo de medida):

$$L10(1 \text{ h}) = 42.2 + 10 \cdot \log(q) \quad (\text{dBA})$$

$$L10(18 \text{ h}) = 29.1 + 10 \cdot \log(Q) \quad (\text{dBA})$$

Ecuaciones 1.10. y 1.11.

donde:

q: nº de vehículos por hora
 Q: nº de vehículos en 18 horas

La corrección para otra velocidad y tráfico compuesto viene dada por:

$$C_{v,p} = 33 \cdot \log(V+40+500/V) + 10 \cdot \log(1+5P/V) - 68.8 \quad (\text{dBA})$$

Ecuación 1.12.

donde:

V: Velocidad del flujo de tráfico en Km/h
 P: Proporción de vehículos pesados en %.

STATENS PLANVERK 96 (SP96)

El descriptor es el nivel sonoro continuo equivalente, L_{Aeq} , evaluado para un periodo de 24 horas, aunque puede ser evaluado para cualquier intervalo de tiempo.

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[10^{\frac{L_{Aeq,10m}(ligeros)}{10}} + 10^{\frac{L_{Aeq,10m}(pesados)}{10}} \right]$$

Ecuación 1.13.

donde:

$$L_{Aeq,10m}(ligeros) = L_{AE,10m}(ligeros) + 10 \cdot \log \left(\frac{N_l}{T} \right)$$

$$L_{Aeq,10m}(pesados) = L_{AE,10m}(pesados) + 10 \cdot \log \left(\frac{N_p}{T} \right)$$

$$L_{AE,10m}(ligeros) = 73.5 + 25 \cdot \log \left(\frac{V}{50} \right) \quad \text{para } V \geq 40 \text{ km/h}$$

$$L_{AE,10m}(ligeros) = 71 \quad \text{para } V < 40 \text{ km/h}$$

$$L_{AE,10m}(pesados) = 81 + 30 \cdot \log \left(\frac{V}{50} \right) \quad \text{para } 50 \text{ km/h} \leq V \leq 90 \text{ km/h}$$

$$L_{AE,10m}(pesados) = 81 \quad \text{para } V < 50 \text{ km/h}$$

Ecuaciones 1.14., 1.15., 1.16., 1.17., 1.18. y 1.19.

Siendo N_l y N_p el número de vehículos ligeros y pesados, respectivamente, durante el intervalo de tiempo T, en segundos.

1.4.2.b. Comparación de los modelos

Supondremos para ambos casos una situación simplificada de un flujo de tráfico constante (1 vehículo/hora), para diferentes velocidades, en una carretera infinita, recta, horizontal y asfaltada. Tras haber unificado los descriptores y las distancias de referencia (10m), el resultado del nivel sonoro base es el siguiente:

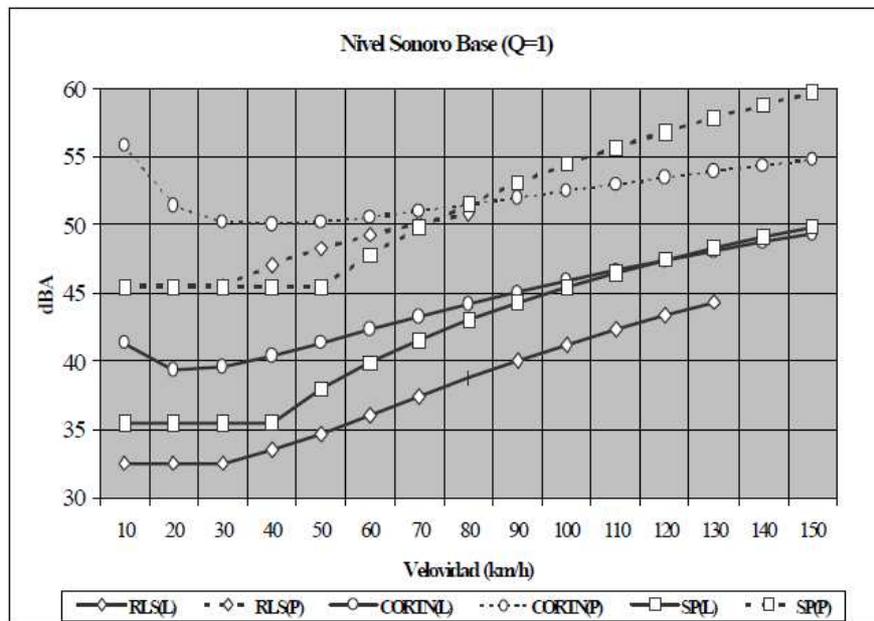


Figura 1.1. Nivel sonoro base tras haber unificado los descriptores y las distancias de referencia.

Para el standard Alemán, la potencia media de un vehículo pesado es 20 veces (13 dB) la de un vehículo ligero, no habiendo dispersión significativa entre los valores diferencia.

Para velocidades inferiores a 40 Km/h, el standard Inglés adopta una potencia media de vehículo pesado 14 veces (11,6 dB) mayor que la del vehículo ligero. Para el resto de valores la relación es 4,5 veces mayor (6,7 dB).

Para velocidades inferiores a 40 Km/h, el standard Nórdico adopta una potencia media de vehículo pesado 10 veces (10 dB) mayor que la del vehículo ligero. Para el resto de valores la relación es 6 veces mayor (8,1 dB).

En general, el RLS90 es el que más penaliza el paso de vehículos pesados en todo el rango de velocidades. El CORTN presenta una fuerte dependencia con la velocidad, mientras que el SP96 es más moderado a bajas velocidades y disminuye gradualmente a medida que aumenta la velocidad. Al aumentar el flujo de tráfico (Q) los valores aumentan en $10 \log(Q)$ en todos los standards por igual.

1.4.2.c. Conclusión

Aunque la metodología para la evaluación es muy similar, las diferencias entre las predicciones aportadas por dichos modelos son notables. El origen de las diferencias radica en la diferente potencia acústica asignada a las fuentes.

1.5. Objetivo de unificación

Con el objetivo de mejorar la calidad y la fiabilidad de los resultados de los modelos citados anteriormente, la Comisión Europea ha elaborado un método común de evaluación del ruido, para tráfico rodado, ferroviario, aeronaves y ruido industrial, destinado a obtener resultados comparables entre los estados miembros de la Unión Europea. Se había previsto que en el año 2012 queden realizados los mapas estratégicos de ruido mediante un modelo común, aunque esto todavía no ha sucedido.

Este nuevo modelo de cálculo se conoce con el nombre CNOSSOS-EU, acrónimo de Common NOise ASSessment MethQdS in EU. Parte de la base de de los métodos Nord 2000 y Harmonoise, pero también de la investigación desarrollada para la NMPB-Routes-2008.

CAPÍTULO 2:

CNOSSOS. Ruido de tráfico rodado

2. Emisión de ruido para tráfico rodado.

2.1. Descripción de la fuente sonora.

2.1.1. Clasificación de vehículos:

El ruido de tráfico rodado es resultante de la suma del ruido producido por cada uno de los vehículos individuales que forman el tráfico. Estos pueden agruparse en cuatro categorías dependiendo de sus características de emisión de ruido:

Categoría 1: Vehículos ligeros.

Categoría 2: Vehículos de peso medio.

Categoría 3: Vehículos pesados.

Categoría 4: Vehículos de dos ruedas.

En esta última categoría se definen dos subgrupos distintos: Ciclomotores y motocicletas de mayor cilindrada. Esto se debe a que trabajan en modos de conducción muy diferentes y su influencia en ocasiones difiere fuertemente.

Los detalles de los tipos de vehículos para cada categoría se muestran en la siguiente tabla:

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos ligeros	Coches de pasajeros, furgonetas de reparto inferiores a 3500 kg incluyendo trailers y caravanas.
2	Vehículos de peso medio	Furgonetas de reparto superiores a 3500 kg, autobuses, caravanas, etc. con dos ejes y doble montaje de neumático en el eje trasero.
3	Vehículos pesados	Camiones, autobuses, caravanas, con tres ejes como mínimo.
4 a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads inferiores a 50cc.
4 b		Motocicletas, triciclos o quads superiores a 50cc.

Tabla 2.1. Tipos de vehículo para cada categoría.

En las siguientes graficas se puede observar los niveles sonoros, en banda ancha, para cada tipo de vehículo en función de la velocidad. En la primera, el ruido hace referencia a la emisión de rolling noise, mientras que la segunda lo hace para propulsion noise. Se ha realizado el cálculo tomando como ejemplo el tipo de asfalto SMA 0/6. No se muestran los niveles de la categoría 4 en la primera grafica porque el rolling noise emitido por una motocicleta es despreciable en comparación con el propulsion noise.

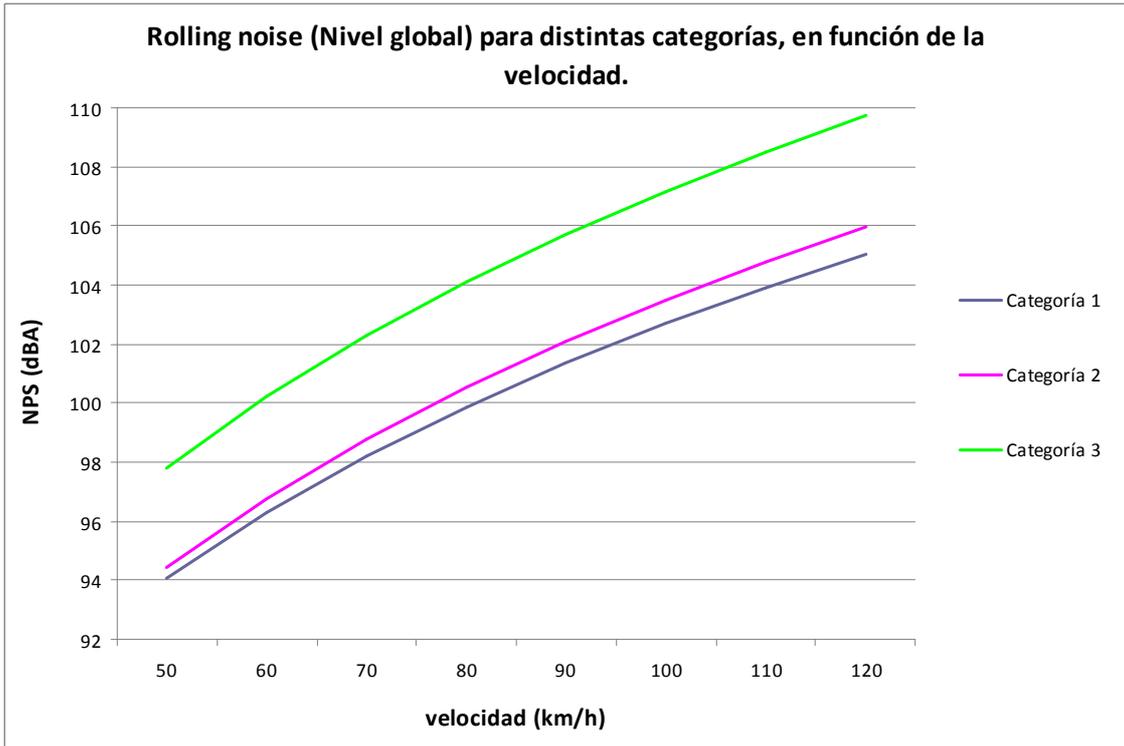


Figura 2.1. Rolling noise por categorías en función de la velocidad.

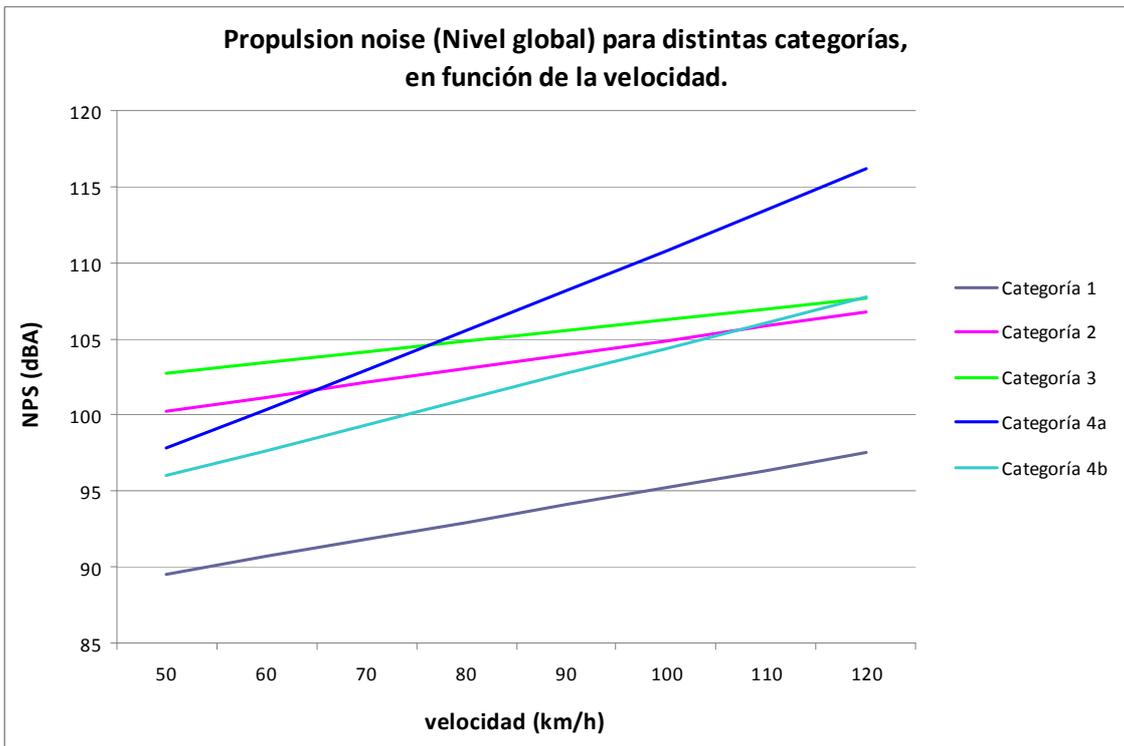


Figura 2.2. Propulsion noise por categorías en función de la velocidad.

Los niveles nos muestran un patrón muy parecido para categorías 1, 2 y 3, mientras que para la cuarta los niveles aumentan considerablemente con la velocidad. Además, en los tres primeros, el ruido aumenta conforme lo hace la categoría, y en vehículos de dos ruedas el más ruidoso es el ciclomotor. Para la primera gráfica, los niveles aumentan de forma logarítmica, mientras que en la segunda lo hacen linealmente.

Para rolling noise, no se muestran grandes diferencias entre categorías 1 y 2. Sin embargo, si se duda en que un vehículo sea de categoría 2 o 3 el error que se puede cometer es de unos 4 dBA. En el caso de propulsion noise, esta incertidumbre nunca supera los 3 dBA, pero sí que existen grandes diferencias entre ciclomotores y motocicletas. En concreto, el error que se puede llegar a cometer si se desconoce el tipo de moto es de entre 2 dBA para una velocidad de 50 km/h, y 9 dBA para 120 km/h.

En general, si se desconoce el tipo de vehículo, el error que se puede cometer es de hasta 14 ó 18 dBA para 50 ó 120 km/h respectivamente. Sin embargo, para rolling noise el error que se puede cometer es de entre 4 y 5 dBA, por lo que no es tan alta como la anterior.

En el caso de la velocidad, y para rolling noise, el error que se puede cometer es de 3 dBA por cada 10 km/h de diferencia. En propulsion noise se diferencian 3 casos. Primero, para vehículos de categorías 1, 2 y 3, el error por cada 10 km/h es de 1 dBA. Segundo, para las motocicletas (cat. 4b) de 2 dBA, y tercero para ciclomotores (cat. 4a) de 3 dBA.

Las variaciones generales del ruido en función de la velocidad son altas para rolling noise y varían en torno a 12 dBA. En el caso de propulsion noise se dan dos fenómenos, por un lado para categorías 1, 2 y 3, y por otro para la cuarta categoría. En el primer caso, la variación es de entre 5 y 8 dBA, mientras que en el segundo varía 18 dBA para los ciclomotores y 12 para las motocicletas.

En las siguientes gráficas se muestra la diferencia entre rolling y propulsion noise para la categoría 1 y todos los tipos de asfalto, en función de la velocidad.

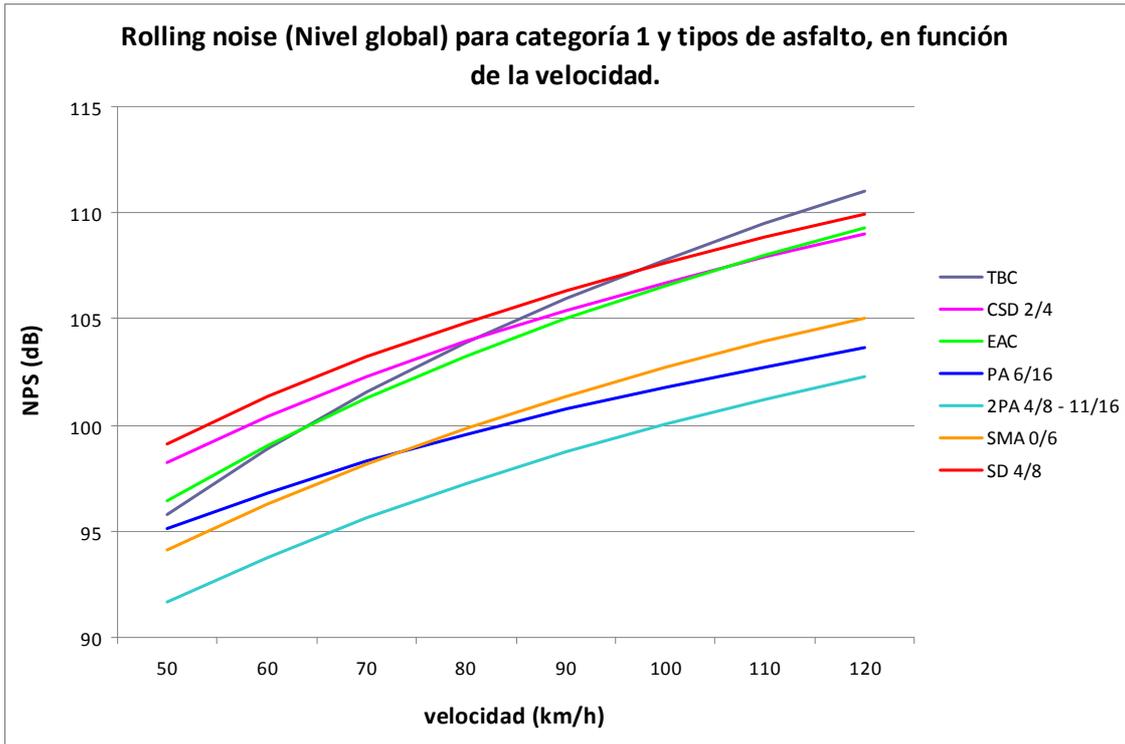


Figura 2.3. Rolling noise para categoría 1 y tipos de asfalto, en función de la velocidad.

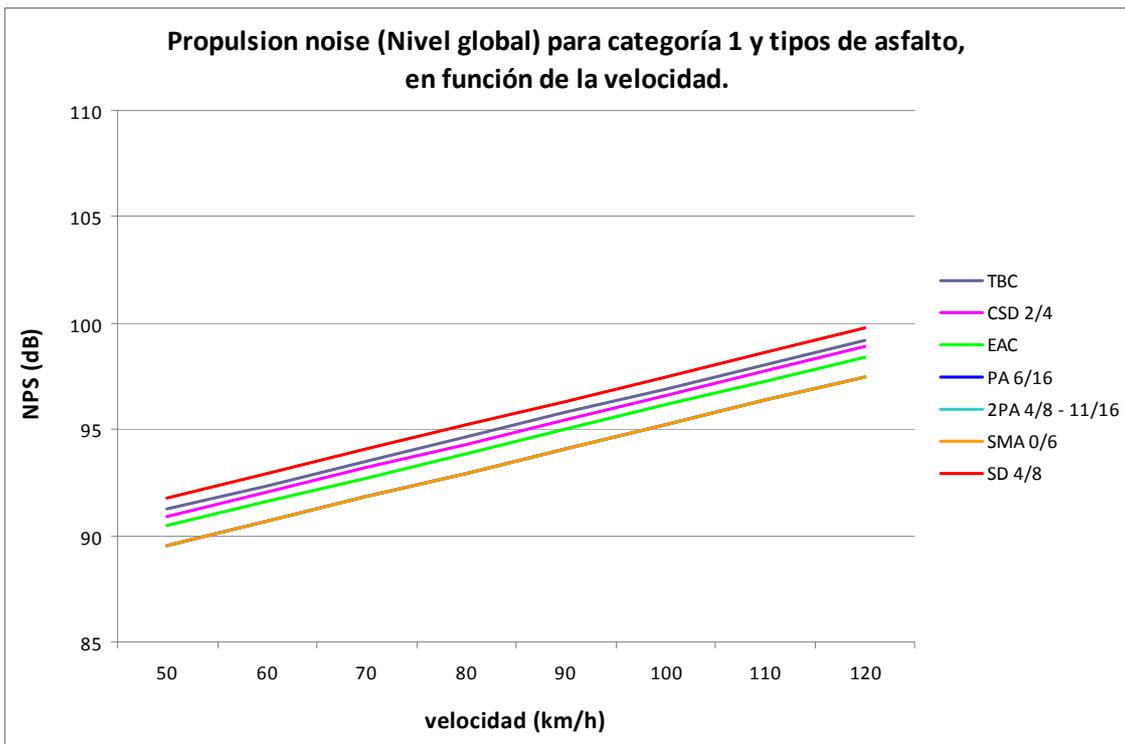


Figura 2.4. Propulsion noise para categoría 1 y tipos de asfalto, en función de la velocidad.

De estas gráficas se pueden sacar tres conclusiones claras.

- La primera: El ruido de rodadura ofrece niveles de presión sonora más altos que el ruido de propulsión, y su aumento con la velocidad se hace de forma logarítmica. El rango de valores es mayor tanto en función del tipo de calzada, como en función de la velocidad.
- La segunda: El tipo de asfalto tiene gran dependencia en los resultados finales de rolling noise, y no todas las calzadas se comportan por igual. Algunas emiten menos ruido tanto para velocidades altas como para bajas, y otras “en proporción” emiten mucho para velocidades bajas y poco para velocidades altas, y viceversa. En el caso de propulsion noise, la dependencia no es tan alta y todas adquieren el mismo patrón de ruido.
- La tercera: Y como consecuencia de las anteriores, el error que se puede cometer es en general mayor para rolling que para propulsion noise, ya que el rango de valores de ruido es mayor en este primer caso, tanto para tipo de calzada como para velocidad.

2.1.2. Número y posición de las fuentes sonoras equivalentes:

Es necesario describir el vehículo con una o varias fuentes puntuales para poder calcular la propagación del ruido y determinar la potencia sonora emitida. En el método CNOSSOS-EU cada vehículo (de categorías 1, 2 y 3) es representado mediante dos fuentes puntuales, fuentes inferior y superior. A cada una de ellas se le sumarán tanto la contribución de “rolling noise” (o ruido de rodadura) como la de “propulsion noise” (o ruido de propulsión). Los vehículos de dos ruedas únicamente serán representados con una fuente sonora puntual, ya que la contribución de rolling noise para ellos se puede despreciar.

En la siguiente figura se representan las posiciones de las fuentes sonoras puntuales:

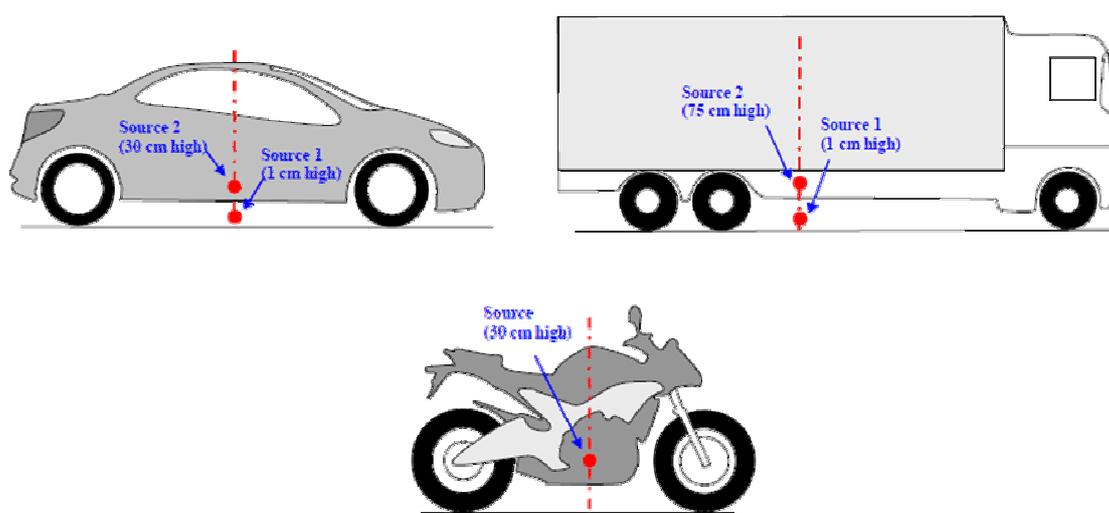


Figura 2.5. Posición de las fuentes sonoras puntuales.

- Vehículos ligeros (categoría 1): Son representados por dos fuentes puntuales equivalentes. La inferior se sitúa a 0,01 m de altura sobre el nivel del suelo, mientras que la superior lo hace a 0,30 m.
- Vehículos pesados (categorías 2 y 3): Son representados por dos fuentes puntuales equivalentes. La inferior se sitúa a 0,0 1m de altura sobre el nivel del suelo, mientras que la superior lo hace a 0,75 m.
- Vehículos de dos ruedas (categoría 4): Son representados por una única fuente puntual, situada a 0,30 m de altura.

En los primeros dos casos (categorías 1, 2 y 3), la fuente inferior posee una aportación de 80% de rolling noise y 20% de propulsion noise, mientras que la superior posee una aportación de 20% de rolling noise y 80% de propulsion noise.

2.1.3. Clasificación de asfaltos:

Son muchos los materiales empleados para la construcción de una carretera. A lo largo de Europa, cada país ha ido implantando en sus calzadas unos tipos de materiales diferentes al de su país vecino. Así, se puede observar con claridad que para el mismo vehículo y una velocidad constante, el ruido emitido varía dependiendo del tipo de calzada empleada.

En este proyecto se diferenciarán 7 tipos de superficies dependiendo de su comportamiento en la emisión de rolling noise:

- **TBC:** Transversely Brushed Concrete
- **CSD 2/4:** Concrete with Surface Dressing 2/4
- **EAC:** Exposed Aggregate Concrete
- **PA 6/16:** Porous Asphalt 6/16
- **2PA 4/8-11/16:** 2 layer Porous Asphalt 4/8-11/16
- **SMA 0/6:** Stone Mastic Asphalt 0/6
- **SD 4/8:** Surface Dressing 4/8

En la siguiente grafica se puede observar la influencia en el ruido generado para cada tipo de asfalto, para la categoría 1.

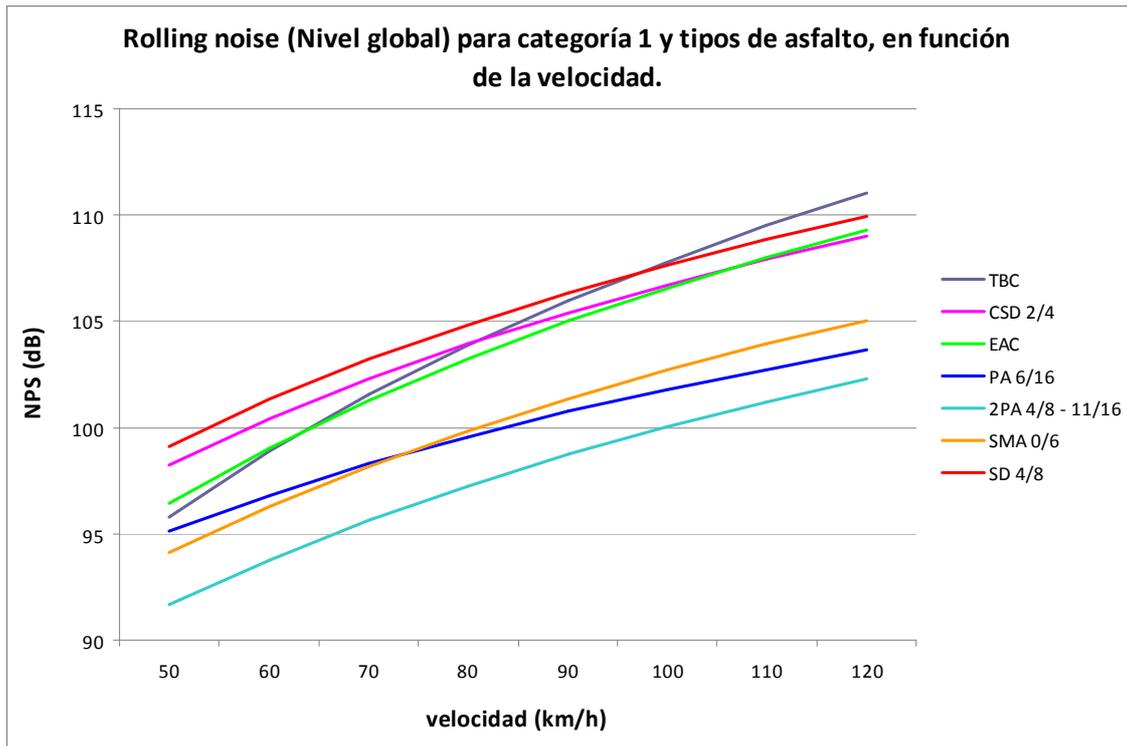


Figura 2.6. Rolling noise para categoría 1 y tipos de asfalto, en función de la velocidad.

Podemos comprobar que la incertidumbre que se obtiene de este parámetro es alta. En este ejemplo el ruido que hemos analizado es para vehículos de categoría 1 (vehículos ligeros), pero las diferencias no disminuyen para otras categorías. Así, obtenemos unas diferencias de unos 8 dBA para todas las velocidades, siendo 2PA 4/8 – 11/16 la menos ruidosa con niveles entre 92 y 102 dBA.

Por otro lado se puede apreciar que el rango de variación asociado a la velocidad, sin depender del tipo de asfalto, es por lo general de unos 10 dBA. La que más varía en este aspecto es el asfalto tipo TBC con rango de 15 dBA, obteniendo valores de entre 96 y 111 dBA. La que menos lo hace es PA 6/16 con rango de 8 dBA y valores de entre 95 y 103 dBA.

Estas diferencias casi quedan anuladas para el caso de la emisión de propulsion noise, ya que la influencia del asfalto en la emisión de ruido prácticamente solo se da para rolling noise. Además las diferencias son aún inferiores para categorías 2 y 3. En la siguiente grafica se muestra el efecto para vehículos de categoría 1:

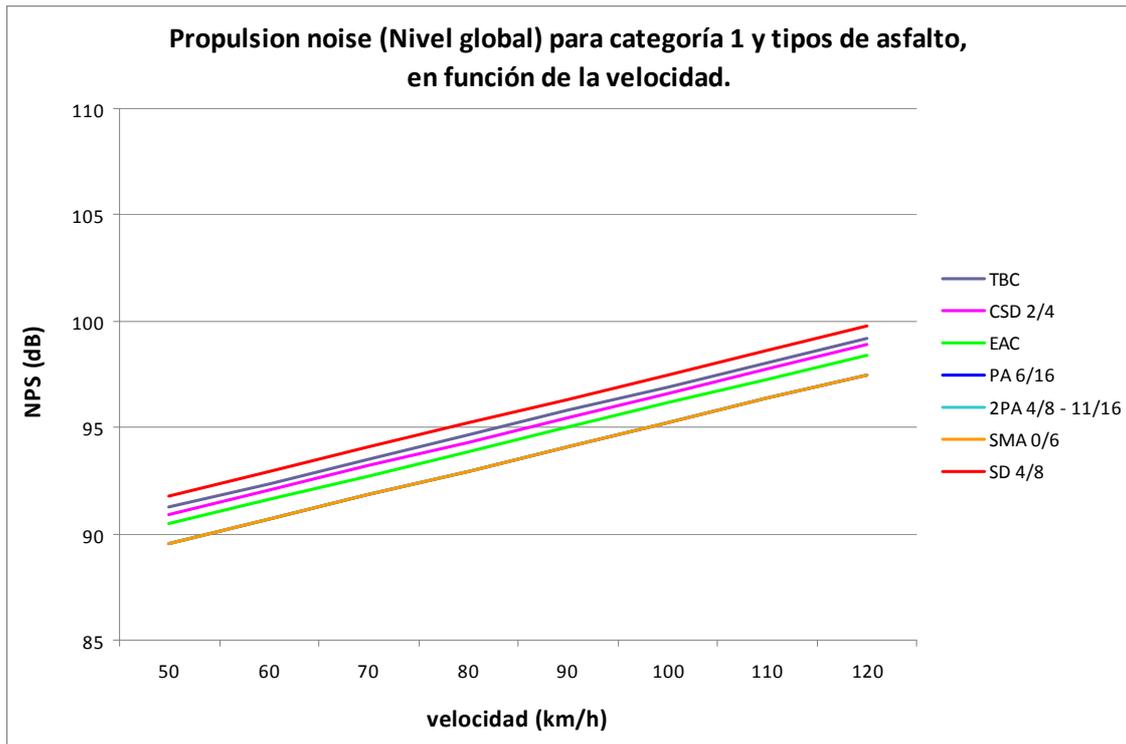


Figura 2.7. Propulsion noise para categoría 1 y tipos de asfalto, en función de la velocidad.

2.2. Emisión de la potencia sonora.

2.2.1. Consideraciones generales. Vehículo individual y tráfico fluido:

2.2.1.a. Vehículo individual

El modelo de ruido para tráfico rodado define la producción de ruido instantánea de un vehículo en función de dos parámetros generales (categoría y velocidad) y lo corrige para efectos medioambientales o específicos. Los cálculos se llevan a cabo con distintas velocidades para categorías 1, 2, 3 y 4.

Para cada vehículo, el modelo de emisión consiste en una serie de ecuaciones matemáticas representando las dos fuentes sonoras generales:

- Rolling noise: debido a la interacción de la rueda con el asfalto.
- Propulsion noise: producido por el tipo, el estado, las revoluciones... del motor del vehículo.

El efecto del ruido producido por la aerodinámica puede ser despreciado y se considerará como parámetro influyente solo para altas velocidades.

La expresión general para el nivel de potencia sonora emitida por una de las fuentes (rolling o propulsion) en función de la velocidad v ($20 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$) es la siguiente:

$$L_{W,i,m}(v) = A_{i,m} + B_{i,m} f(v)$$

Ecuación 2.1.

donde:

- “ $L_{W,i,m}(v)$ ” es el nivel de potencia sonora
- “ i ” es la frecuencia en bandas de tercio de octava
- “ m ” es la categoría
- “ v ” es la velocidad
- “ $f(v)$ ” es una función de la velocidad

$f(v)$ es una función logarítmica de la velocidad para el caso de ruido aerodinámico y de rodadura. Es una función lineal de la velocidad para el ruido de propulsión. En los vehículos de dos ruedas (categoría 4) solo se considera ruido de propulsión.

Para vehículos de categorías 1, 2 y 3, la potencia sonora es generalmente distribuida entre dos fuentes sonoras puntuales. Para el cálculo del nivel de potencia sonora de cada una de ellas (fuente inferior y fuente superior) se emplean las siguientes fórmulas.

- Para la fuente inferior:

$$L_{W,dir,low,i,m}(v) = 10 \times \lg \left(0.8 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.2 \times 10^{L_{WP,i,m}/10} \right) + \Delta L_{W,dir,i,m}$$

Ecuación 2.2.

- Para la fuente superior:

$$L_{W,dir,high,i,m}(v) = 10 \times \lg \left(0.2 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.8 \times 10^{L_{WP,i,m}/10} \right) + \Delta L_{W,dir,i,m}$$

Ecuación 2.3.

donde:

- “ $L_{WR,i,m}$ ” es el nivel de potencia sonora para rolling noise
- “ $L_{WP,i,m}$ ” es el nivel de potencia sonora para propulsion noise
- “ $\Delta L_{W,dir,i,m}$ ” aporta el valor de la directividad de las fuentes

2.2.1.b. Tráfico fluido

En lo que sigue, los subíndices i y m estarán implícitos en todos los indicadores aunque se omitirán para facilitar la legibilidad de las expresiones. Es decir, todos los niveles de potencia sonora y coeficientes de corrección se expresan para cada categoría m ($m=1, \dots, 4$) y para cada banda de tercio de octava i ($i=1, \dots, 27$) en el rango de 25 Hz a 10 kHz.

La emisión de ruido del tráfico fluido es representada por una fuente lineal, cuya unidad es la potencia sonora por unidad de longitud. Esto se corresponde con el sumatorio del sonido emitido por cada vehículo individual, teniendo en cuenta el tiempo que tarda cada vehículo en realizar la considerada sección de la vía.

El ruido emitido por el flujo de tráfico en términos de fuente lineal equivalente es definido por la siguiente fórmula:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

Ecuación 2.4.

donde:

- “ $L_{W',eq,line}$ ” es el nivel de potencia sonora media por unidad de longitud, en términos de fuente lineal equivalente, en dB/m (ref. 10^{-12} W).
- “ $L_{W,0}$ ” es el nivel de potencia sonora direccional e instantánea de la fuente inferior o superior para un único vehículo acorde con las fórmulas anteriores.
- “ N ” son el número de vehículos durante el tiempo “ T ” (en segundos).
- “ V ” es la velocidad media, en m/s.

Para el caso en el que las unidades sean en Km:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{Q}{1000 \times v}\right)$$

Ecuación 2.5.

donde:

- “ Q ” es la cantidad de vehículos en una hora.
- “ v ” es la velocidad media en Km/h.

Por aplicación de esta última fórmula, las contribuciones para el ruido de rodadura, L_{WR} , y de propulsión, L_{WP} , se calculan separadamente y se distribuyen sobre las posiciones verticales de las fuentes, tal como se describió anteriormente. El resultado es un valor de $L_{W',eq,line}$ para el flujo total de tráfico, distribuido en las tres alturas de fuente diferentes.

2.2.2. Condiciones de Referencia:

Tanto las ecuaciones de la fuente como los coeficientes fueron derivados para ser válidos bajo condiciones de referencia para meteorología y situación del tráfico. Las condiciones son las siguientes:

- Velocidad constante.
- Superficie llana, sin pendientes superiores a $|s| \leq 2\%$.
- Temperatura del aire de 20 °C

- Calzada de referencia, consistente en la mezcla de DAC 0/11 y SMA 0/11 con un uso de entre dos y siete años y con condiciones representativas de mantenimiento. Las propiedades de reflexión sonora se asumen sobre esta calzada de referencia.
- La superficie de la carretera no estará húmeda.
- El tráfico representará una media de vehículos existente en las carreteras Europeas:
 - 187 mm de anchura de neumático para vehículos de categoría 1.
 - El 19 % de los vehículos serán diesel en la categoría 1.
 - El 10,5 % de los vehículos en la categoría 1. serán furgonetas de reparto
 - Neumáticos sin tachuelas para nieve.
 - Los vehículos de categoría 3 tendrán 4 ejes.

2.3. Componente “Rolling Noise”

2.3.1. Ecuación general:

Para Rolling noise, se empleará una relación logarítmica entre el ruido de rodadura y la velocidad, que esta generalmente validada y aceptada. El nivel de potencia sonora L_{WR} es expresado por la siguiente fórmula:

$$L_{WR} = A_R + B_R \times \lg \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WR,road} + \Delta L_{WR,region}$$

Ecuación 2.6.

Los coeficientes A_R y B_R se agregan en el anexo 2-1, en bandas de tercio de octava para cada una de las categorías y para una velocidad de referencia de $v_{ref} = 70$ km/h.

En la siguiente figura se muestra el nivel global de Rolling noise para distintas categorías, en función de la velocidad. El tipo de calzada que se ha utilizado es SMA 0/6 (Stone Mastic Asphalt 0/6).

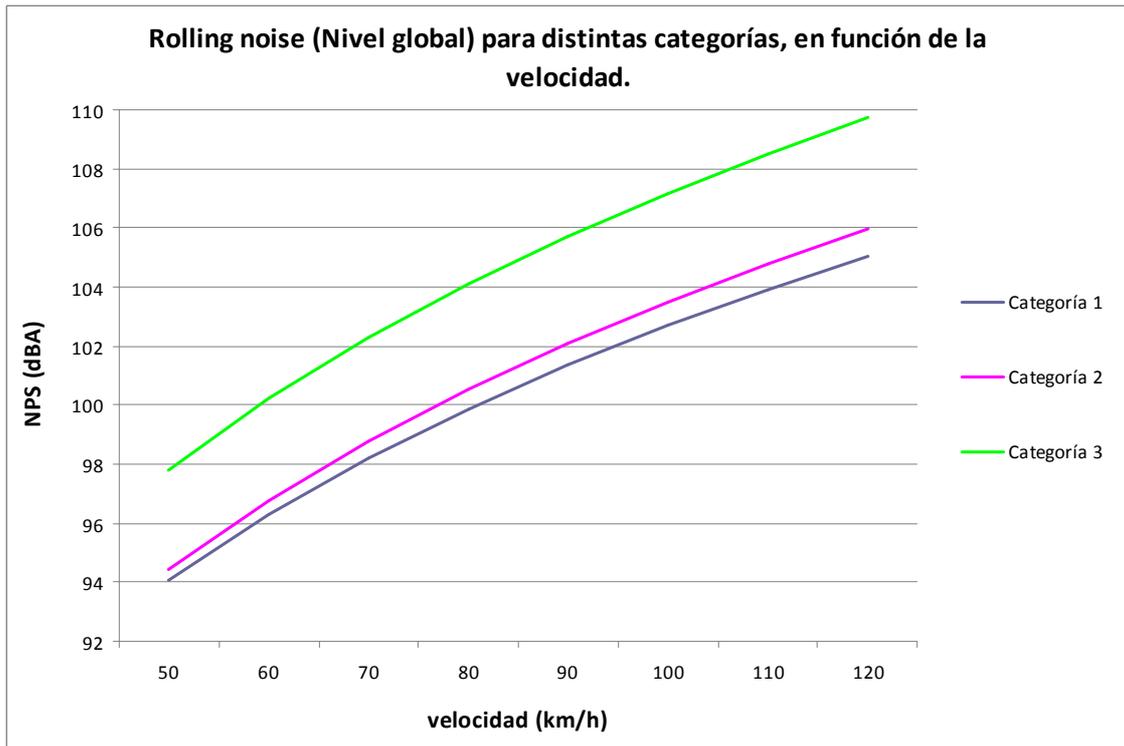


Figura 2.8. Rolling noise por categorías en función de la velocidad.

El nivel de ruido rolling noise aumenta por lo general con la categoría y con la velocidad. En este caso el aumento en función de la velocidad es logarítmico y sus valores oscilan desde 94 - 98 hasta 105 - 110 dBA.

2.3.2. Contribuciones $\Delta L_{WR,road}$ y $\Delta L_{WR,region}$:

2.3.2.a. $\Delta L_{WR,road}$. Tipo de calzada.

Es la corrección relacionada con el tipo de calzada y sus condiciones. Esta corrección es de primer orden de importancia. Será detallada en la sección "2.5.1. Efecto del tipo de calzada".

2.3.2.b. $\Delta L_{WR,region}$. Corrección regional.

Es el coeficiente de corrección regional. Se corresponde con la suma de varios coeficientes de corrección relacionados con las especificaciones regionales, para ser aplicado en la emisión de rolling noise en condiciones actuales derivadas de las condiciones de referencia. Puede ser expresado como la suma del coeficiente de corrección relacionado con las condiciones ambientales de la superficie de la calzada y el coeficiente de corrección relacionado con las especificidades del parque móvil. Estas correcciones son de segundo orden de importancia.

$$\Delta L_{WR,region} = \Delta L_{WR,env} + \Delta L_{WR,fleet}$$

$$\Delta L_{WR,env} = \Delta L_{WR,temp} + \Delta L_{WR,wet}$$

$$\Delta L_{WR,fleet} = \Delta L_{WR,2tyr} + \Delta L_{WR,axle} + \Delta L_{WR,stud} + \Delta L_{WR,wid} + \Delta L_{WR,vans}$$

Ecuaciones 2.7.a., 2.7.b. y 2.7.c.

Estas componentes de corrección regional quedan definidas en los siguientes apartados:

- “ $\Delta L_{WR,temp}$ ” Apartado “2.5.3.a. Efecto de la t^a de la calzada en rolling noise”
- “ $\Delta L_{WR,wet}$ ” Apartado “2.5.3.b. Humedad de la calzada”
- “ $\Delta L_{WR,2tyr}$ ” Apartado “2.5.3.c. Sistema de montaje de neumáticos en camiones”
- “ $\Delta L_{WR,axle}$ ” Apartado “2.5.3.c. Sistema de montaje de neumáticos en camiones”
- “ $\Delta L_{WR,wid}$ ” Apartado “2.5.3.d. Peso del vehículo y anchura del neumático”
- “ $\Delta L_{WR,stud}$ ” Apartado “2.5.3.e. Neumáticos con tachuelas”
- “ $\Delta L_{WR,vans}$ ” Apartado “2.5.3.f. Furgonetas de reparto”

En la versión simplificada del CNOSSOS-EU esta contribución se puede despreciar.

2.4. Componente “Propulsion Noise”

2.4.1. Ecuación general para condiciones de velocidad constante:

La emisión de “Propulsion noise” incluye todas las contribuciones del motor, tubo de escape, engranajes, turbo, filtro de aire... La formula para el cálculo del nivel sonoro es la siguiente:

$$L_{WP} = A_P + B_P \times \frac{(v - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,road} + \Delta L_{WP,other}$$

Ecuación 2.8.

Los coeficientes A_R y B_R se agregan en el anexo 2-1, en bandas de tercio de octava para cada una de las categorías y para una velocidad de referencia de $v_{ref} = 70$ km/h.

En la siguiente figura se muestra el nivel global de Propulsion noise para distintas categorías, en función de la velocidad. El tipo de calzada que se ha utilizado es SMA 0/6 (Stone Mastic Asphalt 0/6).

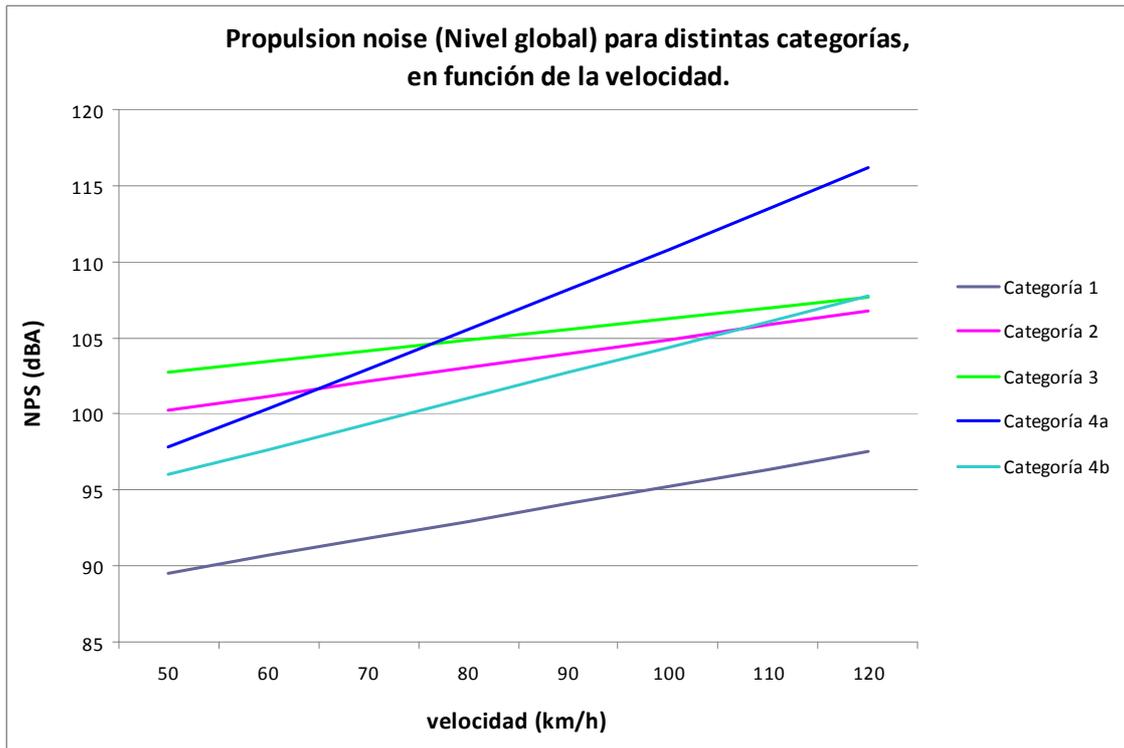


Figura 2.9. Propulsion noise por categorías en función de la velocidad.

El nivel de ruido propulsion noise aumenta por lo general con la categoría y con la velocidad. En este caso el tipo de asfalto no será un parámetro de gran influencia, mientras que la velocidad y el tipo de vehículo afectarán en el resultado obtenido. El que más incertidumbre refleja es el del tipo de vehículo, ya que si en la práctica se desconoce esta variable, el error que se puede cometer es de hasta 14 ó 18 dBA para 50 ó 120 km/h respectivamente.

Los resultados para la incertidumbre de velocidad se pueden dividir en dos grupos. Por una parte el ruido emitido por los vehículos de categorías 1, 2 y 3, y por otra parte los de categoría 4. En el primero, el error que se puede cometer es de entre 5 y 8 dBA, y en el segundo 18 dBA para ciclomotores (categoría 4a) y 12 para motocicletas (categoría 4b). Como se puede comprobar, el valor de incertidumbre de velocidad para los ciclomotores también es alto. En este caso, y para todas las categorías, el aumento del ruido en función de la velocidad es lineal.

2.4.2. Contribuciones $\Delta L_{WP,road}$ y $\Delta L_{WP,other}$:

2.4.2.a. $\Delta L_{WP,road}$. Tipo de calzada.

Es la corrección relacionada con el tipo de calzada y sus condiciones. Esta corrección es de primer orden de importancia. Será detallada en la sección "2.5.1. Efecto del tipo de calzada".

2.4.2.b. $\Delta L_{WP,other}$ - Otros.

Se corresponde con la suma de los coeficientes de corrección que son aplicados en la emisión de propulsión noise para condiciones de conducción específicas o condiciones regionales actuales derivadas de las condiciones de referencia.

$$\Delta L_{WP,other} = \Delta L_{WP,acc} + \Delta L_{WP,grad} + \Delta L_{WP,vans} + \Delta L_{WP,diesel}$$

Ecuación 2.9.

Este parámetro es consecuencia de la suma de otros cuatro. La aceleración del vehículo, el gradiente de la carretera, el porcentaje de furgonetas y el de vehículos diesel. Estos últimos quedarán detallados en los siguientes apartados:

- “ $\Delta L_{WP,acc}$ ” Apartado “2.4.3.a. Aceleración”
- “ $\Delta L_{WP,grad}$ ” Apartado “2.4.3.b. Gradiente de la carretera”
- “ $\Delta L_{WP,vans}$ ” Apartado “2.5.3.f. Furgonetas de reparto”
- “ $\Delta L_{WP,diesel}$ ” Apartado “2.5.3.g. % de vehículos diesel”

2.4.3. Contribuciones $\Delta L_{WP,acc}$, $\Delta L_{WP,grad}$:

2.4.3.a. $\Delta L_{WP,acc}$ - Aceleración.

Esta corrección se basa en la aceleración instantánea “a” en m/s^2 . La fórmula es la siguiente:

$$\Delta L_{WP,acc} = \begin{cases} C_P \cdot a & \text{for } a \geq -1 \text{ m/s}^2 \\ C_P \cdot (-1) & \text{for } a < -1 \text{ m/s}^2 \end{cases} \quad \text{with } |a| \leq a_{max}$$

Ecuación 2.10.

Esta corrección solo será válida para valores moderados de aceleración. La máxima aceleración que puede ser considerada es:

$$a_{max} = \begin{cases} 2 \text{ m/s}^2 & \text{for category 1} \\ 1 \text{ m/s}^2 & \text{for categories 2 and 3} \\ 4 \text{ m/s}^2 & \text{for category 4.} \end{cases}$$

Ecuación 2.11.

Los coeficientes C_P se agregan en el anexo 2-1 en bandas de tercio de octava y para cada una de las categorías de vehículos. Los coeficientes son iguales tanto para categorías 1 y 4, como para 2 y 3.

2.4.3.b. $\Delta L_{WP,grad}$ - *Gradiente de la carretera.*

El gradiente de la carretera tiene dos efectos en la emisión de ruido. Primero, afecta en la velocidad del vehículo, por lo tanto en la emisión de rolling y propulsion noise. Segundo, afecta al funcionamiento del motor, por lo tanto en la emisión de propulsion noise.

Solo la segunda de estas características es considerada en esta sección, asumiendo una velocidad constante del vehículo. Gradientes inferiores al 6% no tienen efectos en la emisión de propulsion noise para vehículos de categoría 1.

Se consideran tres condiciones de gradientes, de acuerdo con la pendiente “s” (en %).

- Carretera llana: para $|s| \leq 2\%$, la contribución del gradiente es despreciable.
- Condiciones de ascenso: para $2\% \leq s \leq 6\%$
- Condiciones de descenso: para $-6\% \leq s \leq -2\%$

El efecto del gradiente de la carretera en la emisión de propulsion noise se toma por cuenta del coeficiente de corrección $\Delta L_{WP,grad}$ de acuerdo con la siguiente fórmula (m=categoría):

$$\begin{array}{ll} \text{For } m = 1 \text{ or } 4 & \Delta L_{WP,grad} = 0 \quad \text{for all } |s| \leq 6\% \\ \text{For } m = 2 \text{ or } 3 & \Delta L_{WP,grad} = \begin{cases} 0 & \text{for } |s| \leq 2\% \\ 2 \times (s - 2) & \text{for } 2\% \leq s \leq 6\% \\ |s| - 2 & \text{for } -6\% \leq s \leq -2\% \end{cases} \end{array}$$

Ecuaciones 2.12. y 2.13.

Esta corrección solo será valida para vehículos a velocidad constante $v > 20$ km/h.

2.4.3.c. *Efecto combinado de aceleración y gradiente de carretera para vehículos de categorías 2 y 3.*

La combinación del gradiente con la aceleración o deceleración no es el resultado de la suma de los dos efectos. En este caso se aplicarán las siguientes correcciones para ambos efectos:

In the case of uphill conditions ($2\% \leq s \leq 6\%$):

$$\Delta L_{WP,acc} + \Delta L_{WP,grad} = \begin{cases} \text{Max}\{2 \times (s - 2); 5\} & \text{for acceleration conditions} \\ 0 & \text{for deceleration conditions} \end{cases}$$

In the case of downhill conditions ($-6\% \leq s \leq -2\%$):

$$\Delta L_{WP,acc} + \Delta L_{WP,grad} = \begin{cases} 5 & \text{for acceleration conditions} \\ (|s| - 2) & \text{for deceleration conditions} \end{cases}$$

Ecuaciones 2.14. y 2.15.

2.5. Contribución de las distintas correcciones

2.5.1. Efecto del tipo de calzada:

2.5.1.a. Principio general.

El tipo de superficie de la calzada influye significativamente en la emisión de ruido de un vehículo. Se pueden observar diferencias superiores a 15 dB(A) para el mismo vehículo y la misma velocidad en condiciones en las que el rolling noise es predominante.

Son muchas las variedades de superficies de calzada a lo largo de Europa. Sus características afectan generalmente a la emisión de rolling noise, pero las superficies porosas y absorbentes llegan a influir en la propagación tanto de rolling como de propulsion noise.

No obstante, en la práctica, este efecto es evaluado de acuerdo con el procedimiento estándar internacional, para comparar los niveles de presión sonora medidos en la carretera, incluyendo ambas fuentes y los efectos de propagación. Por lo tanto, los factores de corrección propuestos en este método para el efecto de la superficie de la carretera incluyen implícitamente el efecto de la superficie en la reflexión local del sonido.

La emisión de **rolling noise** definida en el apartado "2.3. Componente rolling noise", junto a los coeficientes del anexo 2-1, es válida para una condición virtual de referencia definida en la sección "2.2.2. Condiciones de referencia". Para otros tipos de calzada se recomienda aplicar un procedimiento de corrección que distingue los vehículos en categorías y ofrece los valores en función de la frecuencia.

El efecto del tipo de calzada para la emisión de rolling noise se expresa mediante la siguiente fórmula:

$$\Delta L_{WR,road} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg \left(\frac{v}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{WR,age}$$

Ecuación 2.16.

donde:

- $\alpha_{i,m}$ es la corrección espectral en dB a la velocidad de referencia (v_{ref}) para categorías 1, 2 y 3 ($m=1, 2, 3$), en bandas de tercio de octava ($i=50-10000\text{Hz}$).
- β_m es el efecto de la velocidad en la reducción de rolling noise. Aunque este coeficiente principalmente depende de la frecuencia, en este método no se ofrecen datos por frecuencias y se asume un valor constante.
- $\Delta L_{WR,age}$ es el término de corrección referente a la edad de la calzada. Será descrito en el apartado "2.5.1.b. Efecto de la edad en las propiedades de ruido de la calzada".

Los coeficientes de corrección $\alpha_{i,m}$ y β_m se aportan en el anexo 2-3.

Para la emisión de **propulsion noise**, el efecto del tipo de superficie es originado por la absorción del sonido en el proceso de reflexión a lo largo de la superficie de la carretera, debajo y cerca del propio vehículo. Se define como una única reducción de espectro, dependiendo solo de la categoría del vehículo y de la banda espectral:

$$\Delta L_{WP,road} = \text{Max}\{\alpha_{i,m}; 0\}$$

Ecuación 2.17.

Para superficies densas no existe corrección del tipo de carretera en la emisión de propulsion noise. Para superficies porosas, la corrección es idéntica a la de rolling noise a velocidad de referencia, pero con un máximo de cero. Por lo tanto, estas últimas pueden disminuir los valores de propulsion noise, mientras que las densas no llegarán a incrementarlos.

2.5.1.b. Efecto de la edad en las propiedades de ruido de la calzada.

Las características de ruido de la superficie de la calzada varían con el tiempo, con la tendencia de convertirse más ruidosas con la edad. En particular, la vida acústica de las calzadas poco ruidosas es por lo general menor que para las de propiedades densas, especialmente para las superficies de hormigón.

Para las superficies no-porosas, el efecto de la edad es anulado.

$$\Delta L_{WR,age} = 0$$

Mientras que para las porosas (como Porous Asphalt Concrete – PAC, Porous Cement Concrete – PCC, Poro-Elastic Road Surface – PERS ó Open Graded Asphalt Concrete - OGAC), las propiedades del efecto de la edad se pueden tomar mediante la siguiente expresión:

$$\Delta L_{WR,age} = \Delta L_{WR,age,0} \times (1 - (0.25 Y - 0.016 Y^2)) \text{ for } Y \leq 7 \text{ years}$$

Ecuación 2.18.

donde:

- “Y” es la edad de la superficie de la calzada en años
- “ $\Delta L_{WR,age,0}$ ” es el nivel de presión sonora (ponderado A) relativo a la superficie de referencia en el tiempo $Y = 0$ años.

Aunque esta formulación esta establecida con niveles ponderados A, se puede aplicar por igual en todas las bandas de frecuencia.

2.5.2. Directividad de la fuente:

En teoría, a las fuentes puntuales se les asigna directividad horizontal y vertical. La corrección de directividad con respecto a una potencia sonora omnidireccional se define como la suma de los términos horizontal y vertical.

$$\Delta L_{W,dir} = \Delta L_{W,dir,hor} + \Delta L_{W,dir,vert}$$

Ecuación 2.19.

No obstante, la directividad horizontal en vehículos se puede despreciar. Y en casos simples de modelado general, cuando no existen barreras u obstáculos en la trayectoria de propagación, la dependencia frecuencial puede ser despreciada en la directividad vertical. La relación puede aproximarse por la siguiente función lineal:

$$\Delta L_{W,dir} = -\frac{9}{\pi} \Psi \quad \text{for category } m = 1$$

$$\Delta L_{W,dir} = -\frac{6}{\pi} \Psi \quad \text{for category } m = 2 \text{ and } 3$$

Ecuación 2.20.

donde:

- “ Ψ ” es el ángulo de propagación vertical con respecto al plano horizontal, conteniendo los puntos de contacto entre las ruedas del vehículo y la superficie de la carretera, $0 \leq \Psi \leq \pi/2$.

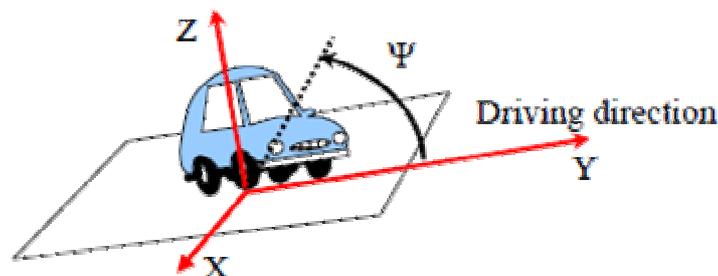


Figura 2.10. Ángulo de propagación vertical Ψ .

Esta formulación da lugar a una reducción máxima para el ángulo de 90° ($\Psi = \pi/2$), de -4,5 dB para categoría 1 y de -3 dB para categorías 2 y 3.

No se define efecto de directividad para vehículos de categoría 4.

2.5.3. Efectos adicionales:

2.5.3.a. $\Delta L_{WR,temp}$. Efecto de la temperatura del aire en rolling noise.

Está aceptado el hecho de que la temperatura del aire afecta en la emisión de rolling noise: el nivel de potencia sonora rolling disminuye cuando la temperatura del aire aumenta. Esta contribución en función de la temperatura τ (en °C) puede expresarse mediante la potencia sonora rolling a condiciones de referencia $\tau_{ref} = 20^\circ\text{C}$:

$$\Delta L_{WR,temp} = K \times (20 - \tau)$$

Ecuación 2.21.

La ecuación es válida para temperaturas de aire entre 5 y 35°C.

El término de corrección es positivo (incrementa el ruido) para temperaturas menores de 20°C, y negativo para valores superiores. El coeficiente K depende de la superficie de la carretera y de las características del neumático. Para un cálculo de ruido simplificado, se puede aplicar a todas las superficies un valor genérico del coeficiente $K = 0,08 \text{ dB}/^\circ\text{C}$. Para un cálculo más exacto, en el anexo 2-2 se incluyen los valores del coeficiente “K” (con un rango de entre 0,03 y 0,12) para distintas propiedades de asfalto.

Los vehículos de categorías 2 y 3 ofrecen menor efecto de temperatura que los vehículos ligeros. Así, sus coeficientes “K” (ver anexo 2-2) llegan a tener la mitad de valor que los de categoría 1. En la siguiente grafica se puede ver como este parámetro tiene mayor influencia en los vehículos ligeros que en los pesados:

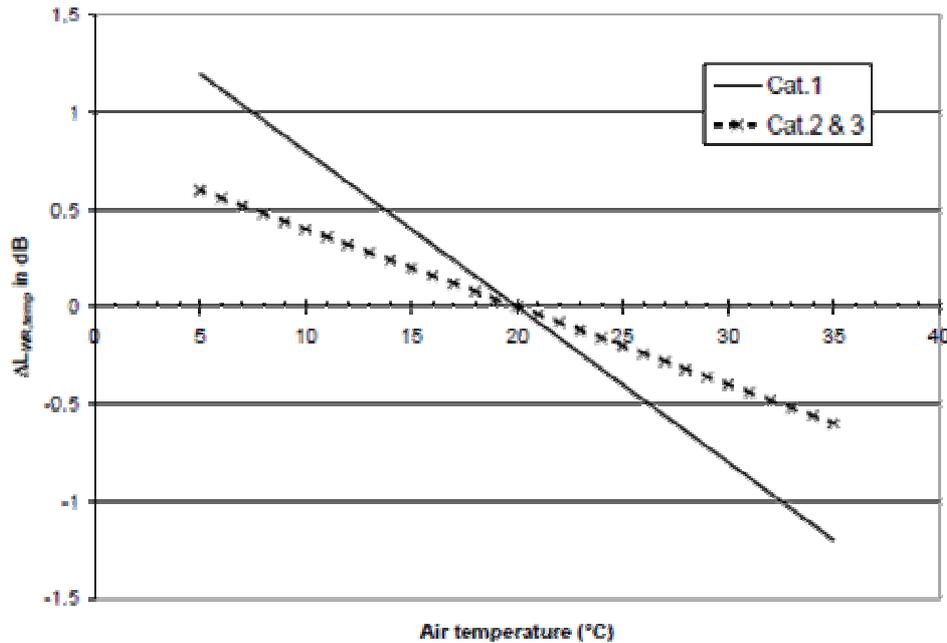


Figura 2.11. Efecto de la temperatura del aire en rolling noise.

2.5.3.b. $\Delta L_{WR,wet}$. Humedad de la calzada.

Los vehículos que circulen por una superficie húmeda emiten mayor nivel de ruido rolling noise que los que circulen por otra seca. Este efecto es relevante para los vehículos ligeros pero no es significativo para las categorías 2 y 3. Aunque el efecto en superficies densas posee una naturaleza distinta que en las porosas. El incremento de la emisión de rolling noise en cualquier superficie húmeda para vehículos de categoría 1 viene expresado por la siguiente fórmula, que también tiene en cuenta el porcentaje de tiempo de los periodos de llovizna (p%).

$$\Delta L_{WR,wet} = \max \{ (15 \times \lg(f/f_0) - 12 \times \lg(v/v_{ref}) - 48); 0 \} \times (p\%/100\%)$$

Ecuación 2.22.

donde:

- “f” es la frecuencia central de cada banda de tercio de octava.
- “f₀ = 1 KHz”.
- “v” es la velocidad del vehículo.

La corrección solo será válida para periodos en los que la capa de agua esté presente en la superficie de la calzada (por ejemplo, una capa de 2 mm de espesor). Por lo tanto, es de interés solo en lugares donde la lluvia alcance periodos significativos (p% > 20%) a lo largo del año.

En la siguiente gráfica se muestra la contribución de la humedad de la calzada (en dB) en función de la frecuencia para distintas velocidades:

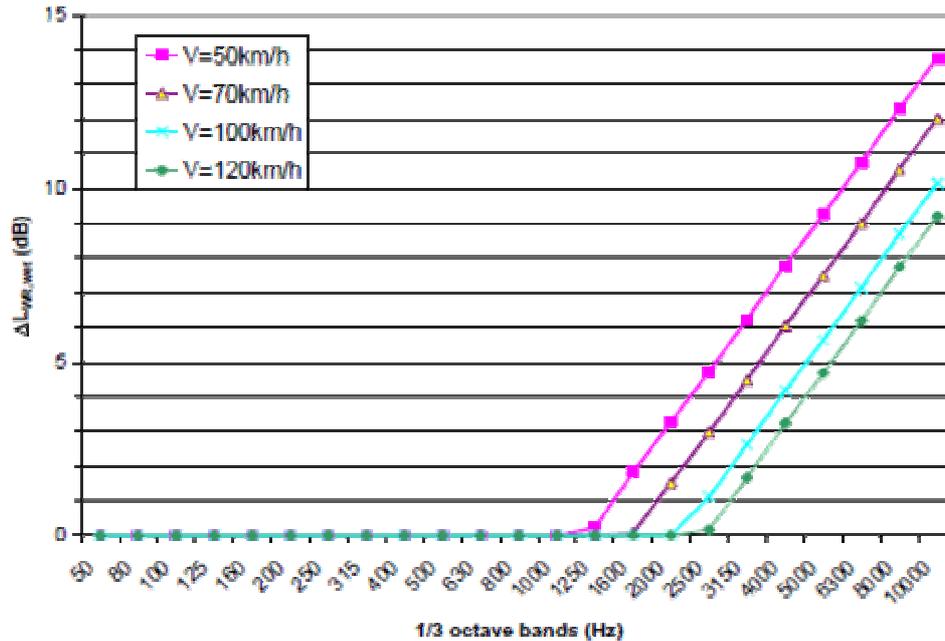


Figura 2.12. Contribución de la humedad de la calzada.

2.5.3.c. $\Delta L_{WR,2tyr}$ y $\Delta L_{WR,axle}$. Sistema de montaje de neumáticos en camiones.

Para vehículos de categoría 3 se asume por defecto una configuración de cuatro ejes: un eje de dirección (para la cabina) con dos ruedas sencillas, un eje propulsor (para la cabina) con cuatro ruedas sencillas y dos ejes trailer (para el remolque) con dos ruedas sencillas para cada uno (en total 10 ruedas). Cuando no se de este caso, se aplicará un factor de corrección proporcional al número de ejes y neumáticos propuesto en la configuración por defecto.

Para camiones cuyos ejes remolque estén equipados con doble montaje de ruedas de eje dirigitible, la emisión de rolling noise se verá ligeramente incrementada conforme a la siguiente fórmula:

$$\Delta L_{WR,2tyr} = p_t \times 0.8 \text{ dB}$$

Ecuación 2.23.

donde:

- “ p_t ” es la proporción de camiones equipados con doble montaje de ruedas de eje dirigitible.

Para camiones con un número de ejes (N_{axles}) diferente a 4, el propuesto por defecto, se empleará la siguiente corrección $\Delta L_{WR,axle}$ en dB:

$$\Delta L_{WR, axle} = P_a \times \begin{cases} 6.8 \times \lg\left(\frac{N_{axles}}{4}\right) & \text{for super - single tyres} \\ 9.1 \times \lg\left(\frac{N_{axles}}{4}\right) & \text{for double - mounted tyres} \end{cases}$$

Ecuación 2.24.

donde:

- “p_a” es la proporción de camiones equipados con N_{axles}.

2.5.3.d. $\Delta L_{WR, wid}$ - **Peso del vehículo y anchura del neumático.**

El incremento de rolling noise con la anchura del neumático para coches de pasajeros se estima en 2 dBA entre una rueda de 1970 con 155 mm de anchura y otra del 2000 con 195 mm; ó, 0,5 dBA por cada 10 mm de incremento de anchura del neumático. En las series de ruedas de coches modernos, se estima un incremento de 0,36 dBA por cada 10 mm. Por lo tanto, se propone la siguiente corrección para los neumáticos de los coches de pasajeros:

$$\Delta L_{WR, wid} = 0.04 \times (W_t - 187)$$

Ecuación 2.25.

donde:

- “W_t” es la anchura media del neumático, en mm, del parque móvil.

Si no se encuentra un dato estadístico de la anchura, se podrá tomar la siguiente relación entre el peso del vehículo (W_v) y la anchura del neumático (W_t), para coches:

$$W_t \approx 0.062 \times W_v + 118 \text{ mm.}$$

Ecuación 2.26.

Para las ruedas de los camiones no se propone corrección alguna.

2.5.3.e. $\Delta L_{WR, stud}$ - **Neumáticos con tachuelas (Studded tyres).**

En varios países de la Unión Europea, el uso de neumáticos con tachuelas o antideslizantes en coches es común en invierno. La influencia de este efecto en la emisión de rolling noise L_{WR} para vehículos de categoría 1 puede ser corregida por el parámetro $\Delta L_{WR, stud}$ (en dB).

$$\Delta L_{WR, stud} = p_s \times \begin{cases} a + b \times \lg(v / 70) & \text{for } 50 \leq v \leq 90 \text{ km/h} \\ a + b \times \lg(90 / 70) & \text{for } v > 90 \text{ km/h} \\ a + b \times \lg(50 / 70) & \text{for } v < 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

Ecuación 2.27.

donde:

- “a” y “b” son coeficientes que se aportan en el anexo 2-4, para cada banda de tercio de octava.
- “p_s” es la proporción de vehículos con neumáticos antideslizantes.

No es muy común que los camiones utilicen neumáticos añadidos, por lo que esta corrección solo se aplicará a vehículos de categoría 1.

2.5.3.f. $\Delta L_{WP,vans}$. Furgonetas de reparto.

La categoría 1 contiene por lo general coches, pero en ella también se incluyen las furgonetas de reparto (≤ 3500 kg) que pueden aparecer en múltiples ocasiones. La cantidad de estos furgones varía significativamente a lo largo de Europa, pero en algunos casos su proporción en el tráfico puede ser alta. Además, la emisión acústica de estos vehículos es en media notablemente mayor que la de un coche común y el efecto producido en la emisión del ruido total puede ser significativo.

Se estima que en los furgones, la emisión de propulsión noise es 5 dBA mayor que el producido por un coche, y 1 dBA superior para rolling noise. El efecto del porcentaje de furgones con respecto al número total de vehículos ligeros (%vans) se corrige mediante una función lineal que se aplica a cada fuente ruidosa, y solo tendrá influencia en vehículos de categoría 1.

$$\Delta L_{WP,vans} = 5.0 \times \frac{\%vans - 10.5\%}{100\%}$$

$$\Delta L_{WR,vans} = 1.0 \times \frac{\%vans - 10.5\%}{100\%}$$

Ecuaciones 2.28. y 2.29.

2.5.3.g. $\Delta L_{WP,diesel}$ - % de vehículos diesel.

Para vehículos de categoría 1, se puede dar la diferencia de que el motor trabaje con carburante diesel o lo haga con otros como gasolina, biodiesel... Los motores diesel tienden a ser más ruidosos que los demás, aunque la diferencia va disminuyendo con el tiempo. Varios tests afirman que estos motores aportan 1 dBA más de ruido que los demás, pero el efecto se puede extender hasta los +3 dBA para la emisión de propulsión noise.

Esta variación del ruido, para el porcentaje de vehículos diesel con respecto al número total de vehículos ligeros (%diesel), se tiene en cuenta utilizando la siguiente corrección lineal que se aplica al flujo de tráfico de categoría 1.

$$\Delta L_{WP,diesel} = 3.0 \times \frac{\%diesel - 19\%}{100\%}$$

Ecuación 2.30.

CAPÍTULO 3:

CNOSSOS. Modelo de propagación

3. Propagación del sonido.

3.1. Formulación del modelo.

3.1.1. Consideraciones geométricas:

3.1.1.a. Segmentación de la fuente

Las fuentes reales se describen por varias fuentes puntuales o, en el caso del tráfico de trenes o tráfico rodado, por fuentes lineales incoherentes. Una fuente lineal se divide en segmentos lineales, que son representados por fuentes puntuales situadas en su centro.

3.1.1.b. Trayectorias de propagación

La trayectoria de propagación es un plano vertical entre el receptor y la fuente puntual. El cálculo de la contribución de la fuente en el nivel de sonido del receptor es un proceso de dos pasos:

- Primero, se realiza una búsqueda en dos dimensiones en el plano horizontal para construir las trayectorias de propagación. Este proceso se refiere a la parte “path finder” del método. El resultado de este proceso es un plano vertical que conecta el receptor y la fuente.
- A continuación, se realiza un análisis geométrico en el plano vertical de la trayectoria de propagación con el fin de estimar los efectos de las reflexiones del terreno, la difracción sobre obstáculos y la refracción meteorológica.

3.1.1.c. Reflexiones en fachadas y otros obstáculos verticales

Las contribuciones de las reflexiones se tienen en cuenta por la introducción de fuentes o receptores imaginarios. Se tendrán en cuenta las reflexiones posteriores hasta una profundidad máxima de 3 reflexiones.

En la siguiente figura se pueden ver los planos de propagación verticales 1, 2 y 3 para una fuente puntual con barreras en cada lado de la calzada. Cada reflexión se corresponde con uno o más pliegues en el plano de propagación.

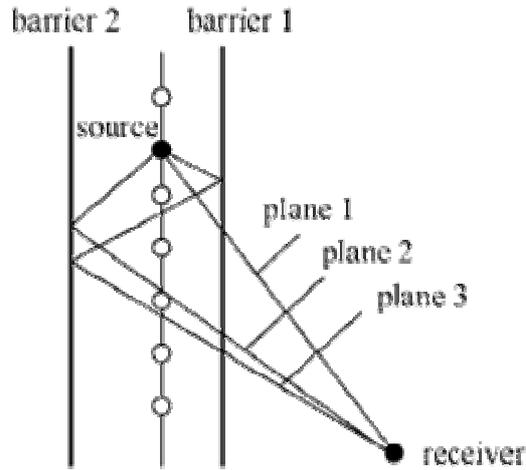


Figura 3.1. Planos de propagación 1, 2 y 3 para una fuente puntual con barreras a ambos lados de la calzada.

3.1.1.d. Datos de entrada para el cálculo punto a punto

El perfil del terreno en la sección transversal vertical de la fuente al receptor es descrita por un número N de segmentos rectos con puntos finales P_i (con $i = 0, 1, 2, \dots, N$). El modelo geométrico no distingue entre terreno natural y otros obstáculos como barreras, edificios, terraplenes, fisuras, etc. Las coordenadas del punto P_i en el plano xz son (x_i, z_i) con $x_{i+1} > x_i$.

La fuente real S_r se posiciona en $(x_0, z_0 + H_s)$ y el receptor real R_r en $(x_N, z_N + H_r)$ donde H_s y H_r son las respectivas alturas locales de fuente y receptor. Hay que tener en cuenta que las posiciones genéricas de fuente/receptor se utilizan dentro del cálculo de la propagación del sonido, representando a fuente/receptor real, o a difracciones secundarias de bordes. Se representarán como S o R sin ningún subíndice.

Para la introducción de la refracción atmosférica, se realiza una curvatura del perfil del terreno, como se describe en la sección "3.5.2. Analogía del terreno curvo". Consiste en aplicar un cambio de coordenada a los puntos P_i . Sin embargo, la fuente relativa y las alturas del receptor sobre el perfil transformado, H_s y H_r respectivamente, permanecen sin cambios.

La siguiente figura muestra un ejemplo de los puntos finales P_i a tomar en cuenta en el perfil del terreno entre fuente y receptor.

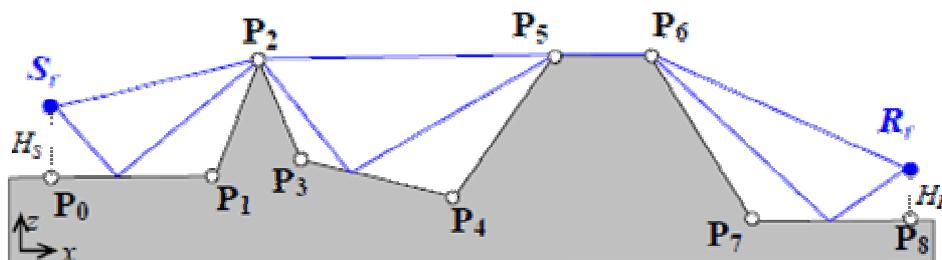


Figura 3.2. Puntos P_i a tomar en cuenta en el perfil del terreno.

A cada segmento $[P_{i-1}, P_i]$ se le asigna un valor de impedancia específica Z_i . Estos pueden ser calculados utilizando modelos disponibles, o para simplificar, pueden ser predefinidos en clases de impedancias. Sin embargo, para el caso específico en que la calzada se pavimente con una capa de superficie porosa, se aplicará una impedancia correspondiente con una superficie puramente reflectante.

3.1.2. Modelo de propagación del sonido:

3.1.2.a. Atenuación punto a punto: *Formulación principal*

El nivel de presión sonora equivalente $L_{eq,T,i}$ que genera una fuente (representada por una fuente puntual con potencia de salida L_W) es calculada mediante:

$$L_{eq,T,i} = L_{W,eq,T,i} + \Delta L_{geo} + \Delta L_{atm,i} + \Delta L_{excess,i} + \Delta L_{refl+dif,i} + \Delta L_{special,i}$$

Ecuación 3.1.

donde:

- “ $L_{eq,T,i}$ ” es el nivel de presión sonora equivalente durante el periodo de observación T.
- “ $L_{W,eq,T,i}$ ” es la potencia sonora equivalente de la fuente durante el mismo periodo T (notese que L_W debe expresarse $L_{W'}$ en el caso de que sea un segmento de fuente lineal).
- “ ΔL_{geo} ” es la divergencia geométrica.
- “ $\Delta L_{atm,i}$ ” es la absorción atmosférica.
- “ $\Delta L_{excess,i}$ ” es el exceso de atenuación. Por ejemplo la diferencia de nivel debido al terreno, la difracción y los efectos meteorológicos.
- “ $\Delta L_{ref+dif,i}$ ” es el término de corrección para la reflexión y la difracción debido a los obstáculos verticales.
- “ $\Delta L_{special,i}$ ” es el término de corrección para casos especiales donde han de ser consideradas extensiones del método básico CNOSSOS-EU descritas en este capítulo (“3. *Propagación del sonido*”). Por ejemplo, para el manejo de situaciones complejas en 3D que no se ajustan al marco de las construcciones geométricas simples en las trayectorias de propagación.

El nivel de presión sonora equivalente $L_{eq,T,i}$ en la posición del receptor se calcula mediante la suma incoherente de todas las trayectorias de propagación (N_p).

$$L_{eq,T,i} = 10 \times \lg \sum_{n=1}^{N_f} 10^{L_{eq,T,i,n}/10}$$

Ecuación 3.2.

3.1.2.b. Atenuación geométrica

La divergencia geométrica da cuenta de la propagación esférica de la energía acústica emitida por una fuente puntual en campo libre. No depende de la frecuencia y viene dada por:

- **Fuente puntual**

$$\Delta L_{geo} = 10 \times \lg \left[\frac{1}{4\pi R^2} \right]$$

Ecuación 3.3.a.

donde R es la distancia en metros entre fuente y receptor.

- **Segmento de fuente lineal** (lo suficientemente corto como para que las variaciones de la directividad de la fuente y el exceso de atenuación puedan ser ignoradas cuando la fuente se mueve entre los extremos de un segmento):

$$\Delta L_{geo} = 10 \times \lg \left[\frac{\Delta\theta}{4\pi R_{min}} \right]$$

Ecuación 3.3.b.

donde $\Delta\theta$ es el ángulo de visión y R_{min} la distancia más corta del receptor a la recta que contiene al segmento de fuente lineal.

Los parámetros R, R_{min} y $\Delta\theta$ se determinarán utilizando coordenadas 3D.

Nótese que si la fuente lineal es descompuesta en una distribución fija de fuentes puntuales, se tendrá que aplicar la ecuación 3.3.a. de este apartado y la potencia sonora equivalente para cada fuente puntual será:

$$L_{W',i} = L_{W',i} + 10 \times \lg l_i$$

Ecuación 3.3.c.

La comparación de las ecuaciones 3.3.a. y 3.3.b. nos muestra que la estimación exacta de l_s viene dada por:

$$\sin \psi = \frac{R_{min}}{R} \Rightarrow l_i = \frac{R \cdot \Delta\theta}{\sin \psi}$$

Ecuación 3.3.d.

donde Ψ es el ángulo entre la fuente lineal y la trayectoria de los rayos. Por lo tanto, las ecuaciones 3.3.c. y 3.3.d. también pueden ser utilizadas en combinación con un método de barrido angular. La ecuación 3.3.d. es válida bajo la condición $\Psi > 0$, por ejemplo, se debe tener especial cuidado en el caso en el que el receptor esté (casi) en línea con el segmento de fuente lineal.

En caso de que el patrón de directividad no pueda ser obviado sobre la longitud del segmento, el efecto combinado de la divergencia geométrica y la directividad puede ser calculado por:

$$\Delta L_{geo+dir} = 10 \times \lg \int_{s=s_1}^{s=s_2} \frac{D(\theta)}{4\pi d^2} ds$$

Ecuación 3.4.

donde θ y d se considerarán funciones de la coordenada curvilínea s a lo largo del segmento de la fuente. Para funciones de directividad simples $D(\theta)$, esta integral se puede realizar analíticamente; para directividad compleja, uno debe confiar en las técnicas de integración numérica.

Nota: Si la directividad de la fuente depende de la frecuencia, $\Delta L_{geo+dir}$ también deberá considerarse función de la frecuencia.

3.1.2.c. Absorción atmosférica

La atenuación debido a la absorción atmosférica $\Delta L_{atm,i}$ depende de la frecuencia y debe calcularse para la frecuencia central de cada banda de tercio de octava. La fórmula para el cálculo es la siguiente:

$$\Delta L_{atm,i} = -\alpha_{atm,i} \times R \times \left(1.0053255 - 0.00122622 \times \alpha_{atm,i} \times R \right)^{4.6}$$

Ecuación 3.5.

donde:

- " $\alpha_{atm,i}$ " es el coeficiente de atenuación atmosférica en dB/m, dado en la referencia "ISO 9613-1:1993(E), *Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*"

3.2. Exceso de atenuación.

3.2.1. Difracción, reflexión del terreno y dispersión:

El exceso de atenuación ΔL_{excess} es la combinación de dos componentes:

$$\Delta L_{\text{excess}} = 10 \times \lg \left(10^{\Delta L / 10} + 10^{\Delta L_{\text{scat}} / 10} \right)$$

Ecuación 3.6.

donde:

- “ ΔL ” es la parte de la onda sonora que alcanza al receptor por la difracción y la reflexión en el terreno. Será descrita en los apartados “3.2.2. Proceso recursivo”, “3.3. Atenuación por difracción” y “3.4. Atenuación del terreno”.
- “ ΔL_{scat} ” es la parte de la onda sonora que alcanza al receptor después de la dispersión por turbulencia atmosférica. Será descrita en el apartado “3.6. Dispersión por turbulencia atmosférica”.

Nótese que el exceso de atenuación depende de la frecuencia y se debe calcular para la frecuencia central de cada banda de tercio de octava.

3.2.2. Proceso recursivo:

Para el cálculo de ΔL , el perfil del terreno se divide en un número de secciones terrenales entre bordes de difracción. Como ejemplo, en la figura 3.2” los bordes de difracción son P_2 , P_5 y P_6 , mientras que las secciones terrenales son P_0 - P_2 , P_2 - P_5 , P_5 - P_6 y P_6 - P_8 .

Entonces, el exceso de atenuación es resultado de la combinación de la atenuación por difracción ΔL_D en los bordes de difracción y la atenuación del terreno ΔL_G en las secciones terrenales.

El procedimiento de cálculo se basa en un proceso recursivo de tres pasos:

- Primero, para los vértices del terreno $P_i (x_i, z_i)$ se deriva el conjunto de puntos $P_i^* (x_i, z_i + H_i)$, con $H_0 = H_S$, $H_N = H_R$ y $H_i = 0$ para $i = 1, \dots, N-1$. Por lo tanto, $P_i^* = \{S_r, P_1, P_2, \dots, P_{N-1}, R_r\}$ para $i = 0, \dots, N$.
- Segundo, se inicializan los índices i y j a $i = 0$ y $j = N$.
- Tercero, se calcula el exceso de atenuación $\Delta L = \Delta L (p_i, p_j)$.

Se determina el conjunto de puntos P_k con $i < k < j$ por encima de la línea entre la fuente puntual P_i^* y el punto receptor P_j^* .

- Si el conjunto de puntos P_k es vacío, el resultado ΔL del tercer paso es igual a la atenuación del terreno $\Delta L_G (P_i, P_j)$. En ese caso no hay bordes de difracción por encima de la línea entre la fuente y el receptor, y $\Delta L = \Delta L_G$, donde ΔL_G es calculado utilizando el modelo de transición descrito en el apartado “3.4.3. Modelo de transición”.
- Si el conjunto de puntos P_k no es vacío, se realizarán los dos siguientes sub-pasos.

- 1) Se seleccionará el punto P_k con la diferencia de longitud de trayectoria más larga, de entre el conjunto de puntos P_k . La diferencia de longitud de trayectoria se define mediante la siguiente expresión:

$$\delta(P_i^*, P_k, P_j^*) = d(P_i^*, P_k) + d(P_k, P_j^*) - d(P_i^*, P_j^*)$$

Ecuación 3.7.

donde $d(P, Q)$ es la distancia entre los puntos P y Q.

2) El resultado ΔL del tercer paso viene dado por:

$$\Delta L = \Delta L_D(P_i^*, P_k, P_j^*) + \Delta L(P_i, P_k) + \Delta L(P_k, P_j)$$

Ecuación 3.8.

donde el término ΔL representa la atenuación por difracción de la trayectoria de sonido $P_i^* - P_k - P_j^*$, y los últimos dos términos se determinan por la aplicación repetida del tercer paso.

La primera vez que se realiza el tercer paso, P_i^* y P_j^* corresponden con la fuente real S_r y el receptor real R_r . Las siguientes veces, sin embargo, P_i^* y/o P_j^* corresponden a una fuente secundaria S en el borde de difracción y/o a un receptor secundario R en el borde de difracción, respectivamente.

El cálculo de la atenuación por difracción ΔL_D se describe en la sección “3.3. Atenuación por difracción”. Y el cálculo de la atenuación del terreno ΔL_G en “3.4. Atenuación del terreno”.

3.3. Atenuación por difracción.

La atenuación por difracción ΔL_D viene dada por la solución aproximada de Deygout [Deygout, 1966]:

$$\begin{aligned} \Delta L_D &= 0 && \text{for } N_f < -0.25 \\ \Delta L_D &= -6 + 12\sqrt{-N_f} && \text{for } -0.25 \leq N_f < 0 \\ \Delta L_D &= -6 - 12\sqrt{N_f} && \text{for } 0 \leq N_f < 0.25 \\ \Delta L_D &= -8 - 8\sqrt{N_f} && \text{for } 0.25 \leq N_f < 1 \\ \Delta L_D &= -16 - 10 \lg N_f && \text{for } N_f \geq 1 \end{aligned}$$

Ecuaciones 3.9.a., 3.9.b., 3.9.c., 3.9.d. y 3.9.e.

donde N_f es el número de Fresnel:

$$N_f = \frac{2\delta}{\lambda}$$

Ecuación 3.10.

- “ λ ” es la longitud de onda acústica.
- “ δ ” es la diferencia (con su signo) de longitud de trayectoria entre la trayectoria de rayos difractados [S-P-R] y la trayectoria directa [S-R].

En la siguiente figura, los ángulos θ_S , $\theta_{S'}$, θ_R y $\theta_{R'}$ son evaluados con respecto a la línea vertical en el punto difractado P. En el lado de la fuente S, los ángulos θ_S y $\theta_{S'}$ son positivos a la izquierda (sentido antihorario), y en el lado del receptor R, los ángulos θ_R y $\theta_{R'}$ son positivos a la derecha (sentido horario). Los ángulos difractados θ_S y θ_R se darán en el rango $[0, \pi]$. Las posiciones de las imágenes de fuente y receptor S' y R' se emplearán en el siguiente apartado "3.4. Atenuación del terreno" y sus ángulos $\theta_{S'}$ y $\theta_{R'}$ estarán comprendidos en el rango $[0, 2\pi]$, puesto que las imágenes (tanto de fuente como de receptor) pueden estar en el semiplano opuesto.

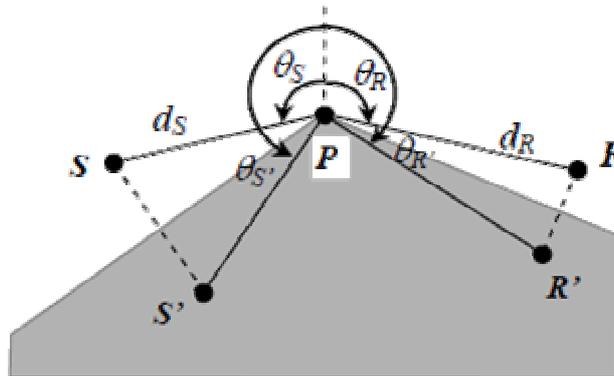


Figura 3.3. Ángulos evaluados con respecto a la línea vertical en el punto difractado P.

Para la expresión de $\bar{\delta}$, se considerarán dos regiones con respecto al ángulo total de desviación $\theta = \theta_S + \theta_R$ (cuando se consideren todas las combinaciones posibles, θ estará comprendido en el rango $[0, 4\pi]$): $\theta \leq \pi$ y $\theta > \pi$

Para $\theta \leq \pi$, se aplica la definición usual de la diferencia de longitud de la trayectoria $\bar{\delta}$:

$$\bar{\delta} = -(d_S + d_R - d_d)$$

Ecuación 3.11.

Con la longitud de trayectoria directa:

$$d_d = \sqrt{d_S^2 + d_R^2 - 2d_S d_R \cos \theta}$$

Ecuación 3.12.

Para $\theta > \pi$ (es decir, en la zona sombreada detrás del obstáculo difractado), se realizará una extrapolación analítica de la definición geométrica de la diferencia de longitud de trayectoria.

$$\bar{\delta} = d_d \left(\frac{1}{2} \varepsilon^2 + \frac{1}{3} \varepsilon^4 \right)$$

$$d_d = (d_S + d_R)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{d_S d_R}}{d_S + d_R} (\theta - \pi)$$

Ecuaciones 3.13., 3.14. y 3.15.

Para la introducción de la atenuación del terreno, se empleará la amplitud de la presión sonora difractada p_D . Se define en su forma normalizada:

$$p_D = \frac{e^{ik_0 d_d}}{d_d} 10^{\Delta L_D / 20}$$

Ecuación 3.16.

Con d_d definido igual que antes para $\theta \leq \pi$ y $\theta > \pi$.

3.4. Atenuación del terreno.

3.4.1. Modelo de terreno cóncavo:

La atenuación del terreno se calcula en un sistema de coordenadas d-h asociado a cada segmento del terreno (ver figura 3.4.). El eje d es alineado con la extensión de segmento en línea infinita, y el eje h es perpendicular al d y apuntando hacia arriba. En el caso de un perfil de terreno complejo, cada segmento dará paso a un sistema de coordenadas diferente. h_S y h_R son las alturas de la fuente y el receptor, medido en estas coordenadas locales.

El método distingue tres tipos de segmentos del terreno.

- Segmentos de terreno cóncavo para los que la fuente y el receptor estén por encima del segmento del terreno (es decir, $h_S \geq 0$ y $h_R \geq 0$).
- Segmentos de terreno convexo para los que la fuente o el receptor (o bien uno de ellos sea reemplazado por el borde difractado más cercano del perfil) esté por debajo del segmento extendido (es decir, $h_S < 0$ o $h_R < 0$).
- Segmentos envolventes donde la fuente y el receptor, y todos los eventuales puntos de difracción estén por debajo del segmento extendido (básicamente $h_S = h_R = 0$).

En esta sección, son tratadas solamente situaciones con segmentos de terreno cóncavos y segmentos envolventes.

En las siguientes fórmulas, la atenuación del terreno cóncavo ΔL_{GC} se calcula por la propagación desde una posición de fuente (secundaria) P_i^* ($x_i, z_i + H_i$) hasta una posición de receptor (secundario) P_j^* ($x_j, z_j + H_j$) sobre el perfil del terreno P_k (x_k, z_k) con $k = i, \dots, j$.

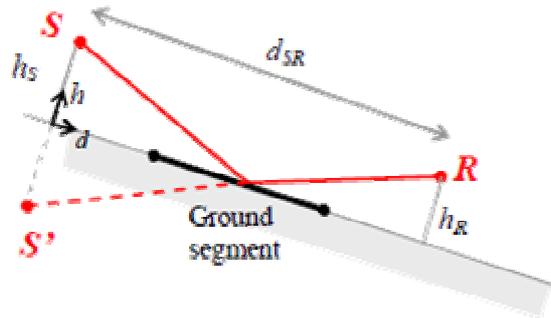


Figura 3.4. Modelo de fuente secundaria.

3.4.1.a. Atenuación del terreno para segmentos cóncavos

La atenuación del terreno para segmentos cóncavos ΔL_{Gc} es definido por una media ponderada de dos atenuaciones del terreno diferentes.

$$\Delta L_{Gc} = F_G \Delta L_{G,flat} + (1 - F_G) \Delta L_{G,valley}$$

Ecuación 3.17.

donde:

- “ $\Delta L_{G,flat}$ ” es la atenuación del terreno para terrenos relativamente planos.
- “ $\Delta L_{G,valley}$ ” es la atenuación del terreno para terrenos en forma de valle.

El parámetro F_G viene dado por:

$$F_G = 1 - e^{-1/x_G^2}$$

$$x_G = N_w / \sqrt{1 + (f/f_c)^2}$$

$$N_w = \sum_{k=i}^{j-1} w_k$$

Ecuaciones 3.18., 3.19. y 3.20.

w_k son ponderaciones de Fresnel modificadas de los segmentos del terreno y f_c es la frecuencia de transición. Ambos se definen en el apartado “3.4.2. Ponderación Fresnel”.

La atenuación del terreno $\Delta L_{G,flat}$ viene dada por:

$$\Delta L_{G,flat} = \sum_{k=i}^{j-1} w_k \Delta L_{G,flat,k}$$

$$\Delta L_{G,flat,k} = 10 \times \lg \left(\left| 1 + C_k D_k Q_k \right|^2 + \left(1 - C_k^2 \right) \left| D_k Q_k \right|^2 \right)$$

Ecuaciones 3.21. y 3.22.

La atenuación del terreno $\Delta L_{G,valley}$ viene dada por:

$$\Delta L_{G,valley} = -10 \times \lg \left(\left| 1 + \sum_{k=i}^{j-1} w_k C_k D_k Q_k \right|^2 + \sum_{k=i}^{j-1} w_k \left(1 - C_k^2 \right) \left| D_k Q_k \right|^2 \right)$$

Ecuación 3.23.

En estas dos últimas fórmulas,

- “ Q_k ” es un coeficiente de reflexión de onda esférica (ver sección “3.4.1.b. Coeficiente de reflexión de onda esférica”).
- “ D_k ” es un factor de ponderación geométrica (ver sección “3.4.1.c. Factor de ponderación geométrica”).
- “ C_k ” es un factor de coherencia (ver sección “3.4.1.d. Factor de coherencia”).
- “ w_k ” es una ponderación de Fresnel modificada (ver sección “3.4.2.b. Ponderación Fresnel modificada”).

Los sumatorios de las ecuaciones 3.20., 3.21. y 3.23. son sobre los segmentos del terreno $k = i, \dots, j-1$ entre la fuente y el receptor.

3.4.1.b. Coeficiente de reflexión de onda esférica

El coeficiente de reflexión de onda esférica Q_k se calcula para el segmento del terreno k , mediante la siguiente expresión:

$$Q = \mathcal{R}_p + (1 - \mathcal{R}_p) F_Q^{n_a}$$

Ecuación 3.24.

donde \mathcal{R}_p es el coeficiente de reflexión de onda plana:

$$\mathcal{R}_p(\theta) = \frac{Z \cos(\theta) - 1}{Z \cos(\theta) + 1}$$

Ecuación 3.25.

donde θ es el ángulo de reflexión con respecto a la normal de la superficie y Z es la impedancia del terreno normalizada. F_Q es el factor de pérdida dado por Chien y Soroka [Chien, 1980].

El coeficiente n_G fue introducido con el fin de mejorar la solución de Chien y Soroka, en el caso de *grazing propagation* (ya le daremos traducción; no lo tengo muy claro).

$$n_G = 1 - 0.7 \exp(-h_m/h_G)$$

Ecuación 3.26.

donde $h_m = (h_S + h_R)/2$ y $h_G = \lambda/32$.

3.4.1.c. Factor de ponderación geométrica

Para el cálculo del factor de ponderación geométrica D_k , se consideran cuatro casos:

- **Caso 1: $i = 0$ y $j = N$** (sin difracción, el camino directo entre la fuente real y el receptor real no está bloqueada por ningún obstáculo). En este caso:

$$D_k = \frac{P_F(S_{r,k'}, R_r)}{P_F(S_r, R_r)}$$

$$P_F(S, R) = \frac{e^{jk_0 d(S, R)}}{d(S, R)}$$

Ecuaciones 3.27. y 3.28.

$S_{r,k'}$ es la fuente imagen de la fuente real S_r , con respecto al segmento del terreno k (ver figura 3.4.).

- **Caso 2: $i = 0$ y $j < N$** (es decir, para todos los segmentos k entre la fuente real y el borde difractado situado más a la izquierda en P_j). En este caso:

$$D_k = \frac{P_D(S_{r,k'}, P_j, R_r)}{P_D(S_r, P_j, R_r)}$$

Ecuación 3.29.

donde p_D viene dado en la ecuación 3.16.

- **Caso 3: $i > 0$ y $j = N$** (es decir, para todos los segmentos k entre el borde difractado situado más a la derecha y el receptor real). En este caso:

$$D_k = \frac{P_D(S_r, P_i, R_{r,k'})}{P_D(S_r, P_i, R_r)}$$

Ecuación 3.30.

$R_{r,k'}$ es el receptor imagen del receptor real R_r , con respecto al segmento del terreno k .

- **Caso 4:** $i > 0$ y $j < N$ (es decir, entre dos bordes difractados sucesivos). En este caso:

$$D_k = \frac{P_D(S_r, P_i, P_{j,k'}) P_D(P_{i,k'}, P_j, R_r)}{P_D(S_r, P_i, P_j) P_D(P_i, P_j, R_r)}$$

Ecuación 3.31.

$P_{i,k'}$ y $P_{j,k'}$ son los puntos imagen de los puntos P_i y P_j respectivamente, con respecto al segmento de terreno k .

3.4.1.d. Factor de coherencia

El factor de coherencia C_k denota la pérdida de coherencia debido a la fluctuación de la diferencia de fase entre las ondas sonoras directa y reflejada. Esta pérdida de coherencia puede ser debida a la integración de la banda de frecuencia, incertidumbres sobre la altura de la fuente y el receptor y turbulencias atmosféricas. El factor de coherencia se expresa como el producto de dos factores de coherencia.

$$C_{coh} = C_a \times C_b$$

Ecuación 3.32.

El factor C_a está relacionado con la banda de frecuencias media. Viene dado por:

$$C_a = \exp\left(-\frac{1}{2}\sigma_\varphi^2\right)$$

Ecuación 3.33.

donde σ_φ es la desviación estándar de la fluctuación en la diferencia de fase φ , que se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi = k[d(S', R) - d(S, R)] \approx \frac{2\pi f}{c_0} \frac{2h_S h_R}{D_{SR}}$$

Ecuación 3.34.

con $D_{SR} = d(S, R)$.

σ_φ depende de las desviaciones estándar σ_f , σ_{c_0} , $\sigma_{D_{SR}}$, σ_{h_S} y σ_{h_R} de las cantidades f , c_0 , D_{SR} , h_S y h_R respectivamente, mediante la siguiente relación:

$$\left(\frac{\sigma_\varphi}{\varphi}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{c_0}}{c_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{D_{SR}}}{D_{SR}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{h_S}}{h_S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{h_R}}{h_R}\right)^2$$

Ecuación 3.35.

El primer término del lado derecho de la ecuación se utiliza para tener en cuenta la integración de la banda de frecuencias (el exceso de atenuación se calcula solo para la frecuencia central de cada banda de tercio de octava). Este término viene dado por:

$$\frac{\sigma_f}{f} = \frac{1}{3} \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{3} \left(2^{B/2} - 2^{-B/2} \right)$$

Ecuación 3.36.

con $B = 1/3$ en el caso de bandas de tercio de octava, y $B = 1$ en el caso de bandas de octava.

En el segundo término, se utiliza por defecto un valor igual a cero para σ_{C_0} : este término es despreciado, puesto que las fluctuaciones de la velocidad del sonido son tomadas en cuenta por separado por el factor de coherencia C_b .

Para el tercer término, se empleará por defecto un valor igual a cero para $\sigma_{D_{SR}}$.

Para los términos cuarto y quinto, las desviaciones estándar σ_{h_S} y σ_{h_R} son parámetros de entrada del modelo, que debe especificarse en combinación con las alturas h_S y h_R . El cuarto término se toma en cuenta solo para el caso $i = 0$ (en cuyo caso la fuente es real). Para el caso $i > 0$ (en cuyo caso la fuente es secundaria) el cuarto término puede ser despreciado. Igualmente, el quinto término se tendrá en cuenta solo para el caso $j = N$, y será despreciado para $j < N$. Se aplicará para ambos casos un límite superior de 1.

$$\text{fourth term} = \min \left(1; \left(\frac{\sigma_{h_S}}{h_S} \right)^2 \right) \text{ and fifth term} = \min \left(1; \left(\frac{\sigma_{h_R}}{h_R} \right)^2 \right)$$

El factor de coherencia debido a la turbulencia C_b viene dado por:

$$C_b = \exp \left(- \frac{3}{8} D_I \gamma_I k_0^2 \rho^{5/3} D_{SR} \right)$$

$$\gamma_t = \left(\frac{C_I}{I_0} \right)^2 + \frac{22}{3} \left(\frac{C_W}{c_0} \right)^2$$

$$\rho = \frac{h_S h_R}{h_S + h_R}$$

Ecuaciones 3.37., 3.38. y 3.39.

$C_T = 0.364$ es una constante. C_T y C_W son los parámetros de estructura de turbulencia para la temperatura y velocidad del viento, respectivamente. En la práctica, estos parámetros no son fácilmente accesibles por lo que, en las “Directrices para un uso competente del CNOSSOS-EU”, se propone el uso simplificado de un conjunto de parámetros γ_t como datos de entrada directos. Un típico valor de turbulencia moderada es $\gamma_t = 5 \cdot 10^{-6}$.

3.4.2. Ponderación Fresnel:

3.4.2.a. Ponderación Fresnel Básica

El elipsoide de Fresnel para la propagación del sonido desde la fuente S hasta el receptor R es definido por el conjunto de puntos P satisfaciendo la siguiente ecuación:

$$d(S,P) + d(P,R) - d(S,R) = \lambda / n_F$$

Ecuación 3.40.

donde:

- “d(P, Q)” es la distancia entre los puntos P y Q.
- “S y R” se sitúan en los focos del elipsoide.
- “ n_F ” es el parámetro Fresnel.

Para el cálculo inicial de las ponderaciones Fresnel, se utiliza $n_F = 8$. Para el de las ponderaciones de Fresnel modificadas se empleará un parámetro Fresnel dependiente de la frecuencia (ver apartado “3.4.2.b. Ponderación Fresnel Modificada”).

Cuando el campo sonoro es reflejado por una superficie plana, se empleará la fuente imagen S' en lugar de la real S. La “elipse de Fresnel” se define como la intersección entre el plano y el elipsoide de Fresnel con focos en la fuente imaginaria S' y el receptor R, como se muestra en la figura 3.5., en donde se muestran tanto el elipsoide como la elipse de Fresnel.

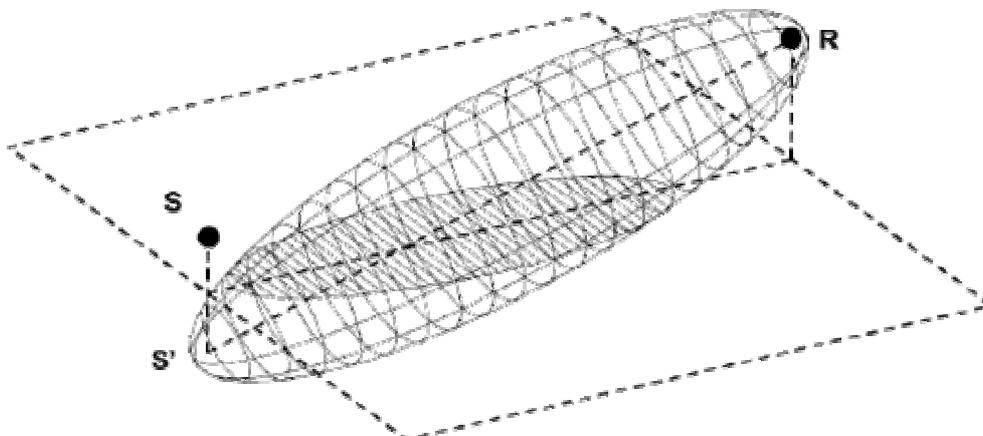


Figura 3.5. Elipse y elipsoide de Fresnel.

La ponderación Fresnel de una región del terreno corresponde al área de la región incluida dentro de la elipse de Fresnel, dividida por la superficie total de la elipse de Fresnel. En un modelo de propagación bidimensional, cada segmento del terreno es considerado como una tira infinitamente larga en la tercera dimensión.

Las ponderaciones Fresnel son calculadas en un sistema de coordenadas local ligado a cada segmento. En los procedimientos de cálculo, estas coordenadas se conocen como d (distancia a lo largo del segmento) y h (altura relativa del segmento). En este sistema de coordenadas local dh con el origen en la proyección normal de la fuente S en el plano (ver figura 3.6.), las coordenadas de la fuente S son $(0, h_S)$ y las del receptor local son (d_{SR}, h_R) .

En este sistema de coordenadas, el centro F de la elipse de Fresnel a lo largo del eje d es:

$$d_F = \frac{d_{SR}}{2} \left(1 + \frac{h_S^2 - h_R^2}{D^2 - d_{SR}^2} \right)$$

Ecuación 3.41.

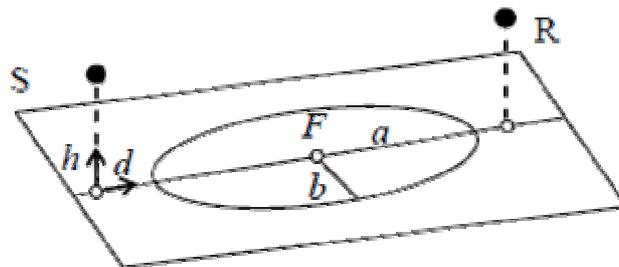


Figura 3.6. Representación de la elipse de Fresnel entre fuente y receptor.

El parámetro a viene dado por:

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D^4 + (D_S^2 - D_R^2)^2 - 2D^2(D_S^2 + D_R^2)}{D^2 - d_{SR}^2}}$$

Ecuación 3.42.

Con:

$$D = \frac{\lambda}{n_F} + \sqrt{(h_S + h_R)^2 + d_{SR}^2}$$

$$D_S^2 = d_F^2 + h_S^2$$

$$D_R^2 = (d_{SR} - d_F)^2 + h_R^2$$

Ecuaciones 3.43., 3.44. y 3.45.

La ponderación Fresnel $w_{F,k}$ de un segmento del terreno k que se extiende desde $d = d_1$ hasta $d = d_2$ viene dado por:

$$w_{F,k} = F_w(\xi_2) - F_w(\xi_1)$$

Ecuación 3.46.

Donde la función F_w viene dada por:

$$F_w(x) = \begin{cases} 0 & \text{for } x \leq -1 \\ 1 - \frac{1}{\pi} \left(\cos^{-1}(x) - x\sqrt{1-x^2} \right) & \text{for } -1 < x < 1 \\ 1 & \text{for } x \geq 1 \end{cases}$$

Ecuación 3.47.

Y el parámetro ξ_m (para $m = 1, 2$) viene dado por:

$$\xi_m = \frac{d_m - d_F}{a}$$

Ecuación 3.48.

Para el punto final izquierdo del primer segmento (justo debajo de la fuente),
 $F_w = 0$.

Para el punto final derecho del último segmento (justo debajo del receptor),
 $F_w = 1$.

3.4.2.b. Ponderación Fresnel Modificada

Con el fin de mejorar la exactitud de la ponderación Fresnel en el rango de alta frecuencia, se introduce la ponderación Fresnel modificada [Plovsing, 2001]. La siguiente expresión es similar a la de la ponderación básica (ecuación 3.46.), pero con argumentos ξ_m' modificados:

$$w_{F,k} = F_w(\xi_2') - F_w(\xi_1')$$

Ecuación 3.49.

Para $m = 1, 2$:

$$\xi_m' = \frac{\xi_m - \xi_C}{1 - \xi_m \xi_C}$$

$$\xi_C = \frac{d_C - d_F}{a}$$

Ecuaciones 3.50. y 3.51.

Donde:

$$d_C = \alpha(f) d_F + (1 - \alpha(f)) d_{SP}$$

$$d_{SP} = d_{SR} \frac{h_S}{h_S + h_R}$$

$$\alpha(f) = \left[1 + \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right]^{-1}$$

Ecuaciones 3.52., 3.53. y 3.54.

El parámetro Fresnel n_F para la ponderación modificada es:

$$n_F = 32 [1 - \exp(-f_c^2/f^2)]$$

Ecuación 3.55.

Donde f_c es la frecuencia de transición que se definirá a continuación.

3.4.2.c. Frecuencia de transición

La frecuencia de transición f_c se define como:

$$f_c = \sqrt{f_{\min} f_{\max}}$$

Ecuación 3.56.

Las frecuencias f_{\min} y f_{\max} deberán verificar:

$$\varphi_{\max}(f_{\min}) = \pi/2$$

$$\varphi_{\max}(f_{\max}) = \pi$$

Ecuaciones 3.57. y 3.58.

Donde φ_{\max} es la diferencia de fase máxima entre las ondas sonoras directa y reflejada.

$$\varphi_{\max}(f) = \max_k \{ \varphi_k(f) \}$$

$$\varphi_k(f) = \text{Arg}(Q_k) + k_0 [d(S_k, R) - d(S, R)]$$

Ecuaciones 3.59. y 3.60.

Donde $\text{Arg}(Q)$ es el cambio de fase en la reflexión.

Se pueden encontrar más detalles acerca del cálculo de f_{\min} y f_{\max} en la referencia “E. Salomons, D. van Maercke, J. Defrance, F. De Roo, *The Harmonoise sound propagation model, to be published in Acta Acustica united with Acustica*”. [localizar referencia (cosa mía)]

3.4.3. Modelo de transmisión:

3.4.3.a. Segmentos convexos y coeficientes

En la figura 3.7. se muestra un típico segmento convexo en el que $h_S < 0$ y $h_R > 0$. El cálculo sería igual para un segmento convexo con $h_S > 0$ y $h_R < 0$.

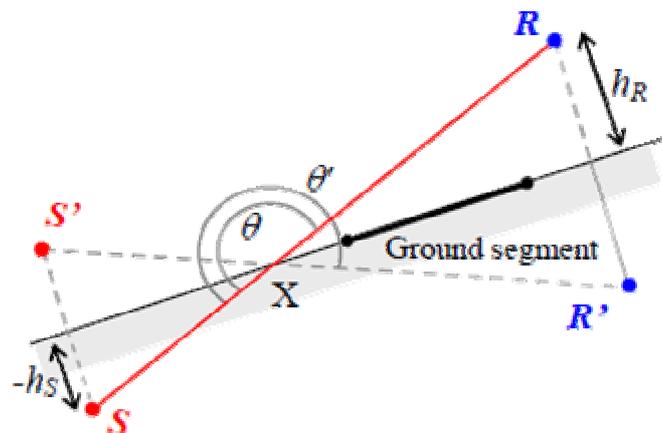


Figura 3.7. Segmento convexo con fuente y receptor secundarios.

En esta situación, el coeficiente de reflexión de onda esférica Q_k , el factor de ponderación geométrica D_k , el factor de coherencia C_k y la ponderación Fresnel w_k son calculados de la misma forma que fueron calculados para los segmentos del terreno cóncavos, utilizando las ecuaciones desde la 3.17. hasta la 3.60., con las dos únicas modificaciones siguientes:

- 1) La fuente S debe ser reemplazada por la fuente imaginaria S' con respecto al segmento del terreno. Consecuentemente, h_S debe ser reemplazada por $-h_S$.
- 2) El factor de ponderación geométrica D_k descrito en la sección “3.4.1.c. Factor de ponderación geométrica” debe ser multiplicado por el siguiente factor:

$$\frac{p_D(S, X, R')}{p_D(S, X, R)}$$

Ecuación 3.60.

donde:

- “X” es el punto de reflexión especular, como se muestra en la figura 3.7.
- “S” es la fuente original antes de ser reemplazada por S'.
- “ p_D ” es la amplitud de difracción definida en la ecuación 3.16.

Como $\theta = \pi$, la amplitud de difracción $p_D(S, X, R) = \frac{1}{2} p_F(S, R)$, con p_F definida en la ecuación 3.28.

3.4.3.b. Atenuación del terreno convexo

Para el cálculo de la atenuación del terreno convexo $\Delta L_{Gt}(P_i, P_j)$, primero es necesario determinar el borde de difracción más alto, por debajo de la línea SR. Este punto P_k corresponde con la diferencia de longitud de trayectoria más pequeña, como queda definida en la ecuación 3.7.

Entonces, la atenuación del terreno convexo $\Delta L_{Gt}(P_i, P_j)$ es calculada mediante la siguiente expresión:

$$\Delta L_{Gt} = \chi \Delta L_1 + (1 - \chi) \Delta L_2$$

$$\Delta L_1 = \Delta L_D(S, P_k, R) + \Delta L_{Gc}(P_i, P_k) + \Delta L_{Gc}(P_k, P_j)$$

$$\Delta L_2 = \Delta L_{Gc}(P_i, P_j)$$

Ecuaciones 3.62., 3.63. y 3.64.

Donde ΔL_D es la atenuación por difracción definida en la sección "3.3. Atenuación por difracción", y ΔL_{Gc} es la atenuación para segmentos cóncavos definida en la sección "3.4.1.a. Atenuación del terreno por segmentos cóncavos", teniendo en cuenta las modificaciones especificadas en la sección "3.4.3.a. Segmentos convexos y coeficientes".

El factor χ de la ecuación 3.62 viene dado por:

$$\chi = \chi_1 + (1 - \chi_1)(1 - \chi_2)$$

Ecuación 3.65.

Donde χ_1 es:

$$\chi_1 = \begin{cases} 1 - \exp(-1/\tau_1^2) & \text{for } \tau_1 > 0 \\ 1 & \text{for } \tau_1 \leq 0 \end{cases}$$

$$\tau_1 = \frac{\delta_{spec,avg} - \delta_{dif}}{\lambda/8}$$

Ecuaciones 3.66. y 3.67.

Y χ_2 es:

$$\chi_2 = \begin{cases} 1 - \exp(-1/\tau_2^2) & \text{for } \tau_2 > 0 \\ 1 & \text{for } \tau_2 \leq 0 \end{cases}$$

$$\tau_2 = \frac{\delta_{dif}}{\lambda/64}$$

Ecuaciones 3.68. y 3.69.

La cantidad δ_{dif} se define como la diferencia de longitud de trayectoria entre la trayectoria difractada S-P_k-R y la directa S-R definida por la ecuación 3.7.

La cantidad $\delta_{spec,avg}$ se define como:

$$\delta_{spec,avg} = \frac{\sum_{k=i}^{j-1} w_k \delta_{spec,k}}{\sum_{k=i}^{j-1} w_k}$$

Ecuación 3.70.

Para cada segmento del terreno k, $\delta_{spec,k}$ se define como:

$$\delta_{spec,k} = d(S_k', R) - d(S, R)$$

Ecuación 3.71.

Donde S_k' es la imagen de la fuente con respecto al segmento del terreno k.

3.5. Refracción Atmosférica.

3.5.1. Perfil de la velocidad del sonido:

El efecto de la refracción atmosférica se basa en la suposición de un perfil vertical lineal de la velocidad de sonido efectiva:

$$c(z) = c_0 \left(1 + \frac{z}{R_c}\right)$$

Ecuación 3.72.

donde:

- "R_c" es una constante.
- "z" es la coordenada vertical.
- "c₀" es la velocidad de sonido definida como función absoluta de la temperatura T (en Kelvin).

$$c_0 = c_{ref} \sqrt{\tau / \tau_{ref}}$$

Ecuación 3.73.

con $c_{ref} = 331$ m/s y $\tau_{ref} = 273$ K.

En virtud de dicho perfil, las trayectorias de los rayos son circulares con un radio de curvatura aproximadamente igual a $|R_c|$. Sin embargo, la refracción atmosférica es modelada más eficientemente mediante el uso de la analogía del terreno curvo.

En la práctica, el valor de R_c va ligado a los parámetros meteorológicos a través de una aproximación más realística del perfil de velocidad de sonido, conocido como el perfil lin-log. Los detalles son descritos en el anexo 3-1.

3.5.2. Analogía del terreno curvo:

En esta analogía, la transformación de coordenada, llamada “conformal mapping”, es aplicada con el fin de convertir las trayectorias de rayos circulares en trayectorias rectas. De esta manera, el esquema de cálculo descrito en las secciones anteriores para trayectorias de rayo rectas puede ser aplicado para el sistema transformado.

La transformación en el plano complejo consiste en la transformación de la coordenada compleja $w = x + iz$ en $w' = x' + iz'$, con:

$$w' = \frac{C(w - w_0)}{C + (w - w_0)}$$

$$w_0 = \frac{x_0 + x_N}{2} + i \frac{z_0 + H_S + z_N + H_R}{2}$$

$$C = i C_0$$

$$C_0 = 2 \times \left(\frac{H_S + H_R}{2} + R_c \right)$$

Ecuaciones 3.74., 3.75., 3.76. y 3.77.

Aplicando esta transformación en la ecuación de onda bidimensional en el plano xz con velocidad de sonido variable $c(z)$ como se define en la ecuación 3.72., se obtiene una ecuación de onda transformada en el plano $x'z'$. En esta nueva ecuación de onda, la velocidad de sonido puede aproximarse como una constante $c(z) \approx c_0$ cuando la distancia entre fuente y receptor d (S, R) es menor que $0.2 |R_c|$ ($d(S, R) < 0.2 |R_c|$).

En otras palabras, la analogía del terreno curvo solo debe aplicarse en casos donde $|R_c|$ es mayor que cinco veces la distancia entre fuente y receptor. Esta condición por lo general vale para las predicciones de ruido de tráfico rodado y ferrocarril, con gradientes de velocidad de sonido moderados (por ejemplo $1/R_c < 0.1 \text{ s}^{-1}$) y distancias de propagación hasta 1000 metros.

Las ecuaciones 3.74. y 3.77. llevan a:

$$x' = \frac{C_0^2 x''}{x''^2 + (C_0 + z'')^2}$$

$$z' = \frac{C_0(x''^2 + z''^2 + z''C_0)}{x''^2 + (C_0 + z'')^2}$$

$$x'' = x - \frac{x_0 + x_N}{2}$$

$$z'' = z - \frac{z_0 + H_S + z_N + H_R}{2}$$

Ecuaciones 3.78., 3.79., 3.80. y 3.81.

3.6. Dispersión por turbulencia atmosférica.

El efecto de la dispersión de las ondas sonoras por turbulencia atmosférica se introduce por la suma del término de dispersión de turbulencia, ΔL_{scat} , para el exceso de atenuación. Este término se define como:

$$\Delta L_{scat} = 25 + 10 \lg \gamma_t + 3 \lg \frac{f}{1000} + 10 \lg \frac{d}{100}$$

Ecuación 3.82.

donde:

- “d” es la distancia horizontal entre la fuente y el receptor.
- “ γ_t ” es el parámetro utilizado para describir la fuerza de la turbulencia.

γ_t es definido en la sección “3.4.1.d. Factor de coherencia” en la ecuación 3.38.

CAPÍTULO 4: CNOSSOS. Predicción

4. Predicción de L_{Aeq} mediante CNOSSOS en la posición del receptor

4.1. Cálculo teórico de los valores “Rolling noise” y “Propulsion noise” para un determinado vehículo

Mediante estos valores obtendremos los niveles de potencia sonora que genera un vehículo en tráfico rodado. Las fórmulas a emplear para el cálculo de ambos parámetros son las siguientes:

Rolling noise:

$$L_{WR} = A_R + B_R \times \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,road} + \Delta L_{WR,region}$$

Ecuación 4.1.

$$\Delta L_{WR,road} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) + \Delta L_{WR,age}$$

Ecuación 4.2.

donde:

- A_R y B_R son coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos que se especifican en los anexos del segundo capítulo “2. Modelo CNOSSOS: Emisión de ruido para tráfico rodado”.
- v es la velocidad del vehículo en km/h.
- v_{ref} es la velocidad de referencia (70 km/h).
- $\Delta L_{WR,road}$ es la corrección relacionada con el tipo de calzada.
- $\alpha_{i,m}$ y β_m son coeficientes para la corrección del tipo de calzada que se especifican en los anexos del segundo capítulo “2. Modelo CNOSSOS: Emisión de ruido para tráfico rodado”.
- $\Delta L_{WR,region}$ será despreciada, en esta primera aproximación.
- $\Delta L_{WR,age}$ será despreciada, en esta primera aproximación.

El resultado se expresará en dB, con referencia 1 pW. Se expresarán para cada banda de tercio de octava, desde 25 Hz hasta 10 kHz.

Propulsion noise:

$$L_{WP} = A_P + B_P \times \frac{(v - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,road} + \Delta L_{WP,other}$$

Ecuación 4.3.

$$\Delta L_{WP,road} = \text{Max}\{\alpha_{i,m}; 0\}$$

Ecuación 4.4.

donde:

- A_P y B_P son coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos que se especifican en los anexos del segundo capítulo "2. Modelo CNOSSOS: Emisión de ruido para tráfico rodado".
- v es la velocidad del vehículo.
- v_{ref} es la velocidad de referencia (70 km/h).
- $\Delta L_{WP,road}$ es la corrección relacionada con el tipo de calzada.
- $\alpha_{i,m}$ son coeficientes para la corrección del tipo de calzada que se especifican en los anexos del segundo capítulo "2. Modelo CNOSSOS: Emisión de ruido para tráfico rodado".
- $\Delta L_{WP,other}$ será despreciada, en esta primera aproximación.

Estos valores quedarán definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad.

La expresión, una vez ponderadas todas las bandas, será en dBA.

4.2. Valores "Fuente inferior" y "Fuente superior"

El CNOSSOS define para los vehículos de categorías 1 a 3 dos fuentes puntuales equivalentes, inferior y superior. El cálculo de la potencia de las mismas vendrá definido por las siguientes fórmulas.

Fuente inferior:

$$L_{W,dir,low,i,m}(v) = 10 \times \lg\left(0.8 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.2 \times 10^{L_{WP,i,m}/10}\right) + \Delta L_{W,dir,i,m}$$

Ecuación 4.5.

donde:

- $L_{WR,i,m}$ y $L_{WP,i,m}$ son los valores de Rolling y Propulsion noise obtenidos anteriormente.
- $\Delta L_{W,dir,i,m}$ será despreciada, en esta primera aproximación.

Los subíndices i y m se refieren a la categoría y frecuencia, respectivamente.

Fuente superior:

$$L_{W,dir,high,i,m}(v) = 10 \times \lg\left(0.2 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.8 \times 10^{L_{WP,i,m}/10}\right) + \Delta L_{W,dir,i,m}$$

Ecuación 4.6.

donde:

- $L_{WR,i,m}$ y $L_{WP,i,m}$ son los valores de Rolling y Propulsion noise calculados anteriormente.
- $\Delta L_{W,dir,i,m}$ será despreciada, en esta primera aproximación.

Estos valores quedarán definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad.

La expresión, una vez ponderadas todas las bandas, será en dBA.

Para vehículos de categoría 4 solo tendremos el valor de fuente superior.

4.3. Potencia instantánea de la fuente, $L_{W,0}$

Haciendo la suma logarítmica de ambos valores obtendremos la potencia instantánea de la fuente. En este caso la fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_{W,0} = 10 \times \log \left(0.5 \times 10^{L_{W,low,i,m}/10} + 0.5 \times 10^{L_{W,high,i,m}/10} \right)$$

Ecuación 4.7.

donde:

- $L_{W,low,i,m}$ y $L_{W,high,i,m}$ son los valores de fuente inferior y superior calculados anteriormente.

Estos valores quedarán definidos para tres variables; tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad.

La expresión, una vez ponderadas todas las bandas, será en dBA.

Para vehículos de categoría 4 este apartado no será de aplicación, ya que la única fuente considerada es la superior (propulsión).

4.4. Potencia media por unidad de longitud, $L_{W',eq,line}$

El paso siguiente será evaluar la potencia lineal de una vía en función de la intensidad del tráfico. La potencia media por unidad de longitud viene expresada en dB/m (ref. 10^{-12} w/m).

En este caso, además de todas las variables anteriores, habrá que tener en cuenta el periodo de medida (T, en segundos) y el número de vehículos en dicho periodo (N).

La fórmula a emplear es la siguiente:

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

Ecuación 4.8.

donde:

- $L_{W,0}$ es el nivel de potencia sonora instantánea de la fuente (un vehículo) obtenido anteriormente.
- T es el periodo de medida en segundos.
- N es el número de vehículos en el periodo de medida.
- V es la velocidad media del tráfico, en m/s.

Estos valores quedarán definidos para las tres variables anteriores (tipo de vehículo, tipo de calzada y velocidad) y también para T y N (periodo de medida y vehículos en el periodo, respectivamente).

4.5. Predicción del Nivel de Presión Sonora en el receptor, $L_{Aeq,T}$

El parámetro que se predice es el nivel L_{Aeq} en dBA. En este apartado habrá que tener en cuenta la distancia de medida (h, en metros).

La formula a emplear es la siguiente:

$$L_{Aeq,T} = L_{W',eq,line} - 3 - 10 \cdot \log h$$

Ecuación 4.9.

donde:

- $L_{W',eq,line}$ es el nivel de potencia sonora media por unidad de longitud calculado anteriormente.
- h es la distancia de la línea de tráfico al receptor, en metros.

Estos valores quedarán definidos para las cinco variables anteriores (tipo de vehículo, tipo de calzada, velocidad, periodo de medida y nº de vehículos) y también para h (distancia de medida). La reducción de 3 dB es debida a la consideración de suelo reflectante. La reducción por distancia es debida a la atenuación por divergencia para fuentes lineales.

4.6. Ejemplo

Mediante un sencillo ejemplo mostraremos el proceso de cálculo. Supongamos un vehículo ligero circulando a velocidad de 90 km/h. Supondremos un tipo de asfalto, por ejemplo, TBC. La tabla 4.1. muestra los valores de A_R , B_R , α_{im} , β_m , así como el proceso para el cálculo de L_{WR} (evaluado mediante las ecuaciones 4.1. y 4.2.) cual es el nivel de potencia de la componente del *rolling noise*.

Freq.	A_R	B_R	α_{im}	β_m	L_{WR}
25	69.9	33.0	0.0	6.0	74,2
31.5	69.9	33.0	0.0	6.0	74,2
40	69.9	33.0	0.0	6.0	74,2
50	74.9	30.0	0.0	6.0	78,8
63	74.9	30.0	0.0	6.0	78,8
80	74.9	30.0	0.0	6.0	78,8
100	79.3	41.0	0.0	6.0	84,4
125	82.0	41.2	0.0	6.0	87,2
160	81.2	42.3	0.9	6.0	87,4
200	80.9	41.8	1.7	6.0	87,8
250	78.9	38.6	2.6	6.0	86,4
315	78.8	35.5	2.5	6.0	85,8
400	80.5	32.9	2.5	6.0	87,2
500	85.0	25.0	2.4	6.0	90,8
630	87.9	25.0	2.0	6.0	93,3
800	90.9	27.0	1.6	6.0	96,1
1000	93.3	33.4	1.2	6.0	98,8
1250	92.8	36.7	1.6	6.0	99,1
1600	91.5	37.0	2.0	6.0	98,2
2000	88.5	37.5	2.4	6.0	95,6
2500	84.9	37.5	1.6	6.0	91,2
3150	81.8	38.6	0.8	6.0	87,5
4000	78.7	39.6	0.0	6.0	83,7
5000	74.9	40.0	0.0	6.0	79,9
6300	71.8	39.9	0.0	6.0	76,8
8000	69.1	40.2	0.0	6.0	74,1
10000	65.6	40.3	0.0	6.0	70,7

Tabla 4.1. Evaluación del nivel de potencia de la componente *rolling noise*.

El proceso es similar (tabla 4.2.) para el cálculo de la componente *propulsion noise*, L_{WP} , a partir de los coeficientes A_P , B_P y α_{im} , de acuerdo con las ecuaciones 4.3. y 4.4.

Freq.	A_P	B_P	$Max\{\alpha_{im}; 0\}$	L_{WP}	$L_{WR} - L_{WP}$
25	87,0	0,0	0.0	87,0	-12,8
31.5	87,0	0,0	0.0	87,0	-12,8
40	87,0	0,0	0.0	87,0	-12,8
50	87,9	0,0	0.0	87,9	-9,1
63	90,8	-3,0	0.0	89,9	-11,1
80	89,9	0,0	0.0	89,9	-11,1
100	86,9	8,0	0.0	89,2	-4,8
125	82,6	6,0	0.0	84,3	2,8
160	81,9	6,0	0.9	84,5	2,9
200	82,3	7,0	1.7	86,0	1,8
250	83,9	8,0	2.6	88,8	-2,4
315	83,3	8,0	2.5	88,1	-2,3
400	82,4	8,0	2.5	87,2	0,1
500	80,6	8,0	2.4	85,3	5,5
630	80,2	8,0	2.0	84,5	8,8
800	77,8	8,0	1.6	81,7	14,4
1000	78,0	8,0	1.2	81,5	17,3
1250	81,4	8,0	1.6	85,3	13,8
1600	82,3	8,0	2.0	86,6	11,6
2000	82,6	8,0	2.4	87,3	8,4
2500	81,5	8,0	1.6	85,4	5,9
3150	80,2	8,0	0.8	83,3	4,2
4000	78,5	8,0	0.0	90,0	-6,3
5000	75,6	8,0	0.0	86,3	-6,4
6300	73,3	8,0	0.0	83,2	-6,4
8000	71,0	8,0	0.0	80,6	-6,4
10000	68,1	8,0	0.0	77,1	-6,5

Tabla 4.2. Evaluación del nivel de potencia de la componente *propulsion noise*.

Hemos añadido la última columna en la tabla 4.2. para valorar el efecto de cada una de las fuentes de ruido. Como vemos, para esta categoría (vehículo ligero) y velocidad (90 km/h) la componente *rolling noise* es la dominante en la banda 500-3150 Hz, mientras que la componente *propulsion noise* es dominante en las muy bajas 25-100 Hz) y muy altas frecuencias (4-10 kHz).

El paso siguiente consiste en evaluar los niveles de potencia de las dos fuentes puntuales que se asignan a cada vehículo, fuente inferior (ecuación 4.5.) y fuente superior (ecuación 4.6.), así como la potencia instantánea, $L_{W,0}$ de la fuente total (ecuación 4.7.). La tabla 4.3. describe el proceso.

Freq.	$L_{W,dir,low}$	$L_{W,dir,high}$	$L_{W,o}$
25	80,8	86,1	84,2
31.5	80,8	86,1	84,2
40	80,8	86,1	84,2
50	82,7	87,1	85,4
63	84,1	89,1	87,3
80	84,1	89,0	87,2
100	85,9	88,6	87,4
125	86,7	85,0	86,0
160	86,9	85,3	86,2
200	87,5	86,4	87,0
250	87,0	88,4	87,7
315	86,4	87,7	87,1
400	87,2	87,2	87,2
500	90,1	87,1	88,9
630	92,5	88,1	90,8
800	95,2	89,7	93,2
1000	97,9	92,1	95,9
1250	98,1	92,7	96,2
1600	97,3	92,3	95,5
2000	94,8	90,7	93,2
2500	90,6	87,3	89,2
3150	86,9	84,5	85,9
4000	85,9	89,3	87,9
5000	82,2	85,6	84,2
6300	79,0	82,5	81,1
8000	76,4	79,9	78,5
10000	72,9	76,4	75,0

Tabla 3. Nivel de potencia de las fuentes inferior, superior e instantánea total.

El paso siguiente será evaluar la Potencia media por unidad de longitud, $L_{W',eq,line}$ de la vía, en función de la intensidad del tráfico. Tal potencia media por unidad de longitud viene expresada en dB/m (ref. 10^{-12} w/m). En este caso, además de todas las variables anteriores, habrá que tener en cuenta el periodo de medida (T, en segundos) y el número de vehículos en dicho periodo (N). Emplearemos la ecuación 4.8.

Para nuestro ejemplo, supondremos el paso de un único vehículo (N=1) circulando por una línea recta infinita. Si suponemos que el receptor se encuentra a distancia h de la línea de circulación, el nivel sonoro vendrá dado por la ecuación 4.9.

La Tabla 4.4. evalúa los niveles sonoros, incluyendo el nivel global sin y con ponderación A.

Freq.	$L_{W,0}$	$L_{W',eq,line}$	Pond. A	$L_{AW',eq,line}$	$L_{Aeq,T}$
25	84,2	55,8	-44,7	11,1	-1,9
31.5	84,2	55,8	-39,4	16,4	3,4
40	84,2	55,8	-34,6	21,2	8,2
50	85,4	56,9	-30,2	26,7	13,7
63	87,3	61,2	-26,2	35,0	22,0
80	87,2	58,8	-22,5	36,3	23,3
100	87,4	55,1	-19,1	36,0	23,0
125	86,0	56,4	-16,1	40,3	27,3
160	86,2	56,6	-13,4	43,2	30,2
200	87,0	57,0	-10,9	46,1	33,1
250	87,7	56,3	-8,6	47,7	34,7
315	87,1	55,7	-6,6	49,1	36,1
400	87,2	56,6	-4,8	51,8	38,8
500	88,9	59,6	-3,2	56,4	43,4
630	90,8	61,9	-1,9	60,0	47,0
800	93,2	64,7	-0,8	63,9	50,9
1000	95,9	67,4	0	67,4	54,4
1250	96,2	67,6	0,6	68,2	55,2
1600	95,5	66,8	1	67,8	54,8
2000	93,2	64,3	1,2	65,5	52,5
2500	89,2	60,0	1,3	61,3	48,3
3150	85,9	56,4	1,2	57,6	44,6
4000	87,9	52,7	1	53,7	40,7
5000	84,2	49,0	0,5	49,5	36,5
6300	81,1	46,0	-0,1	45,9	32,9
8000	78,5	43,4	-1,1	42,3	29,3
10000	75,0	40,0	-2,5	37,5	24,5
Banda Ancha		75,1 dB		74,5 dBA	61,5 dBA

Tabla 4.4. Evaluación del nivel sonoro para el paso de un vehículo ligero a 90 km/h a distancia de 10 m de la vía.

Si el tráfico que circulara por la vía fuera de N vehículos a la hora, el nivel se incrementaría en $10 \cdot \text{Lg}N$. Si el tráfico fuera compuesto (por ejemplo, incluyendo vehículos de otra u otras categorías, sería necesario evaluar (con procedimiento similar) los niveles sonoros de tales categorías y combinarlos para obtener el nivel global.

CAPÍTULO 5:

Campaña de medidas y dispositivo experimental

5. Campaña de medidas y dispositivo experimental

5.1. Descripción del caso práctico

En este apartado se explicará como se ha pasado de la teoría propuesta en los capítulos anteriores a la práctica. Para poder verificar que las predicciones del modelo CNOSSOS son aplicables a las carreteras de la comunidad foral Navarra es necesario medir el ruido que estos generan a su paso. Para ello se ha procedido de la siguiente manera:

- 1) Se ha colocado un sonómetro, previamente calibrado en el laboratorio de acústica de la Universidad Pública de Navarra, a 10 metros de distancia respecto del centro del carril más cercano de la vía. De esta forma se han obtenido datos a distancias de 10 metros para un carril y 13 metros para el carril adyacente.
- 2) En una tabla se han recogido todos los pasos existentes durante un periodo de más o menos 20 minutos. Anotando para cada uno de ellos la velocidad, la distancia al sonómetro y el tipo de vehículo en función de su categoría.
- 3) Después de volcar los datos del sonómetro en el ordenador se ha empleado el programa "Noise Explorer" para visualizar la curva de L_{Aeq} . Se han seleccionado únicamente los pasos individuales, es decir la curva de ruido generada por el paso de un único vehículo, pasando cada uno de ellos ordenadamente a una hoja Excel. El número total de pasos válidos que posteriormente se han analizado ha sido de 214.
- 4) Disponiendo uno por uno de todos los valores se ha procedido al cálculo de varios parámetros así como a su representación en gráficas o comparación con los datos predichos del CNOSSOS.

Se ha intentado obtener el máximo rango posible de datos en cuanto a las distintas variables (velocidad, tipo de asfalto y categoría del vehículo) para poder garantizar posteriormente un análisis fiable. De esta manera la selección del lugar de medición ha sido previamente estudiada, realizándose medidas en 7 puntos distintos. De esta forma se han podido almacenar datos con 3 tipos de asfaltos totalmente distintos dependiendo de su estado, velocidades de entre 50 y 120km/h y categorías de vehículos 1, 2, 3 y 4b. Aún así, cabe destacar que no se han obtenido pasos para ciclomotores (categoría 4a) y que la mayoría de los datos obtenidos han sido para vehículos ligeros (categoría 1).

Para la toma de datos se ha colocado el sistema de medición en un entorno libre de obstáculos y con una geometría del terreno plana. De este modo se conseguirá evitar que los rebotes sonoros incidan en el sonómetro y así obtener unos resultados semejantes a los que se pueden tener en campo libre.

En lo referente al cálculo de parámetros se ha procedido de la misma forma que se refleja en el modelo CNOSSOS, teniendo en cuenta el modelo de propagación. Obteniéndose valores medidos tanto de $L_{W,0}$ como de L_{Aeq} en la posición del receptor para cada uno de los pasos.

Para finalizar, se han comparado los resultados con los predichos por el nuevo modelo para establecer el error y sacar las correspondientes conclusiones.

5.2. Dispositivo experimental

Todas las medidas realizadas han sido tomadas con el sonómetro integrador B&K tipo 2260 ("Investigator"). N° de serie: 2027578, con micrófono de precisión B&K tipo 4189. N° de serie: 1931036.

Previo a las medidas, se llevó a cabo calibración con el calibrador sonoro B&K tipo 4230. N° de serie: 1380268. El módulo usado fue el B&K tipo BZ 7203 ("Perfiles sonoros").

Posteriormente los datos fueron analizados por medio del Software Noise Explorer de B&K en el Laboratorio de Acústica del Departamento de Física de la Universidad Pública de Navarra.

CAPÍTULO 6: Resultados

6. Resultados

6.1. Caso particular

6.1.1. Cálculo del L_{Aeq} a partir de los datos obtenidos en el sonómetro

En este apartado se explicarán uno por uno todos los pasos que se han dado con cada medida para el cálculo del parámetro L_{Aeq} . El sonómetro registra el L_{Aeq} de cada segundo pero el objetivo de este apartado es calcular el valor global de cada paso. El valor final que se obtiene es el que refleja el nivel sonoro global del paso del vehículo, aunque más adelante también se realizarán comparaciones con el valor $L_{W,0}$. Una vez colocado el sonómetro en la posición correcta (figura 6.1.) se comienza a analizar el ruido.

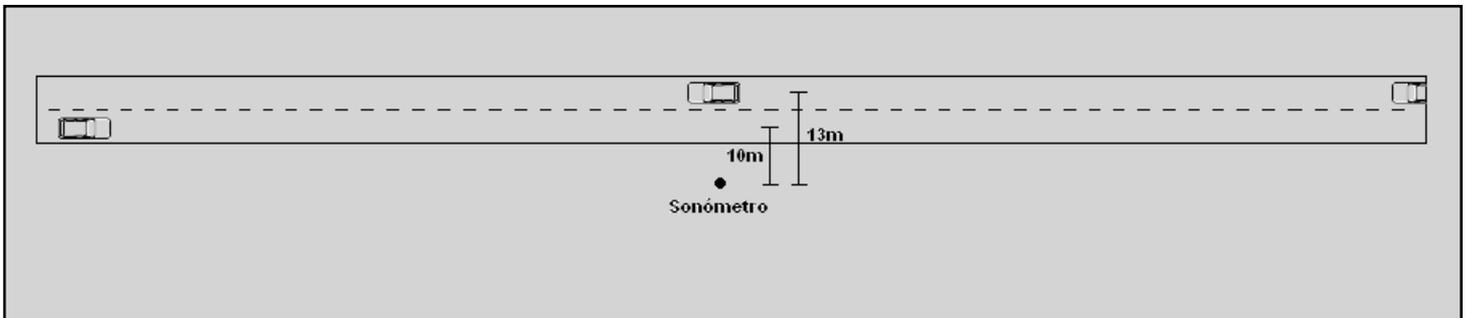


Figura 6.1. Distancia de colocación del sonómetro respecto de las vías.

La siguiente figura se muestra para cada segundo el valor de L_{Aeq} captado para un vehículo de categoría 2 que circula a 100km/h por una vía situada a 13 metros de distancia.

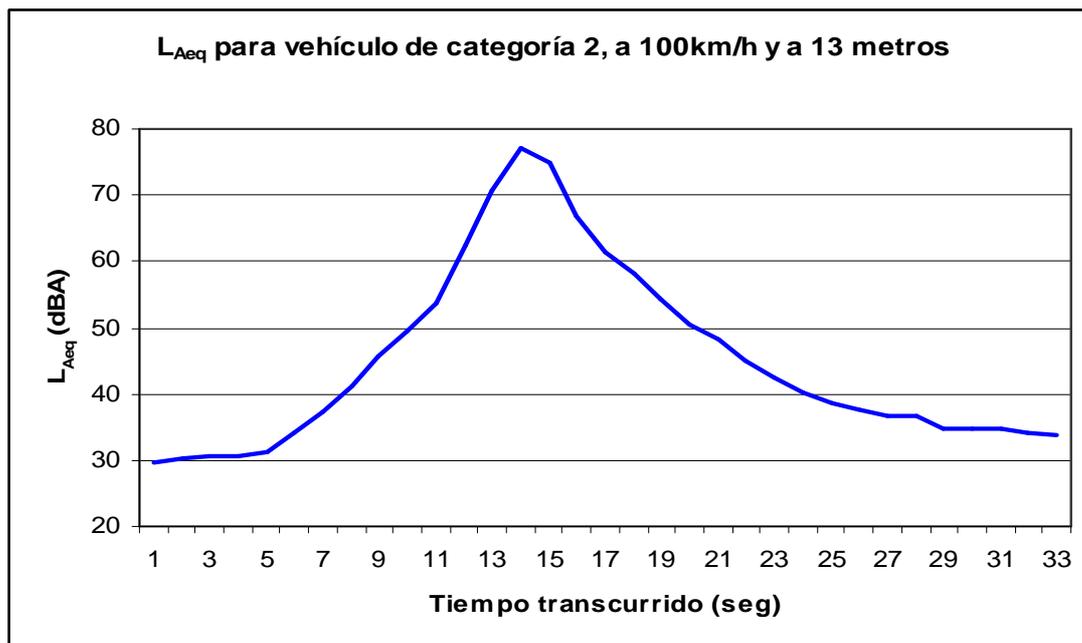


Figura 6.2. Ejemplo de L_{Aeq} registrado en el sonómetro para cada segundo.

El sonómetro además de calcular el L_{Aeq} de cada segundo también ofrece el nivel sonoro de cada banda de tercio de octava para cada segundo sin ponderar. Para poder encontrar el valor general se calculará la energía (aplicando $10^{(L/10)}$) de cada banda para cada segundo y se sumarán obteniendo un único valor para cada tercio de octava. Estos son los valores de energía que se han obtenido para este caso en concreto:

Frec (Hz)	Energía	L_{eq} (dB)	L_{Aeq} (dBA)
25	8626897,3	54,2	9,5
31,5	8182410,9	53,9	14,5
40	6542222,3	53,0	18,4
50	6468664,8	52,9	22,7
63	6924673,7	53,2	27,0
80	14817555,6	56,5	34,0
100	9353576,3	54,5	35,4
125	4524269,4	51,4	35,3
160	8145334,2	53,9	40,5
200	8896278,1	54,3	43,4
250	7872230,6	53,8	45,2
315	20737894,8	58,0	51,4
400	10160434,6	54,9	50,1
500	14543211,4	56,4	53,2
630	9705586,0	54,7	52,8
800	12200801,2	55,7	54,9
1000	14970614,1	56,6	56,6
1250	20620516,8	58,0	58,6
1600	11270565,9	55,3	56,3
2000	5587008,7	52,3	53,5
2500	4197950,2	51,0	52,3
3150	2106132,0	48,0	49,2
4000	1099360,5	45,2	46,2
5000	533544,5	42,1	42,6
6300	259337,1	39,0	38,9
8000	110923,8	35,3	34,2
10000	44647,1	31,3	28,8
		Banda ancha:	65,0

Tabla 6.1. Valores para cada tercio de octava y banda ancha.

Además de los valores de energía, en la tabla 6.1. también se muestran los valores de L_{eq} (dB) y L_{Aeq} (dBA). El primero se calcula mediante la ecuación 6.1. y expresa el nivel sonoro del paso de un vehículo para una determinada frecuencia, mientras que los valores del segundo son los ponderados en A de los primeros. Para calcular el L_{Aeq} en banda ancha se suman todos los valores anteriores logaritmicamente.

$$L_{eq} = 10 * \log \left(\frac{N}{T} * \text{"energía"} \right)$$

Ecuación 6.1.

donde:

- “N” es el número de vehículos que pasaron durante esa medida.
- “T” es el tiempo en segundos de la medida.
- “energía” hace referencia a cada uno de los valores de esa columna en la tabla 6.1.

6.1.2. Cálculo del $L_{W,0}$ a partir de los datos obtenidos en el sonómetro

El $L_{W,0}$ es la potencia instantánea de la fuente. Mediante este parámetro se van a poder comparar con mayor facilidad los valores medidos con los predichos ya que no tiene en cuenta las pérdidas por propagación y de esta forma se pueden despreciar tanto distancias como tiempos de medida. Así se englobarán todos los datos por categorías y velocidades.

El cálculo del mismo se realiza a través de los datos de L_{Aeq} obtenidos anteriormente y se procede de la siguiente manera:

El tiempo de medida de este caso particular ha sido de 33 segundos, la velocidad de 100km/h y la distancia en línea recta hasta la vía de 13 metros. Con todos los datos se emplea la siguiente fórmula:

$$L_{W,0} = L_{Aeq} + 3 + 10 \log (h) - 10 \log \left(\frac{N}{T \cdot V} \right)$$

Ecuación 6.2.

donde:

- “N” es el número de vehículos que pasaron durante esa medida.
- “T” es el tiempo en segundos de la medida.
- “V” es la velocidad del vehículo en m/s
- “h” es la distancia entre el vehículo y el sonómetro
- “ L_{Aeq} ” es el nivel sonoro ponderado A en el receptor calculado previamente.

En la siguiente tabla se muestran los resultados para este caso:

Frec (Hz)	L _{Aeq} (dBA)	L _{w,0} (dBA)
25	9,5	53,2
31,5	14,5	58,3
40	18,4	62,1
50	22,7	66,5
63	27,0	70,8
80	34,0	77,8
100	35,4	79,2
125	35,3	79,0
160	40,5	84,3
200	43,4	87,2
250	45,2	88,9
315	51,4	95,1
400	50,1	93,8
500	53,2	97,0
630	52,8	96,5
800	54,9	98,6
1000	56,6	100,3
1250	58,6	102,3
1600	56,3	100,1
2000	53,5	97,2
2500	52,3	96,1
3150	49,2	93,0
4000	46,2	90,0
5000	42,6	86,3
6300	38,9	82,6
8000	34,2	77,9
10000	28,8	72,6
Banda ancha:		108,8

Tabla 6.2. Valores para cada tercio de octava y banda ancha.

Se han conseguido tomar datos de 214 vehículos. Ello ha conllevado el cálculo de estos dos parámetros para esa cantidad de pasos. A continuación se han ordenado en grupos por categorías y velocidades para así poder sacar la media y la desviación de cada uno de los mismos. Todos estos resultados, junto a las predicciones del CNOSSOS, se mostrarán en el siguiente apartado.

6.2. Exposición de los resultados

En este apartado se realizará una exposición de los resultados medidos frente a los calculados por el nuevo modelo. Para ello se empleará el valor de la potencia instantánea de la fuente ($L_{w,0}$) ya que permite englobar todos los datos por categorías y velocidades. Así se han calculado para cada una de estas variables su valor promedio y su desviación estándar (en banda ancha y tercio de octava), para de esta forma poder observar rápidamente como se asemejan las curvas medida y calculada. Posteriormente, en el capítulo séptimo, se realizará el análisis de estos resultados.

6.2.1. $L_{W,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades

En esta primera gráfica quedan representados todos los pasos referentes a los vehículos ligeros (categoría 1). Se han cogido todos los valores de $L_{W,0}$ y se ha calculado la media y la desviación estándar para cada una de las distintas velocidades. Para finalizar se ha agregado una línea de tendencia logarítmica y se han introducido también todas las predicciones del CNOSSOS de $L_{W,0}$ para categoría 1 por tipos de asfalto. El resultado es el siguiente:

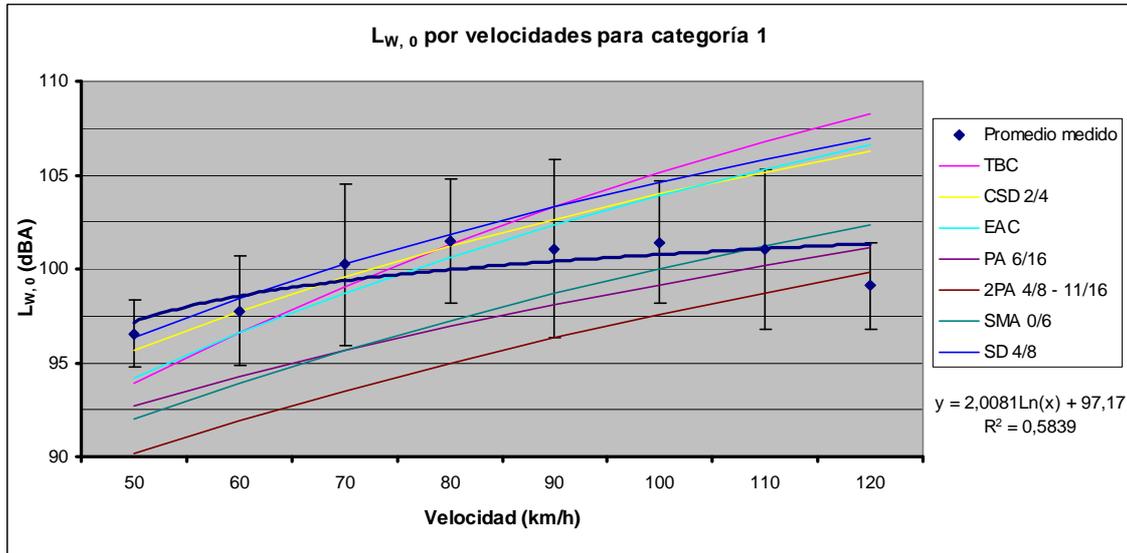


Figura 6.3. $L_{W,0}$ medido y predicho por velocidades para categoría 1.

El mismo método ha sido empleado para representar los valores de las restantes categorías. Debido a que los vehículos pesados y motocicletas no son tan comunes como los vehículos ligeros, la gráfica más representativa será la de la figura 6.3., perdiéndose conforme se avanza en categoría por falta de pasos registrados. A continuación se muestran las gráficas referentes a la categoría 2, 3 y 4b. No se muestra la gráfica de la categoría 4a por no disponer de dato alguno.

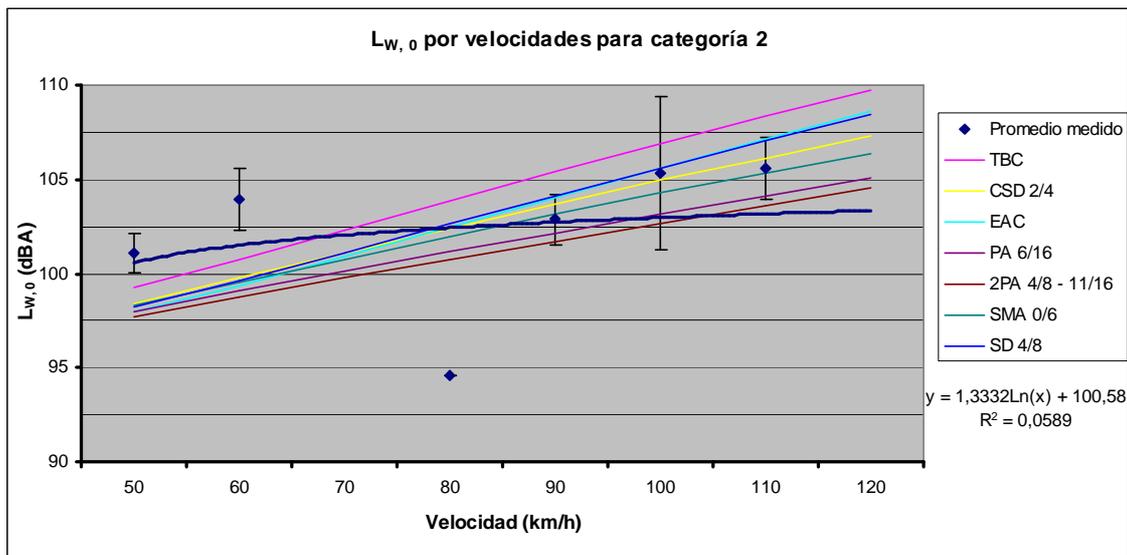


Figura 6.4. $L_{W,0}$ medido y predicho por velocidades para categoría 2.

Valores de $L_{W,0}$ para vehículos de categoría 3:

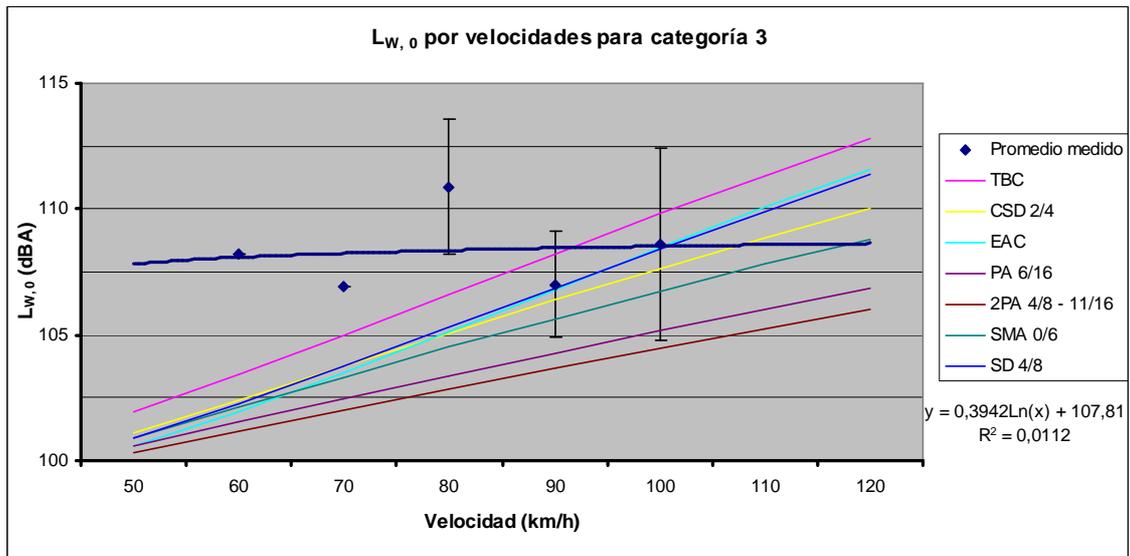


Figura 6.5. $L_{W,0}$ medido y predicho por velocidades para categoría 3.

Valores de $L_{W,0}$ para vehículos de categoría 4b:

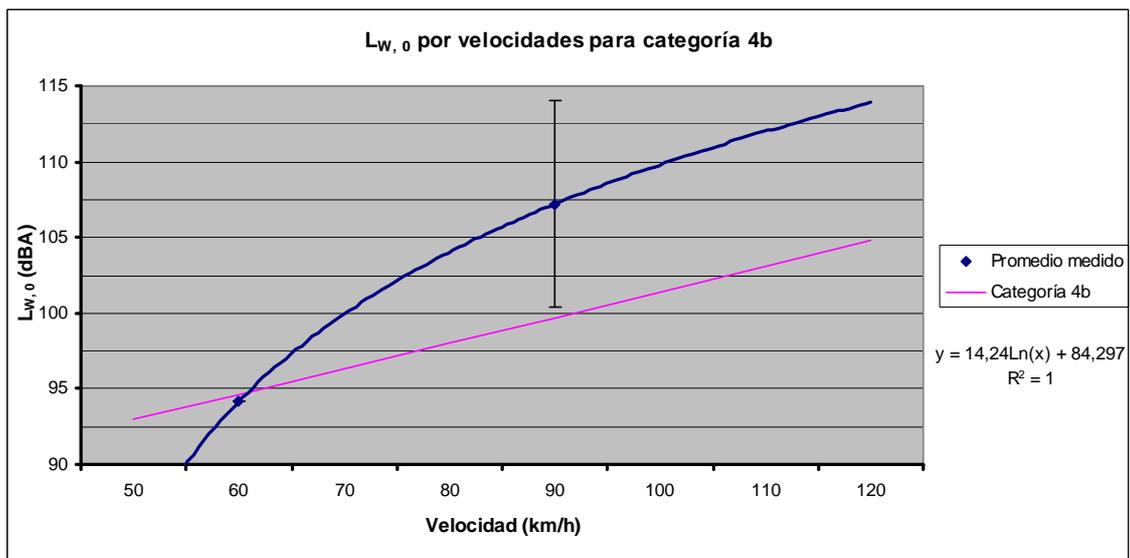


Figura 6.6. $L_{W,0}$ medido y predicho por velocidades para categoría 4b.

6.2.2. $L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades

En este caso también se han englobado los valores de potencia instantánea de la fuente pero ahora serán representados por tercios de octava. Es decir, en cada gráfica se añadirán los datos de los vehículos de una cierta categoría y velocidad, y se representarán en función de la frecuencia.

Debido a la extensión de este apartado se han incluido todas las gráficas en el anexo 6-1. A modo de ejemplo se mostrarán los datos obtenidos para vehículos de categoría 1 y 90km/h.

Valores promedio de $L_{W,0}$ (dBA) medidos para vehículos de categoría 1 y 90km/h con su respectiva desviación y en función de la frecuencia, frente a los predichos por el CNOSSOS para cada tipo de asfalto:

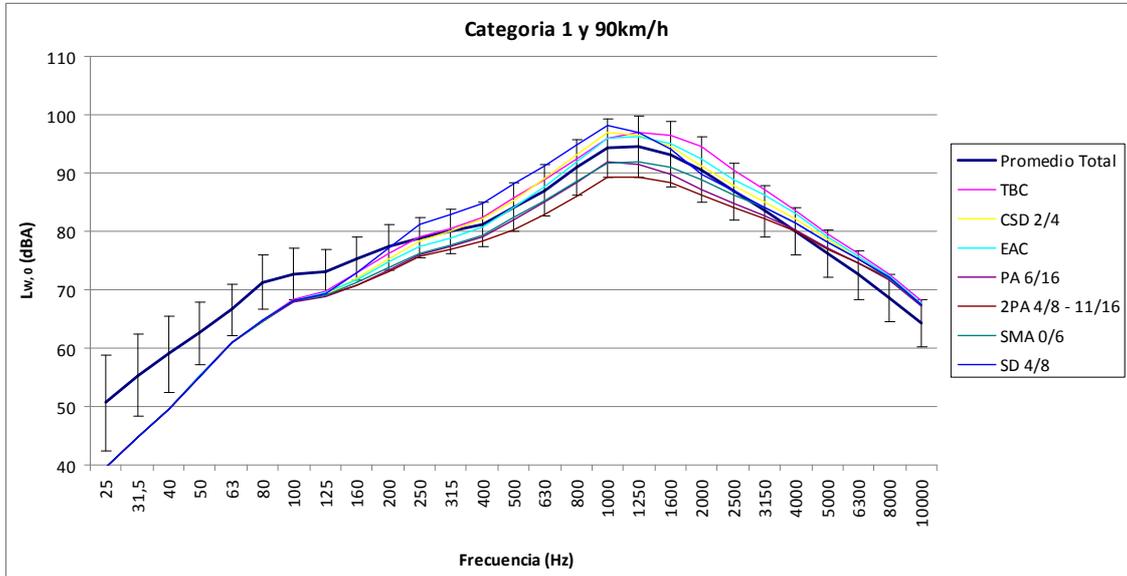


Figura 6.7. $L_{W,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 90km/h.

6.2.3. $L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías

Para finalizar el apartado de resultados, en la figura 6.8. se mostrarán todos los valores promedio medidos de los vehículos de categoría 1 (ya que son los más representativos) en una sola gráfica. Se representarán en función de la frecuencia, facilitando de esta forma la visualización espectral de los resultados para el posterior análisis. El objetivo ha sido mostrar todos los valores medidos del apartado anterior (para categoría 1) en una sola gráfica. Los resultados son los siguientes:

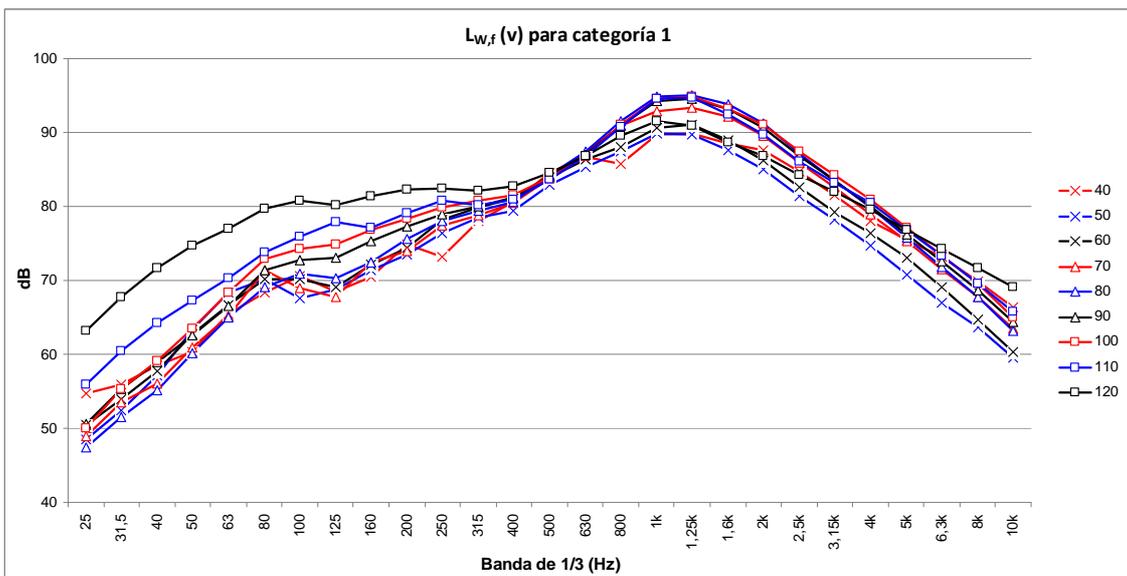


Figura 6.8. Valores $L_{W,0}$ promedio en función de la frecuencia para categoría 1 y distintas velocidades.

CAPÍTULO 7:

Análisis de los datos y comparativa

7. Análisis de los datos y comparativa

7.1. Análisis

7.1.1. $L_{w,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades

En este primer apartado del capítulo séptimo se comentarán las figuras 6.3., 6.4., 6.5. y 6.6. Para la categoría 1 (figura 6.3.) se han obtenido unos datos razonables en bajas velocidades (hasta 90km/h). En esta zona se puede ver como la línea de tendencia de los valores promedio medidos podría asemejarse con los valores predichos para asfaltos más ruidosos, que lógicamente sería el resultado correcto debido a que las carreteras en las que se obtuvieron las medidas presentaban esas cualidades.

Aunque si observamos el resultado para altas velocidades, la línea de tendencia se asemeja más a la predicción de asfaltos porosos, cayendo notablemente la pendiente de la misma respecto de las funciones predichas. Parece ser que es en esta zona en la que la correlación entre medido y predicho es menor, debido a que la línea debía haber presentado una mayor pendiente y asemejarse así a los asfaltos más ruidosos.

Para el caso de los vehículos de categoría 2 (figura 6.4.) el análisis es similar al anterior. La pendiente de la línea de tendencia medida es menor que la de los datos predichos. Aunque comienza bien ya que a bajas velocidades la curva se asemeja a la pendiente de las predichas y para 90, 100 y 110 los valores promedio medidos con sus desviaciones encajan con los valores predichos, la falta de datos se hace notable en este caso. Es debido a este factor que se ha obtenido una curva de semejantes características, ya que el único valor para 80km/h se ha situado muy por debajo de los valores que se esperaban y el no disponer de valores para 70km/h ha hecho que la curva decayera mucho a su comienzo.

Para la categoría 3 (figura 6.5.), los datos obtenidos aún fueron menores que para la categoría 2, por lo que los datos poseen menor fiabilidad. La pendiente de la curva medida no se asemeja a las predichas, aunque para velocidades de 90 y 100km/h los valores encajan a la perfección. Para todos los demás casos no se obtuvieron datos suficientes por lo que los resultados medidos no se pueden equiparar a los predichos.

Debido a la falta de datos, nuevamente podemos afirmar para la categoría 4b (figura 6.6.) que la línea de tendencia para el promediado de los datos medidos no posee gran semejanza con los predichos por el CNOSSOS.

7.1.2. $L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades

En general, si analizamos los datos en frecuencia, los espectros de las curvas medidas (promedio de todos los valores medidos) una por una tienen gran semejanza con respecto a las predichas por el modelo CNOSSOS. Aunque puedan darse casos aislados, en general la zona que mejor se asemeja es la de las frecuencias medias. Las altas frecuencias de todas las formas tienen una mayor correlación con los datos teóricos que las bajas, que por lo general lo medido se sitúa por encima de lo predicho.

Aún así, no se puede afirmar con claridad que una determinada curva (para un tipo de asfalto concreto) sea siempre la que mejor se asemeje a los datos medidos, ya que se recogen resultados de todo tipo. Para algunos casos es una y para otros otra. Lo que sí se puede resaltar es que el espectro de la curva de las gráficas medidas tiene una gran semejanza con la curva de las predichas y que por ello, salvo en casos puntuales, los niveles sonoros en frecuencia que aporta el CNOSSOS son perfectamente válidos para nuestras carreteras.

Pasaremos ahora al análisis por categorías. En general para la primera los valores que se han obtenido han sido muy representativos. Las bajas frecuencias para todos los casos se quedan muy por encima de los valores predichos y se obtienen dos claros ejemplos. Por un lado, mientras que para bajas velocidades las curvas que mejor se asemejan son las más ruidosas, para altas pasa lo contrario. Por lo demás, se puede afirmar que la representatividad del nuevo modelo es muy fiable en frecuencia para los vehículos ligeros en general.

Para el resto de categorías, las bandas con mayor correlación también son las centrales. Sigue pasando lo que en los casos anteriores. Las bajas frecuencias se sitúan en todos los casos por encima de las líneas teóricas y existen frecuencias que se dispersan en resultado más que las demás, lo que provoca una desviación muy alta. Generalmente, de 200Hz para arriba las gráficas predichas son muy parecidas al promedio de las medidas y por ello el análisis es muy parecido que el que se ha realizado anteriormente para los vehículos ligeros.

7.1.3. $L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías

En este apartado se analizará la figura 6.8. En ella se observa que los valores aumentan conforme lo hace la velocidad y que estos presentan un pico en torno a 1,25kHz. En 500Hz existe un punto en donde todas las curvas confluyen y la dispersión es muy pequeña, entorno a 1 ó 2 dB. Conforme nos alejamos de este punto hacia altas frecuencias la dispersión alcanza valores de entre 5 y 10 dB, mientras que para bajas frecuencias los valores rondan los 10 – 15 dB. Para muy bajas frecuencias la dispersión es muy aparente e irregular, para las altas sin embargo es más uniforme. Para finalizar cabe destacar que los datos, por lo general, adoptan una correlación espectral conforme aumenta la velocidad, es decir que aumentan en nivel de presión sonora pero manteniendo la misma curva en frecuencia.

7.2. Comparación entre las medidas tomadas y las predicciones del CNOSSOS

Para finalizar este capítulo se compararán brevemente los valores medidos con los predichos según las gráficas que hemos analizado anteriormente.

Si bien la línea de tendencia del nivel de $L_{W,0}$ en banda ancha de los datos medidos no se asemeja muy bien con los obtenidos por el CNOSSOS, los valores espectrales de cada uno de ellos sí que poseen una alta correlación. En definitiva, podemos afirmar que para vehículos ligeros los datos predichos por el nuevo modelo concuerdan bastante bien con la media de los datos medidos, aunque hay que tener en cuenta que la dispersión de los mismos ha sido muy elevada.

No se puede afirmar con rotundidad que los valores obtenidos de las carreteras analizadas tengan concordancia con un único tipo de asfalto, aunque parece que la mayor correlación la pueden tener con carreteras más ruidosas y no tanto con las más porosas.

CONCLUSIONES:

Conclusiones

Para dar comienzo a este apartado de conclusiones, cabe destacar que el objetivo primero del proyecto se ha cumplido con éxito. Sobre todo para los vehículos de categoría 1, que han sido los datos más representativos, se ha podido medir y comparar la incertidumbre existente en los datos predichos del modelo CNOSSOS. Se han medido los niveles sonoros de los vehículos obteniendo datos en banda ancha y en tercio de octava, siendo estos últimos los que mayor semejanza presentaban.

Respecto a las conclusiones de los resultados obtenidos, se puede afirmar que los valores teóricos del nuevo modelo representados en bandas de tercio de octava han sido muy equiparables a los medidos in-situ. Sobre todo para los vehículos ligeros, que han sido los de mayor número de datos, las curvas medido-predicho poseen una gran concordancia, con desviaciones máximas entre unos y otros de unos 5 dBA. Aún así, no se ha podido verificar cual de los tipos de asfalto poseía una mejor aproximación a los datos medidos, ya que para bajas velocidades lo hacían los más ruidosos y para altas los más porosos.

Por todo ello se puede concluir afirmando que el modelo CNOSSOS predice unos valores de potencia instantánea de la fuente en frecuencia muy aproximados a los que podemos tener en nuestras carreteras. Donde la mayor dispersión la encontramos en bajas frecuencias y la menor en medias frecuencias.

En referencia a los resultados obtenidos en banda ancha para los vehículos ligeros, las mejores aproximaciones medido-predicho han sido para bajas velocidades (50 – 70km/h) en donde ambas curvas poseen cierta correlación, mientras que para velocidades más altas (90 – 120km/h) el modelo prevé unos valores muy superiores a los medidos. Las diferencias en este último caso podían estar por encima de 10 dBA, ya que los datos medidos han llegado a ser inferiores que los predichos para los asfaltos más silenciosos. Para las demás categorías, sobre todo 2 y 3, aunque los datos no hayan sido tan representativos, las mejores aproximaciones las encontramos entorno a 90 – 110km/h, para el resto de casos no poseen muy buena correlación.

Para la dispersión por velocidades, encontramos que el mayor incremento conforme aumenta la velocidad se da para las bajas frecuencias, siendo las medias las que menos varían. Las altas frecuencias muestran un incremento sonoro más uniforme que las demás, y el mayor pico se encuentra siempre entorno a 1,25kHz.

Como conclusión general, se afirma que el modelo CNOSSOS aporta unos datos bastante fiables en frecuencia y no tanto en banda ancha, si tenemos en cuenta el valor de potencia instantánea de la fuente $L_{W,0}$. En vista de la dispersión de los datos medidos, el modelo no será muy representativo en muchas de las carreteras en las que se han tomado datos, debido a que los niveles promedio en banda ancha para velocidades superiores a 80km/h no son comparables a los predichos por el modelo para categoría 1. Aunque sí que en ciertos casos se encuentran semejanzas, como en el modelo de predicción de $L_{W,0}$ en función de la frecuencia.

REFERENCIAS:

Referencias

END Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. (2002).

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0049:EN:NOT>

Ley 37/2003, (2003), BOE n. 276, pp: 40494-40505

<http://www.boe.es/boe/dias/2003/11/18/pdfs/A40494-40505.pdf>

RD 1367/2007, (2007), BOE n. 254, pp: 42952-73

<http://www.boe.es/boe/dias/2007/10/23/pdfs/A42952-42973.pdf>

ISO 9613, (1996) Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors – Part2: General method of calculation. Geneva, Switzerland.

European Commission Working Group. Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure. Position Paper. Version 2 (2006).

H.G. Jonasson, Acoustical Source Modelling of Road Vehicles, *Acta Acustica United with Acustica*, Vol. 93, pp: 173 – 184, (2007)

Draft JRC Reference Report on Common NOise ASSESSMENT MethOdS in EU (CNOSSOS-EU) to be used by the EU Member States for strategic noise mapping after adoption as specified in the Directive 2002/49/EC Version 2d, 28 May 2010

J. Deygout, Multiple knife-edge diffraction by microwaves, *IEEE Trans. Antennas and Propagation* **14**, p. 480–489, 1966.

C. F. Chien, W. W. Soroka, A note on the calculation of sound propagation along an impedance boundary, *Journal of Sound and Vibration* **69**, p. 340-343, 1980.

B. Plovsing, J. Kragh, Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction, Report for the Nordic Group AV 1849/00, Delta, 2001.

ANEXOS:
Anexos del capítulo 2

Anexo 2-1. Tabla de coeficientes para la emisión de potencia sonora de los vehículos en tráfico rodado.

Tabla de coeficientes para vehículos de **categoría 1**.

1/3 octave band center freq. (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	C_P
25	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
31.5	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
40	69.9	33.0	87.0	0.0	4.0
50	74.9	30.0	87.9	0.0	7.0
63	74.9	30.0	90.8	-3.0	7.0
80	74.9	30.0	89.9	0.0	7.0
100	79.3	41.0	86.9	8.0	7.0
125	82.0	41.2	82.6	6.0	7.0
160	81.2	42.3	81.9	6.0	7.0
200	80.9	41.8	82.3	7.0	7.0
250	78.9	38.6	83.9	8.0	4.0
315	78.8	35.5	83.3	8.0	4.0
400	80.5	32.9	82.4	8.0	4.0
500	85.0	25.0	80.6	8.0	4.0
630	87.9	25.0	80.2	8.0	4.0
800	90.9	27.0	77.8	8.0	4.0
1000	93.3	33.4	78.0	8.0	4.0
1250	92.8	36.7	81.4	8.0	4.0
1600	91.5	37.0	82.3	8.0	4.0
2000	88.5	37.5	82.6	8.0	4.0
2500	84.9	37.5	81.5	8.0	4.0
3150	81.8	38.6	80.2	8.0	4.0
4000	78.7	39.6	78.5	8.0	4.0
5000	74.9	40.0	75.6	8.0	4.0
6300	71.8	39.9	73.3	8.0	4.0
8000	69.1	40.2	71.0	8.0	4.0
10000	65.6	40.3	68.1	8.0	4.0

Tabla de coeficientes para vehículos de **categoría 2**.

1/3 octave band center freq. (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	C_P
25	76.5	33.0	93.9	0.0	5.0
31.5	76.5	33.0	93.9	0.0	5.0
40	76.5	33.0	94.1	0.0	5.0
50	78.5	30.0	95.0	0.0	9.0
63	79.5	30.0	97.3	-4.0	9.0
80	79.5	30.0	96.1	0.0	9.0
100	82.5	32.9	92.5	4.0	9.0
125	84.3	35.9	91.9	5.0	9.0
160	84.7	38.1	90.4	5.5	9.0
200	84.3	36.5	93.4	6.0	9.0
250	87.4	33.5	94.4	6.5	5.0
315	87.9	30.6	94.2	6.5	5.0
400	89.8	27.7	93.0	6.5	5.0
500	91.6	21.9	90.8	6.5	5.0
630	93.5	23.8	92.1	6.5	5.0
800	94.6	28.4	92.5	6.5	5.0
1000	92.4	31.1	94.1	6.5	5.0
1250	89.6	35.4	94.5	6.5	5.0
1600	88.1	35.9	92.4	6.5	5.0
2000	85.9	36.7	90.1	6.5	5.0
2500	82.7	36.3	87.6	6.5	5.0
3150	80.7	37.7	85.8	6.5	5.0
4000	78.8	38.5	83.8	6.5	5.0
5000	76.8	39.8	81.4	6.5	5.0
6300	78.7	39.9	80.0	6.5	5.0
8000	75.7	40.2	77.2	6.5	5.0
10000	74.5	40.3	75.4	6.5	5.0

Tabla de coeficientes para vehículos de **categoría 3**.

1/3 octave band center freq. (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	C_P
25	79.5	33.0	95.7	0.0	5.0
31.5	79.5	33.0	94.9	0.0	5.0
40	79.5	33.0	94.1	0.0	5.0
50	81.5	30.0	96.8	-4.0	9.0
63	82.5	30.0	101.8	0.0	9.0
80	82.5	30.0	98.6	4.0	9.0
100	85.5	31.4	95.5	3.0	9.0
125	87.3	32.8	96.2	3.0	9.0
160	87.7	36.0	95.7	3.0	9.0
200	87.3	34.6	97.2	4.0	9.0
250	89.5	32.7	96.3	5.0	5.0
315	90.5	29.3	97.2	5.0	5.0
400	93.8	26.4	95.8	5.0	5.0
500	95.9	24.2	95.9	5.0	5.0
630	97.3	25.9	96.8	5.0	5.0
800	98.0	30.4	95.1	5.0	5.0
1000	95.6	32.3	95.8	5.0	5.0
1250	93.2	36.5	95.0	5.0	5.0
1600	91.9	36.8	92.7	5.0	5.0
2000	88.9	38.0	91.2	5.0	5.0
2500	85.5	36.8	88.7	5.0	5.0
3150	84.1	38.5	87.6	5.0	5.0
4000	82.2	38.9	87.2	5.0	5.0
5000	79.8	38.5	84.2	5.0	5.0
6300	78.6	40.2	82.7	5.0	5.0
8000	77.5	40.8	79.7	5.0	5.0
10000	76.8	41.0	77.6	5.0	5.0

Tabla de coeficientes para vehículos de **categoría 4a**.

1/3 octave band center freq. (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	C_P
25	0.0	0.0	88.7	-2.2	4.0
31.5	0.0	0.0	87.6	-0.1	4.0
40	0.0	0.0	85.5	1.7	4.0
50	0.0	0.0	85.8	5.9	7.0
63	0.0	0.0	81.5	1.9	7.0
80	0.0	0.0	80.7	3.3	7.0
100	0.0	0.0	82.0	0.9	7.0
125	0.0	0.0	85.6	17.3	7.0
160	0.0	0.0	81.6	14.5	7.0
200	0.0	0.0	81.4	5.0	7.0
250	0.0	0.0	85.5	14.6	4.0
315	0.0	0.0	86.3	9.9	4.0
400	0.0	0.0	87.9	9.7	4.0
500	0.0	0.0	88.7	12.7	4.0
630	0.0	0.0	89.9	12.3	4.0
800	0.0	0.0	91.8	13.9	4.0
1000	0.0	0.0	91.2	16.6	4.0
1250	0.0	0.0	92.4	17.2	4.0
1600	0.0	0.0	95.0	17.9	4.0
2000	0.0	0.0	94.1	19.3	4.0
2500	0.0	0.0	92.9	20.6	4.0
3150	0.0	0.0	90.4	19.9	4.0
4000	0.0	0.0	89.1	20.8	4.0
5000	0.0	0.0	87.4	20.5	4.0
6300	0.0	0.0	84.9	21.0	4.0
8000	0.0	0.0	84.4	21.0	4.0
10000	0.0	0.0	82.2	19.3	4.0

Tabla de coeficientes para
 vehículos de **categoría 4b**.

1/3 octave band center freq. (Hz)	A_R	B_R	A_P	B_P	C_P
25	0.0	0.0	90.8	2.1	4.0
31.5	0.0	0.0	88.9	3.1	4.0
40	0.0	0.0	89.2	1.2	4.0
50	0.0	0.0	90.5	2.3	7.0
63	0.0	0.0	89.2	2.8	7.0
80	0.0	0.0	90.7	4.2	7.0
100	0.0	0.0	93.2	6.2	7.0
125	0.0	0.0	93.2	4.8	7.0
160	0.0	0.0	90.0	7.3	7.0
200	0.0	0.0	88.4	11.3	7.0
250	0.0	0.0	87.6	10.6	4.0
315	0.0	0.0	87.7	13.9	4.0
400	0.0	0.0	87.0	13.5	4.0
500	0.0	0.0	87.4	11.0	4.0
630	0.0	0.0	89.4	10.8	4.0
800	0.0	0.0	89.9	11.4	4.0
1000	0.0	0.0	90.1	11.4	4.0
1250	0.0	0.0	89.7	11.7	4.0
1600	0.0	0.0	89.8	13.4	4.0
2000	0.0	0.0	88.2	11.6	4.0
2500	0.0	0.0	86.5	12.2	4.0
3150	0.0	0.0	85.8	10.9	4.0
4000	0.0	0.0	85.1	10.5	4.0
5000	0.0	0.0	85.1	12.0	4.0
6300	0.0	0.0	82.7	12.0	4.0
8000	0.0	0.0	81.7	12.0	4.0
10000	0.0	0.0	80.4	12.0	4.0

Anexo 2-2. Coeficientes de corrección para el efecto de la temperatura en la emisión de rolling noise.

Table II.B.1 – Semi-generic correction coefficients K in dB/°C for air temperature on rolling noise emission, according to the texture and the open porosity of the road surface layer – For Category 1 vehicles

category 1 vehicles (light motor vehicles)	Porosity class (Ω)		
	Texture class (MPD ⁽¹⁾)	$\Omega \leq 5\%$	$5\% < \Omega < 15\%$
MPD ≤ 0.5 mm	0.04	0.06	0.08
0.5 mm < MPD < 1.5 mm	0.08	0.07	0.06
MPD ≥ 1.5 mm	0.12	0.08	0.03

⁽¹⁾ MPD: Mean Profile Depth

Table II.B.2 – Semi-generic correction coefficients K in dB/°C for air temperature on rolling noise emission, according to the texture and the open porosity of the road surface layer – For Category 2 and 3 vehicles

category 2 and 3 vehicles (heavy motor vehicles)	Porosity class (Ω)		
	Texture class (MPD ⁽¹⁾)	$\Omega \leq 5\%$	$5\% < \Omega < 15\%$
MPD ≤ 0.5 mm	0.02	0.03	0.04
0.5 mm < MPD < 1.5 mm	0.04	0.04	0.03
MPD ≥ 1.5 mm	0.06	0.04	0.02

Anexo 2-3. Tabla de coeficientes de corrección para el efecto del tipo de calzada en la emisión de rolling noise.

Coeficientes de corrección del tipo de calzada para **categoría 1**.

category 1		transversely brushed concrete	concrete with surface dressing 2/4	exposed aggregate concrete	PA ⁽¹⁾ 6/16	2-layer PA ⁽¹⁾ 4/8-11/16	SMA ⁽²⁾ 0/6	surface dressing 4/8
$\alpha_{i,1}$	50 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	63Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	80 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	100 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	125 Hz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	160 Hz	0.9	0.7	0.3	0.0	-0.5	0.0	1.7
	200 Hz	1.7	1.4	0.7	0.0	-1.1	0.0	3.4
	250 Hz	2.6	2.1	1.0	0.0	-1.6	0.0	5.1
	315 Hz	2.5	2.4	1.1	0.0	-2.2	0.0	5.3
	400 Hz	2.5	2.7	1.1	0.0	-2.7	0.0	5.4
	500 Hz	2.4	3.0	1.2	0.0	-3.3	0.0	5.6
	630 Hz	2.0	3.2	1.4	-0.4	-3.6	-0.7	5.3
	800 Hz	1.6	3.3	1.7	-0.7	-4.0	-1.3	4.9
	1 kHz	1.2	3.6	1.9	-1.1	-4.3	-2.0	4.6
	1.25 kHz	1.6	2.4	1.5	-2.2	-5.2	-2.3	2.6
	1.6 kHz	2.0	1.2	1.2	-3.4	-6.0	-2.6	0.5
	2 kHz	2.4	0.1	0.8	-4.5	-6.9	-2.9	-1.5
	2.5 kHz	1.6	-0.2	0.5	-4.8	-6.8	-2.7	-1.8
	3.15 kHz	0.8	-0.5	0.3	-5.0	-6.8	-2.4	-2.2
	4 kHz	0.0	-0.8	0.0	-5.3	-6.7	-2.2	-2.5
5 kHz	0.0	-0.5	0.0	-3.5	-4.5	-1.5	-1.7	
6.3 kHz	0.0	-0.3	0.0	-1.8	-2.2	-0.7	-0.8	
8 kHz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
10 kHz	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
<i>speed index (β_t)</i>		6.0	-5.0	0.0	-11.0	-6.0	-5.0	-4.0
A-weighted correction at 70 km/h		1.4	2.7	1.3	-1.4	-4.6	-1.7	3.4

Coeficientes de corrección del tipo de calzada para **categorías 2 y 3**.

category 2, 3.		transversely brushed concrete	concrete with surface dressing 2/4	exposed aggregate concrete	PA ⁽¹⁾ 6/16	2-layer PA ⁽¹⁾ 4/8-11/16	SMA ⁽²⁾ 0/6	surface dressing 4/8
$\alpha_{f,1}$	50 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	63Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	80 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	100 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	125 Hz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	160 Hz	0,9	0,7	0,3	0,0	-0,5	0,0	1,7
	200 Hz	1,7	1,4	0,7	0,0	-1,1	0,0	3,4
	250 Hz	2,6	2,1	1,0	0,0	-1,6	0,0	5,1
	315 Hz	2,5	2,4	1,1	0,0	-2,2	0,0	5,3
	400 Hz	2,5	2,7	1,1	0,0	-2,7	0,0	5,4
	500 Hz	2,4	3,0	1,2	0,0	-3,3	0,0	5,6
	630 Hz	2,0	3,2	1,4	-0,4	-3,6	-0,7	5,3
	800 Hz	1,6	3,3	1,7	-0,7	-4,0	-1,3	4,9
	1 kHz	1,2	3,5	1,9	-1,1	-4,3	-2,0	4,6
	1.25 kHz	1,6	2,4	1,5	-2,2	-5,2	-2,3	2,6
	1.6 kHz	2,0	1,2	1,2	-3,4	-6,0	-2,6	0,5
	2 kHz	2,4	0,1	0,8	-4,5	-6,9	-2,9	-1,5
	2.5 kHz	1,6	-0,2	0,5	-4,8	-6,8	-2,7	-1,8
	3.15 kHz	0,8	-0,5	0,3	-5,0	-6,8	-2,4	-2,2
	4 kHz	0,0	-0,8	0,0	-5,3	-6,7	-2,2	-2,5
5 kHz	0,0	-0,5	0,0	-3,5	-4,5	-1,5	-1,7	
6.3 kHz	0,0	-0,3	0,0	-1,8	-2,2	-0,7	-0,8	
8 kHz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
10 kHz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
speed index (β_1)		6,0	-3,0	0,0	-11,0	-6,0	-5,0	-4,0
A-weighted correction at 70 km/h		1,4	2,7	1,3	-1,4	-4,6	-1,7	3,4

Anexo 2-4. Coeficientes para el efecto de neumáticos antideslizantes en la emisión de rolling noise. Vehículos ligeros (categoría 1).

Coeficientes a y b para la corrección de neumáticos añadidos en los vehículos de **categoría 1**.

1/3-octave band frequency [Hz]	a	b
25	0	0
31.5	0	0
40	0	0
50	0	0
63	0	0
80	0	0
100	0	0
125	0.3	-4.1
160	1.4	-6
200	1.5	-8.5
250	0.9	-4.1
315	1.2	1.7
400	1.5	0.6
500	1.9	-4.6
630	1.8	-3.9
800	0.8	-2.7
1000	0.5	-4.2
1250	0.2	-11.7
1600	-0.2	-11.7
2000	-0.4	-14.9
2500	0.5	-17.6
3150	0.8	-21.8
4000	0.9	-21.6
5000	2.1	-19.2
6300	5	-14.6
8000	7.3	-9.9
10000	10	-10.2

ANEXOS:
Anexos del capítulo 3

Anexo 3-1. Linealización de perfiles de velocidad de sonido logarítmicos.

Partiendo de un perfil lin-log

$$c(z) = c_0 + A_m \cdot z + B_m \ln \left(1 + \frac{z}{z_0} \right)$$

Se calculará la curvatura de rayo equivalente mediante:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B}$$

Nota: Como se necesita manejar el caso $1/R = 0$ o equivalentemente $R = \infty$, es recomendable calcular directamente la cantidad $1/R$ sin el cálculo explícito de R .

La parte lineal del gradiente se calcula como:

$$\frac{1}{R_A} = \frac{A_m}{c_0}$$

La parte logarítmica del gradiente se calcula como:

- if $B_m \leq 0$:

$$\frac{1}{R_B} = \frac{B_m}{h_M \cdot c_0}$$

- if $B_m > 0$:

$$\text{if } A < 0 : \frac{1}{R_B} = \frac{\sqrt{B^2 - AC} - B}{C}$$

$$\text{if } A \geq 0 : \frac{1}{R_B} = 0$$

Donde:

$$k = \sqrt{\frac{B}{2\pi c_0}}$$

$$\gamma = \frac{1 + 4k^2}{1 - 4k^2}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{h_R - h_S}{d_{SR}}$$

$$h_M = \frac{h_S + h_R}{2}$$

$$d = \sqrt{d_{SR}^2 + (h_S - h_R)^2}$$

Y:

$$\begin{aligned}A &= 1 + \operatorname{tg}^2 \theta - \gamma^2 \\B &= h_M (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) \\C &= h_M^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \theta) + (d/2)^2\end{aligned}$$

[Deygout, 1966] J. Deygout, Multiple knife-edge diffraction by microwaves, *IEEE Trans. Antennas and Propagation* **14**, p. 480–489, 1966.

[Chien, 1980] C. F. Chien, W. W. Soroka, A note on the calculation of sound propagation along an impedance boundary, *Journal of Sound and Vibration* **69**, p. 340–343, 1980.

[Plovsing, 2001] B. Plovsing, J. Kragh, *Nord2000. Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. Part 1: Propagation in an Atmosphere without Significant Refraction*, Report for the Nordic Group AV 1849/00, Delta, 2001.

ANEXOS:
Anexos del capítulo 6

Anexo 6-1. $L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades (gráficas).

Nota: Hay categorías y velocidades que no disponen de gráfica por falta de datos.

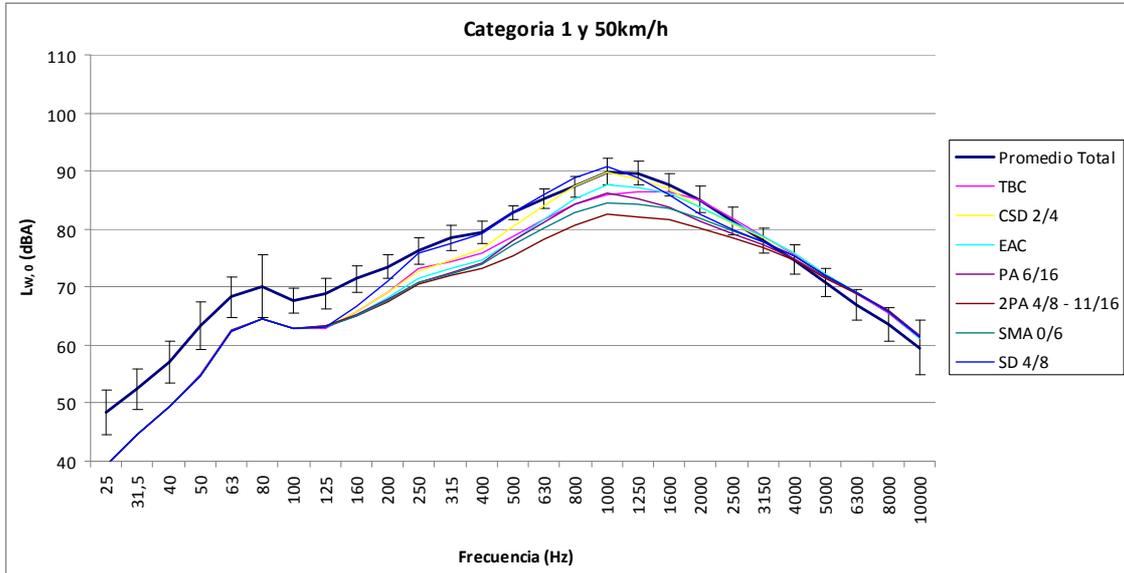


Figura 6.9. $L_{W,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 50km/h.

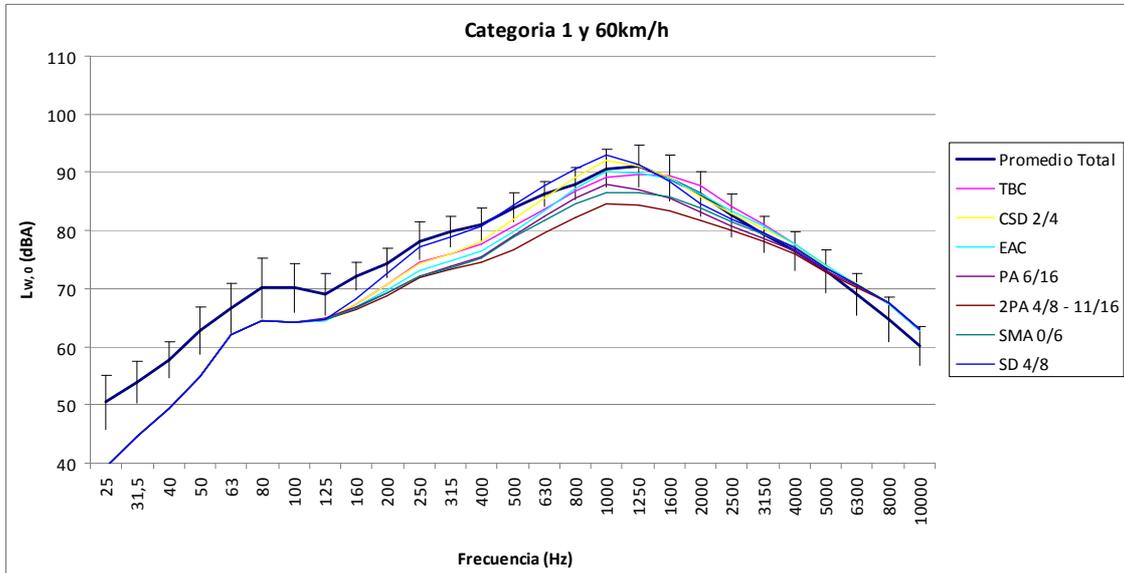


Figura 6.10. $L_{W,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 60km/h.

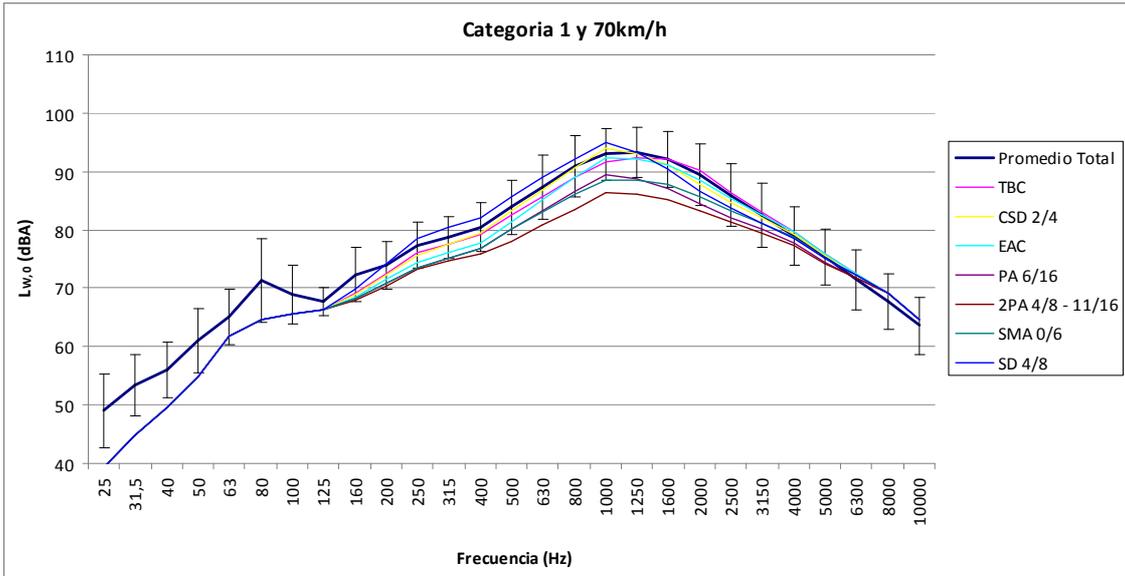


Figura 6.11. $L_{W,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 70km/h.

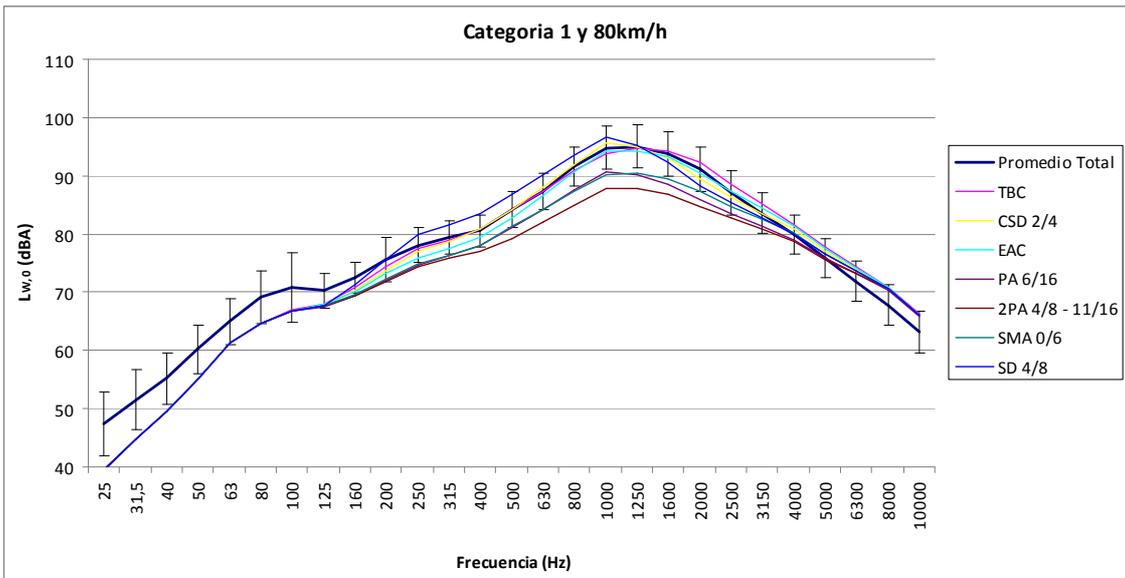


Figura 6.12. $L_{W,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 80km/h.

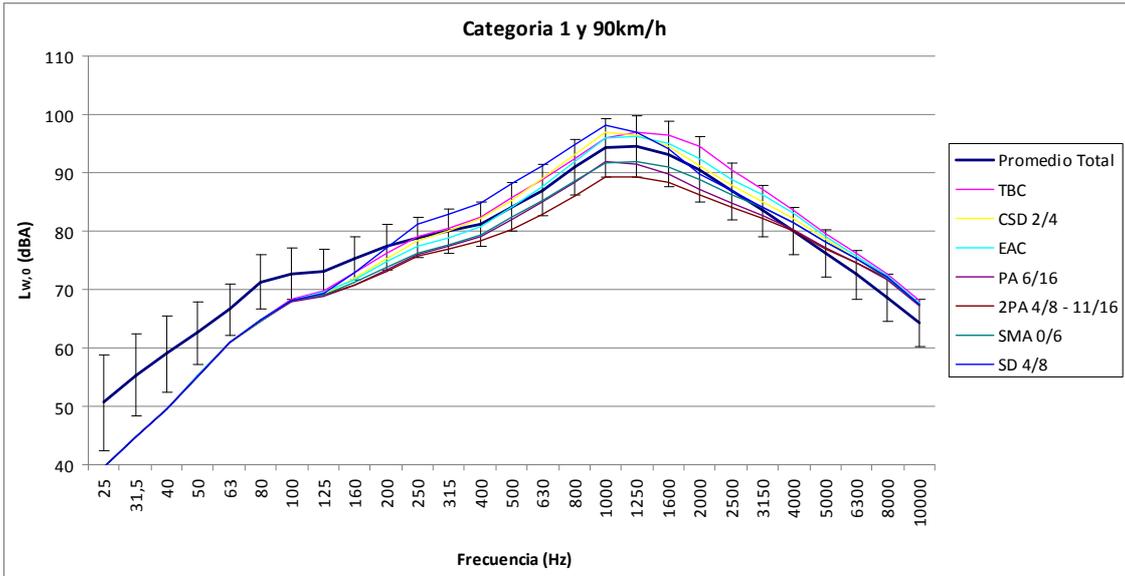


Figura 6.13. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 90km/h.

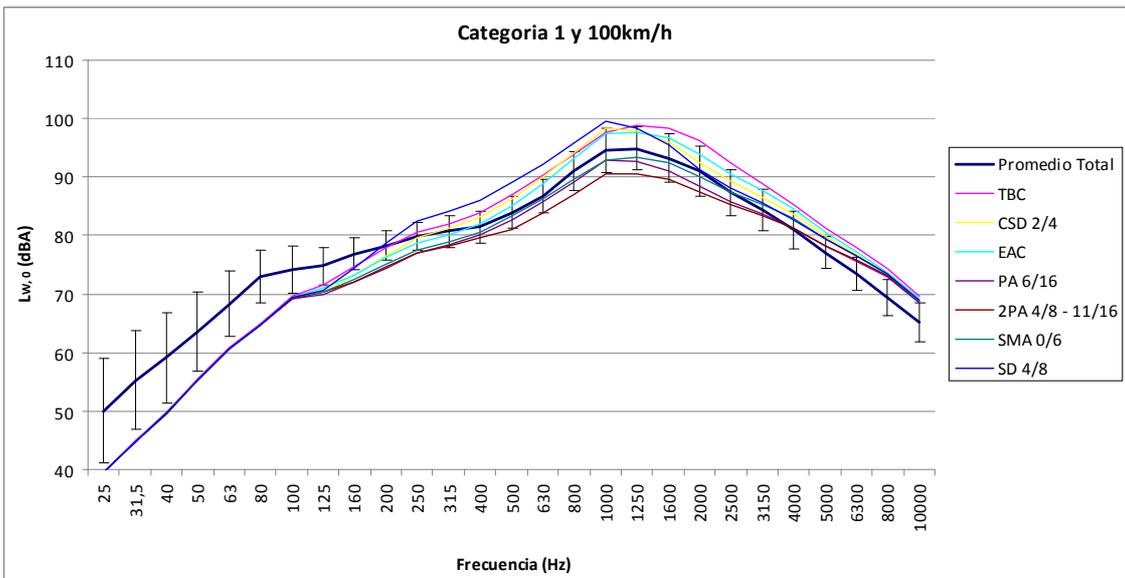


Figura 6.14. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 100km/h.

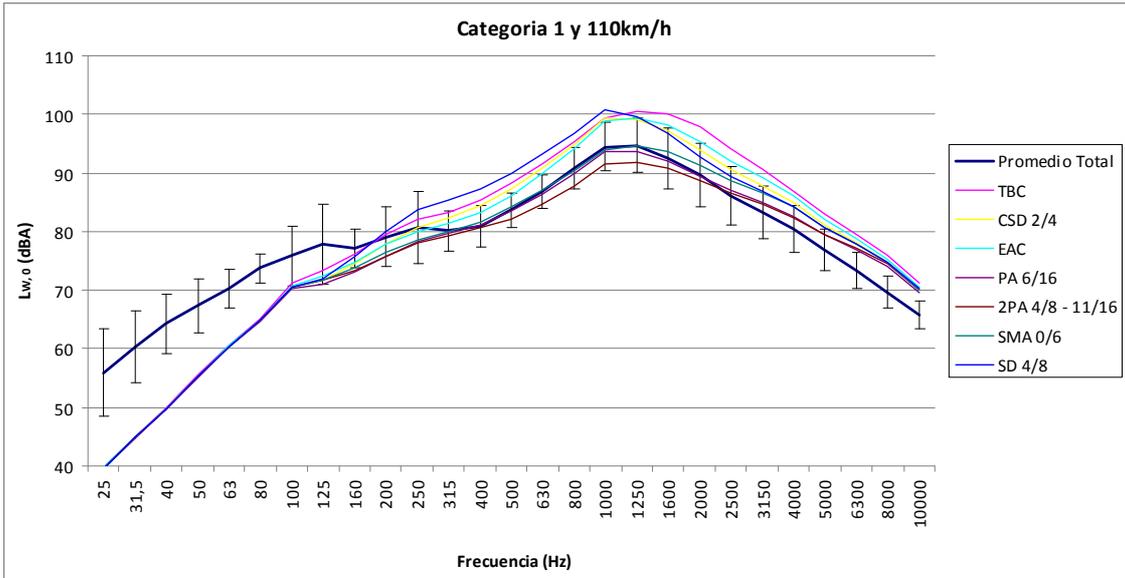


Figura 6.15. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 110km/h.

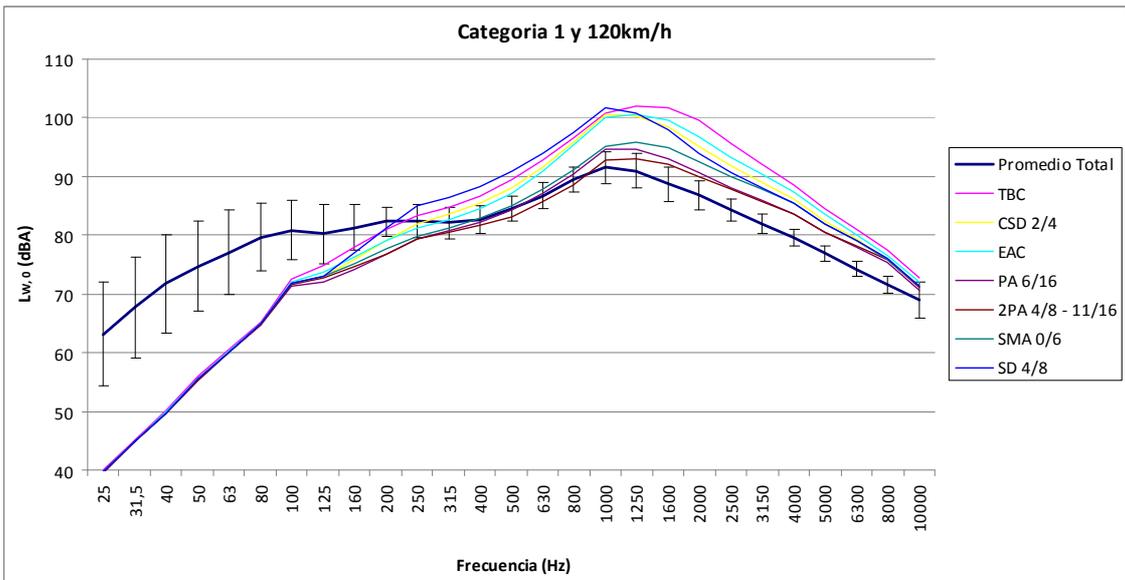


Figura 6.16. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 1 y 120km/h.

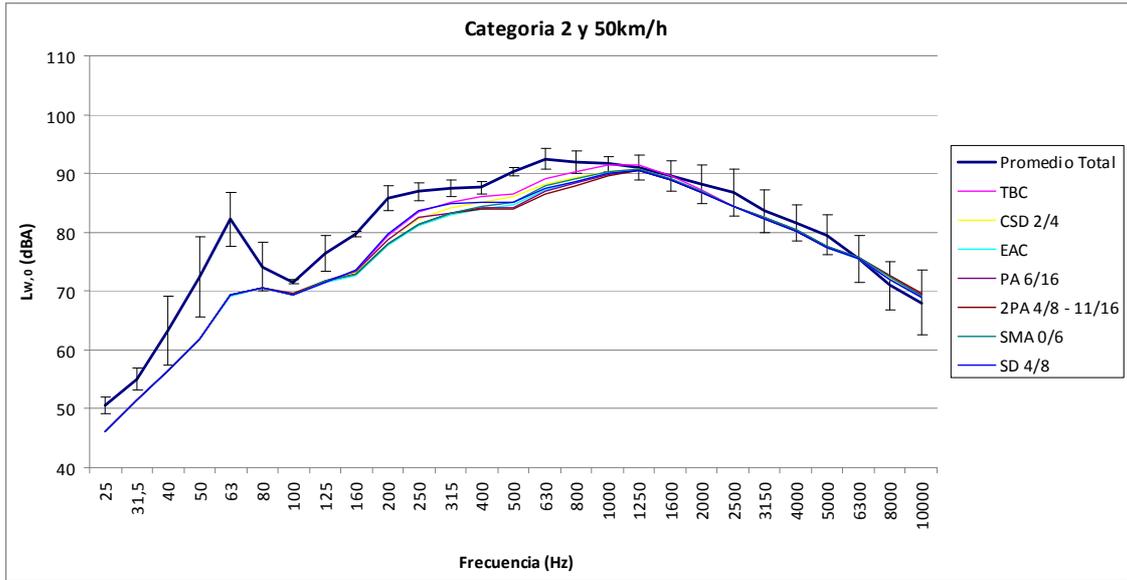


Figura 6.17. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 2 y 50km/h.

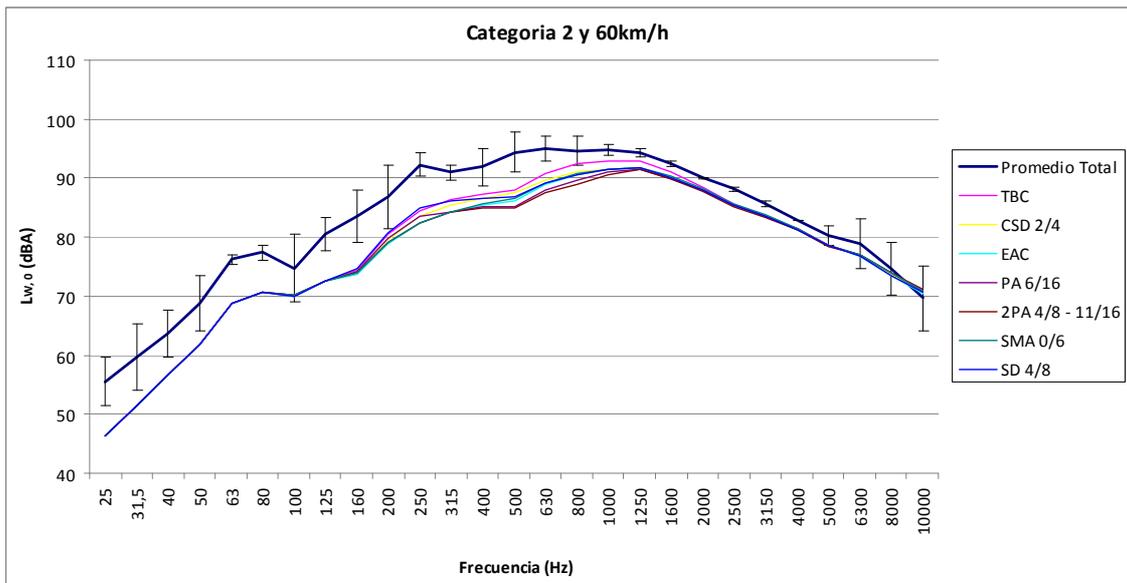


Figura 6.18. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 2 y 60km/h.

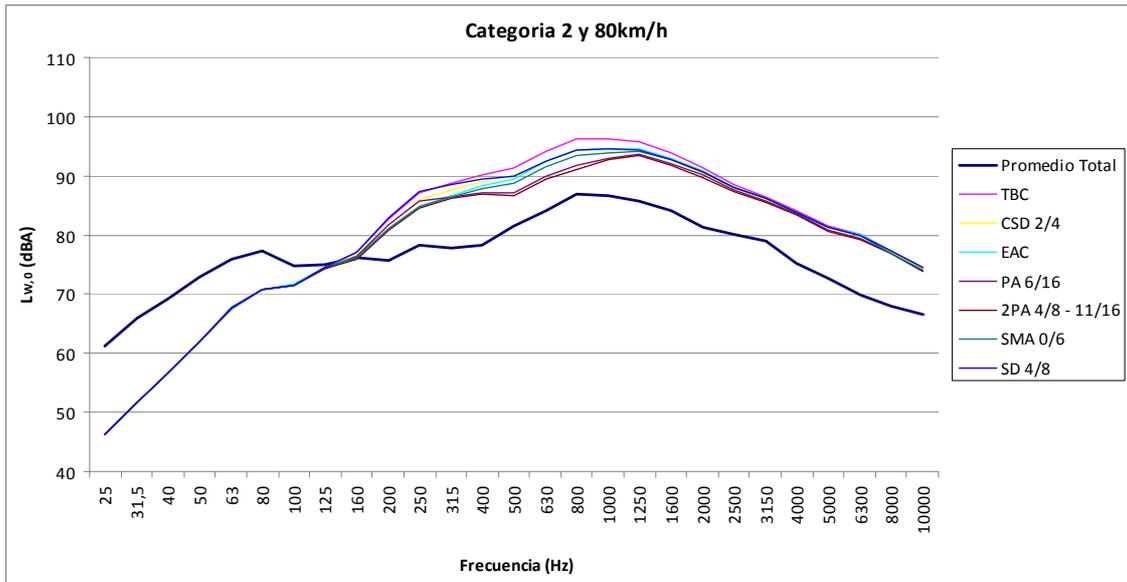


Figura 6.19. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 2 y 80km/h.

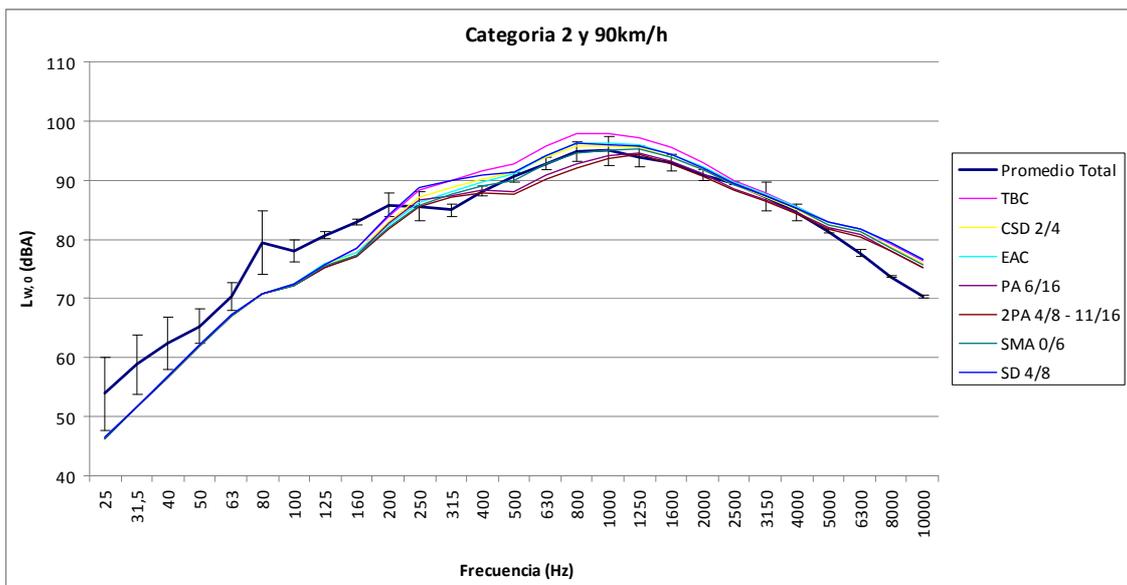


Figura 6.20. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 2 y 90km/h.

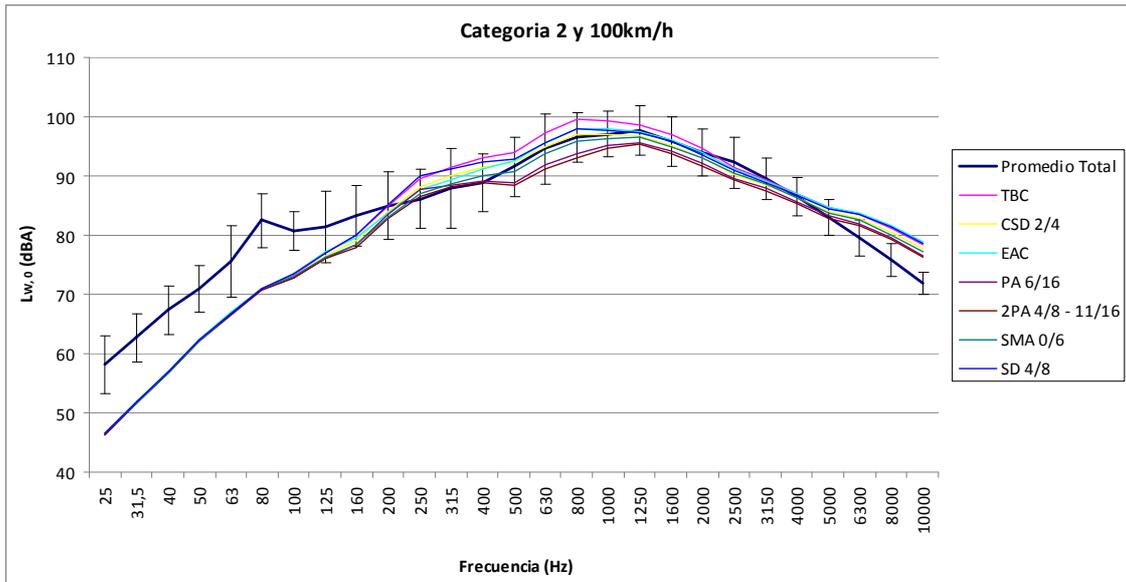


Figura 6.21. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 2 y 100km/h.

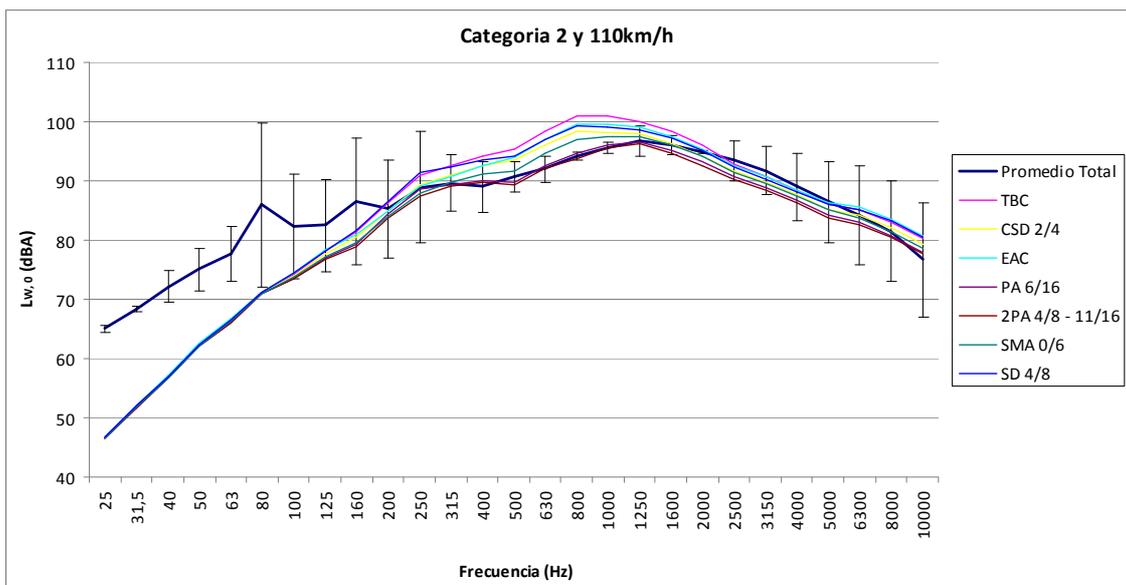


Figura 6.22. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 2 y 110km/h.

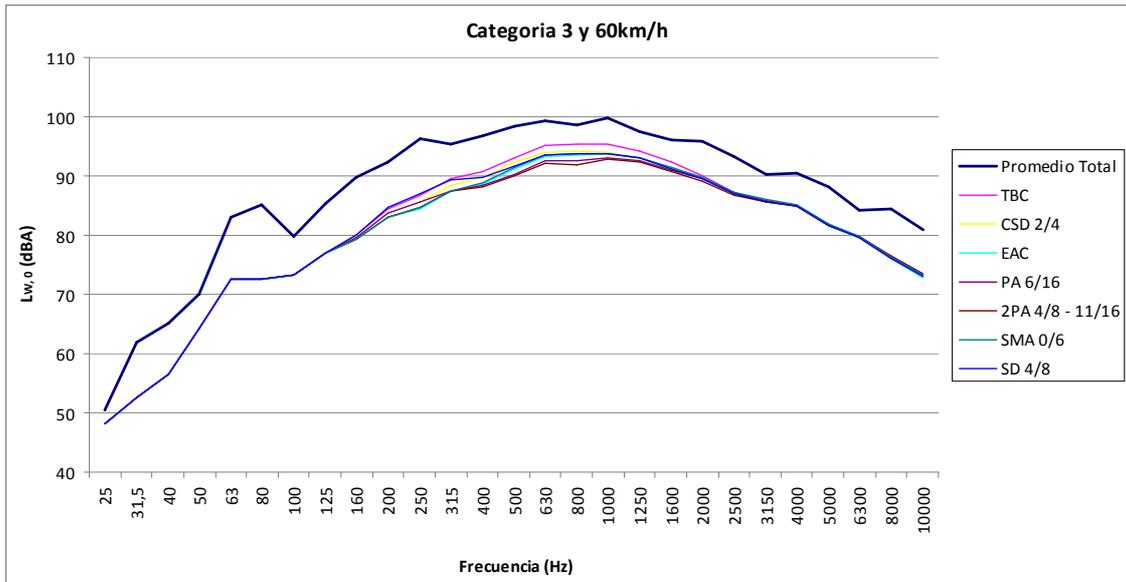


Figura 6.23. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 3 y 60km/h.

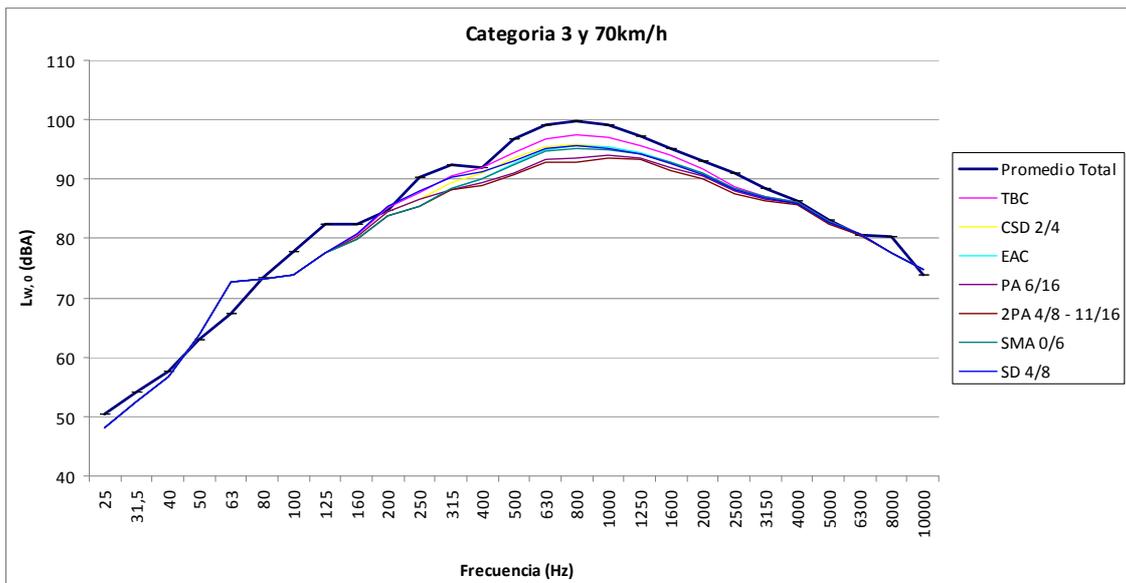


Figura 6.24. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 3 y 70km/h.

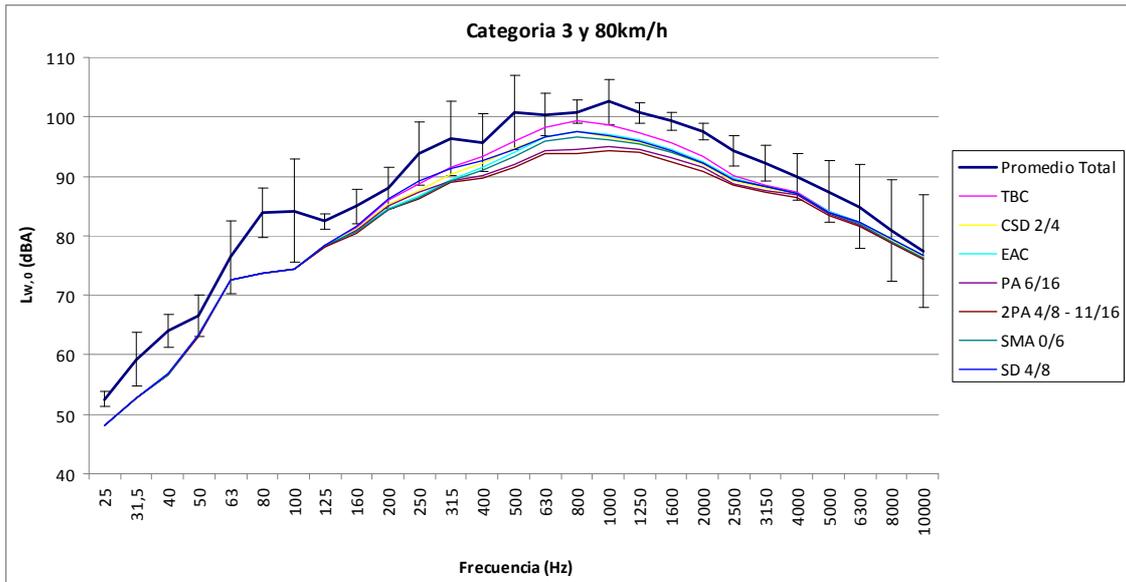


Figura 6.25. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 3 y 80km/h.

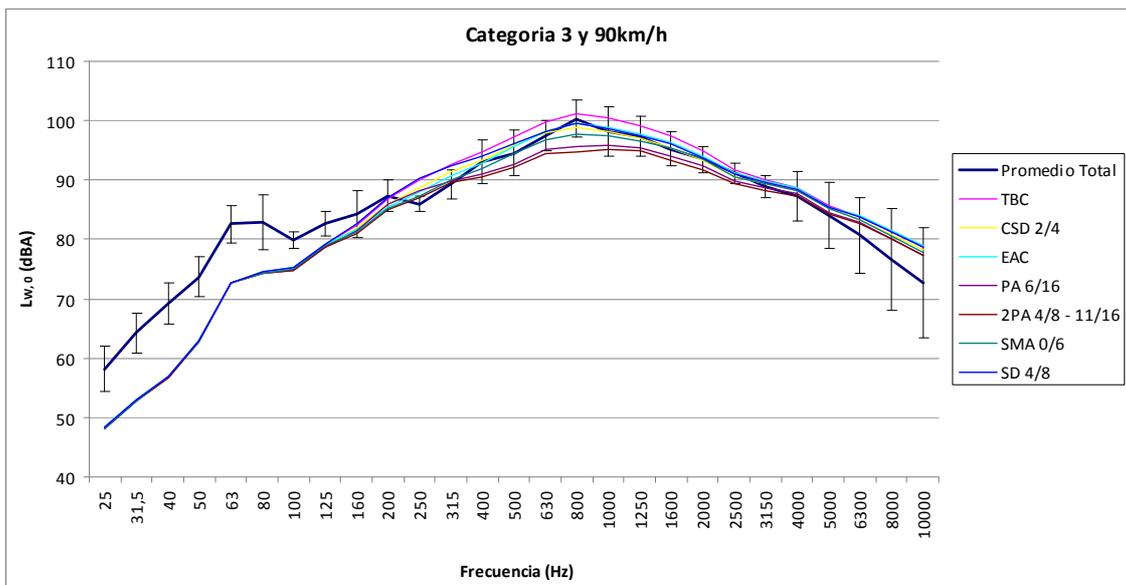


Figura 6.26. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 3 y 90km/h.

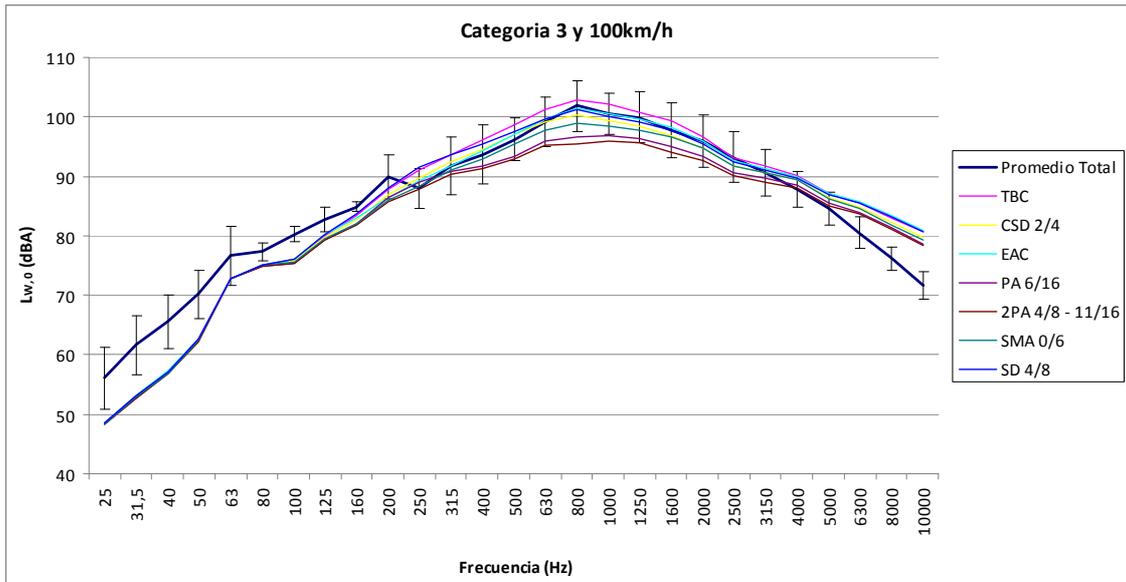


Figura 6.27. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 3 y 100km/h.

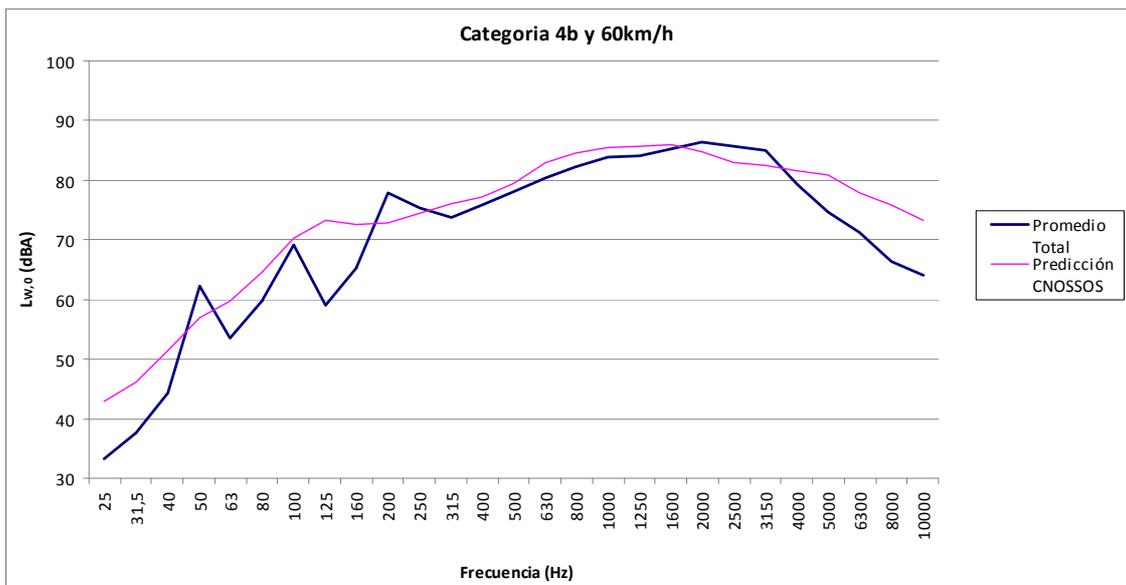


Figura 6.28. $L_{w,0}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 4b y 60km/h.

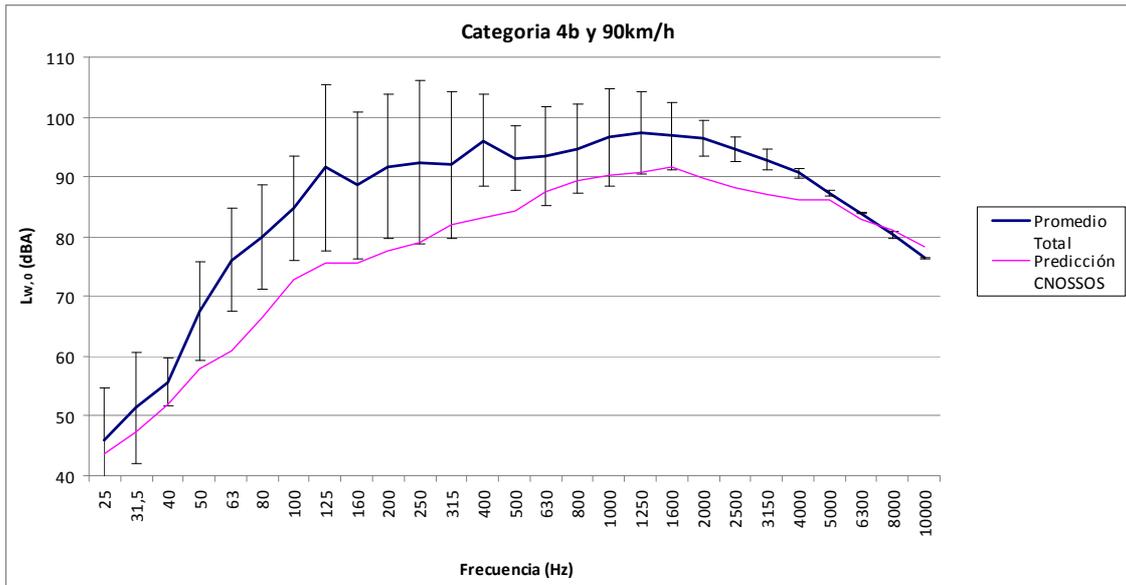


Figura 6.29. $L_{w,o}$ medido y predicho en función de la frecuencia para categoría 4b y 90km/h.

**ANÁLISIS DEL NUEVO MÉTODO DE CÁLCULO
CNOSSOS-EU
PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE RUIDO**

**Urko Peral Martínez
Miguel Arana Burgui**

Pamplona, 10 de septiembre de 2012

INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
3. Modelo CNOSSOS
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

1. Objetivos

Evaluar la incertidumbre del nuevo modelo de predicción para tráfico rodado, CNOSSOS.

Cálculo de los niveles predichos

Toma de medidas in-situ

Valoración de los resultados medidos-predichos

Explicar la evolución de los estándares de tráfico rodado en los países más representativos.

INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
3. Modelo CNOSSOS
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

2. Modelos previos

Directiva 2002/49/CE

Proporcionar una base en el ámbito del control del ruido.
Elaboración de mapas de ruido, planes de acción e informar a la población.

NMPB. Francés

RLS90. Alemán

CORTN. Inglés

SP96. Países Nórdicos

Predecir el ruido que una nueva vía de circulación generará en sus alrededores.

Se asigna una potencia acústica a la fuente con variables tipo densidad de tráfico, velocidad, tipo de asfalto ... configurando el modelo de propagación.

Validadas por un gran número de campañas experimentales.

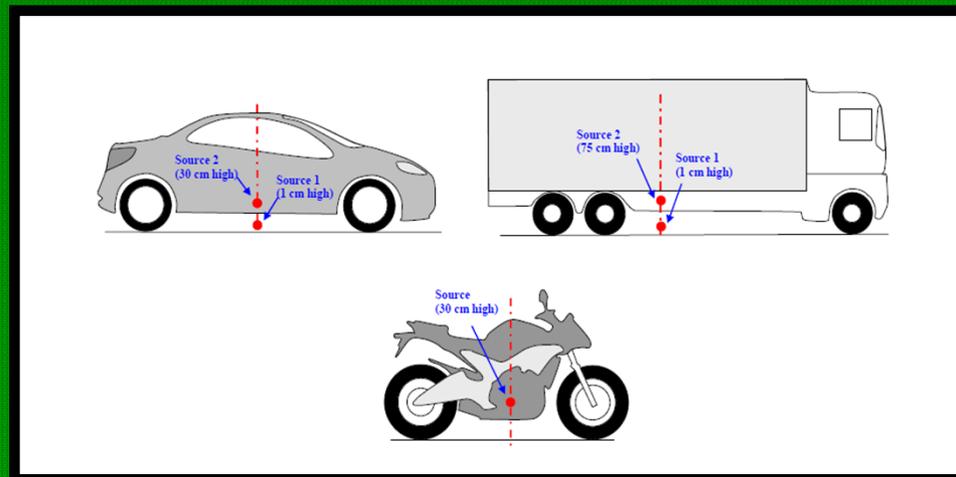
INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
- 3. Modelo CNOSSOS**
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

3. Modelo CNOSSOS

Clasificación de vehículos y posición de las fuentes sonoras

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos ligeros	Coches de pasajeros, furgonetas de reparto inferiores a 3500 kg incluyendo trailers y caravanas.
2	Vehículos de peso medio	Furgonetas de reparto superiores a 3500 kg, autobuses, caravanas, etc. con dos ejes y doble montaje de neumático en el eje trasero.
3	Vehículos pesados	Camiones, autobuses, caravanas, con tres ejes como mínimo.
4 a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads inferiores a 50cc.
4 b		Motocicletas, triciclos o quads superiores a 50cc.



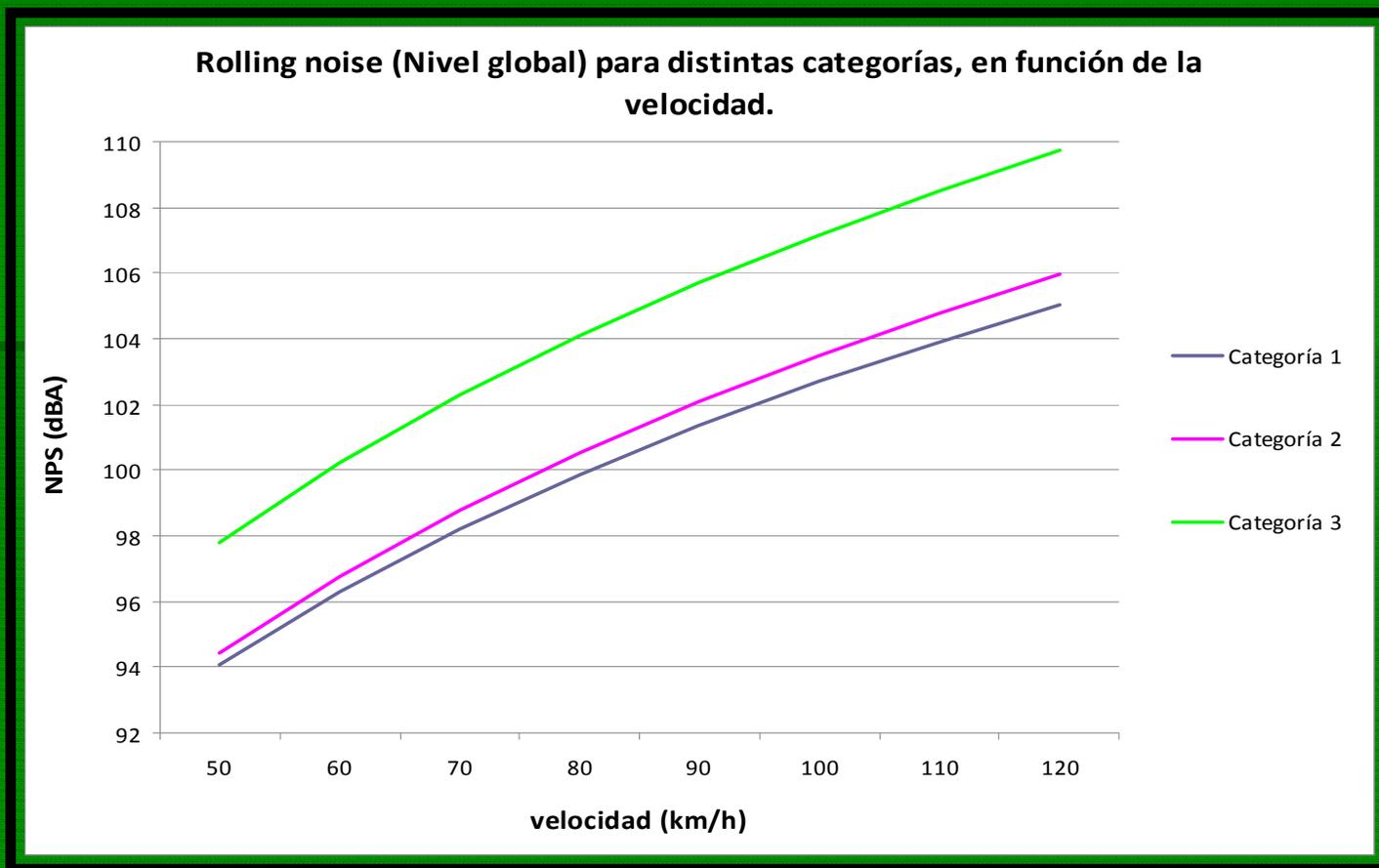
3. Modelo CNOSSOS

Clasificación de asfaltos

TBC:	Transversely Brushed Concrete
CSD 2/4:	Concrete with Surface Dressing 2/4
EAC:	Exposed Aggregate Concrete
PA 6/16:	Porous Asphalt 6/16
2PA 4/8-11/16:	2 layer Porous Asphalt 4/8-11/16
SMA 0/6:	Stone Mastic Asphalt 0/6
SD 4/8:	Surface Dressing 4/8

3. Modelo CNOSSOS

Rolling noise



3. Modelo CNOSSOS

Cálculo teórico de los valores “Rolling noise”

Ejemplo para vehículo de características:

Categoría 1

V = 90 km/h

asfalto tipo TBC

T = tiempo de medida 28 seg

h = 10 m de distancia

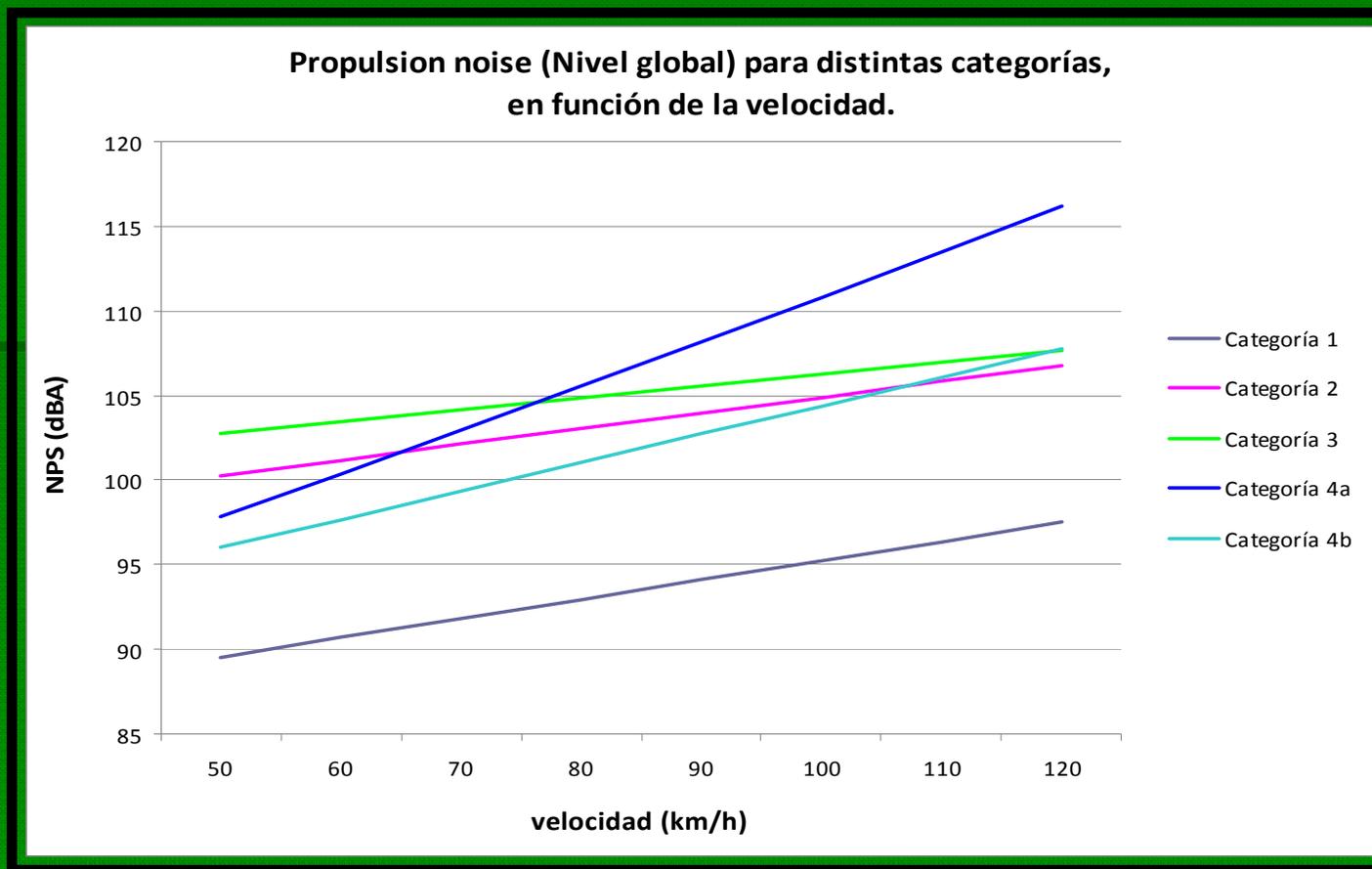
$$L_{WR} = A_R + B_R \times 10^{\lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right)} + \Delta L_{WR,road} + \Delta L_{WR,region}$$

$$\Delta L_{WR,road} = \alpha_{i,m} + \beta_m \times 10^{\lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right)} + \Delta L_{WR,age}$$

Freq.	A_R	B_R	α_{im}	β_m	L_{WR}
25	69.9	33.0	0.0	6.0	74,2
31.5	69.9	33.0	0.0	6.0	74,2
40	69.9	33.0	0.0	6.0	74,2
50	74.9	30.0	0.0	6.0	78,8
63	74.9	30.0	0.0	6.0	78,8
80	74.9	30.0	0.0	6.0	78,8
100	79.3	41.0	0.0	6.0	84,4
125	82.0	41.2	0.0	6.0	87,2
160	81.2	42.3	0.9	6.0	87,4
200	80.9	41.8	1.7	6.0	87,8
250	78.9	38.6	2.6	6.0	86,4
315	78.8	35.5	2.5	6.0	85,8
400	80.5	32.9	2.5	6.0	87,2
500	85.0	25.0	2.4	6.0	90,8
630	87.9	25.0	2.0	6.0	93,3
800	90.9	27.0	1.6	6.0	96,1
1000	93.3	33.4	1.2	6.0	98,8
1250	92.8	36.7	1.6	6.0	99,1
1600	91.5	37.0	2.0	6.0	98,2
2000	88.5	37.5	2.4	6.0	95,6
2500	84.9	37.5	1.6	6.0	91,2
3150	81.8	38.6	0.8	6.0	87,5
4000	78.7	39.6	0.0	6.0	83,7
5000	74.9	40.0	0.0	6.0	79,9
6300	71.8	39.9	0.0	6.0	76,8
8000	69.1	40.2	0.0	6.0	74,1
10000	65.6	40.3	0.0	6.0	70,7

3. Modelo CNOSSOS

Propulsion noise



3. Modelo CNOSSOS

Cálculo teórico de los valores “Propulsion noise”

Ejemplo para vehículo de características:

Categoría 1

V = 90 km/h

asfalto tipo TBC

T = tiempo de medida 28 seg

h = 10 m de distancia

$$L_{WP} = A_P + B_P \times \frac{(v - v_{ref})}{v_{ref}} + \Delta L_{WP,road} + \Delta L_{WP,other}$$

$$\Delta L_{WP,road} = \text{Max}\{\alpha_{i,m}; 0\}$$

Freq.	A _P	B _P	Max{α _{i,m} ;0}	L _{WP}	L _{WR} - L _{WP}
25	87,0	0,0	0,0	87,0	-12,8
31.5	87,0	0,0	0,0	87,0	-12,8
40	87,0	0,0	0,0	87,0	-12,8
50	87,9	0,0	0,0	87,9	-9,1
63	90,8	-3,0	0,0	89,9	-11,1
80	89,9	0,0	0,0	89,9	-11,1
100	86,9	8,0	0,0	89,2	-4,8
125	82,6	6,0	0,0	84,3	2,8
160	81,9	6,0	0,9	84,5	2,9
200	82,3	7,0	1,7	86,0	1,8
250	83,9	8,0	2,6	88,8	-2,4
315	83,3	8,0	2,5	88,1	-2,3
400	82,4	8,0	2,5	87,2	0,1
500	80,6	8,0	2,4	85,3	5,5
630	80,2	8,0	2,0	84,5	8,8
800	77,8	8,0	1,6	81,7	14,4
1000	78,0	8,0	1,2	81,5	17,3
1250	81,4	8,0	1,6	85,3	13,8
1600	82,3	8,0	2,0	86,6	11,6
2000	82,6	8,0	2,4	87,3	8,4
2500	81,5	8,0	1,6	85,4	5,9
3150	80,2	8,0	0,8	83,3	4,2
4000	78,5	8,0	0,0	90,0	-6,3
5000	75,6	8,0	0,0	86,3	-6,4
6300	73,3	8,0	0,0	83,2	-6,4
8000	71,0	8,0	0,0	80,6	-6,4
10000	68,1	8,0	0,0	77,1	-6,5

3. Modelo CNOSSOS

Valores “Fuente inferior”, “Fuente superior” y potencia instantánea de la fuente ($L_{W,0}$)

Ejemplo para vehículo de características:

Categoría 1

V = 90 km/h

asfalto tipo TBC

T = tiempo de medida 28 seg

h = 10 m de distancia

$$L_{W,dir,low,i,m}(v) = 10 \times \lg \left(0.8 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.2 \times 10^{L_{WP,i,m}/10} \right) + \Delta L_{W,dir,i,m}$$

$$L_{W,dir,high,i,m}(v) = 10 \times \lg \left(0.2 \times 10^{L_{WR,i,m}/10} + 0.8 \times 10^{L_{WP,i,m}/10} \right) + \Delta L_{W,dir,i,m}$$

$$L_{W,0} = 10 \times \log \left(0.5 \times 10^{L_{W,low,i,m}/10} + 0.5 \times 10^{L_{W,high,i,m}/10} \right)$$

Freq.	$L_{W,dir,low}$	$L_{W,dir,high}$	$L_{W,0}$
25	80,8	86,1	84,2
31.5	80,8	86,1	84,2
40	80,8	86,1	84,2
50	82,7	87,1	85,4
63	84,1	89,1	87,3
80	84,1	89,0	87,2
100	85,9	88,6	87,4
125	86,7	85,0	86,0
160	86,9	85,3	86,2
200	87,5	86,4	87,0
250	87,0	88,4	87,7
315	86,4	87,7	87,1
400	87,2	87,2	87,2
500	90,1	87,1	88,9
630	92,5	88,1	90,8
800	95,2	89,7	93,2
1000	97,9	92,1	95,9
1250	98,1	92,7	96,2
1600	97,3	92,3	95,5
2000	94,8	90,7	93,2
2500	90,6	87,3	89,2
3150	86,9	84,5	85,9
4000	85,9	89,3	87,9
5000	82,2	85,6	84,2
6300	79,0	82,5	81,1
8000	76,4	79,9	78,5
10000	72,9	76,4	75,0

3. Modelo CNOSSOS

Valores potencia media por unidad de longitud ($L_{W',eq,line}$) y nivel de presión sonora en el receptor ($L_{Aeq,T}$)

Ejemplo para vehículo de características:

Categoría 1

V = 90 km/h

asfalto tipo TBC

T = tiempo de medida 28 seg

h = 10 m de distancia

$$L_{W',eq,line} = L_{W,0} + 10 \times \lg\left(\frac{N}{T \times V}\right)$$

$$L_{Aeq,T} = L_{W',eq,line} - 3 - 10 \cdot \log h$$

Freq.	$L_{W,0}$	$L_{W',eq,line}$	Pond. A	$L_{AW',eq,line}$	$L_{Aeq,T}$
25	84,2	55,8	-44,7	11,1	-1,9
31.5	84,2	55,8	-39,4	16,4	3,4
40	84,2	55,8	-34,6	21,2	8,2
50	85,4	56,9	-30,2	26,7	13,7
63	87,3	61,2	-26,2	35,0	22,0
80	87,2	58,8	-22,5	36,3	23,3
100	87,4	55,1	-19,1	36,0	23,0
125	86,0	56,4	-16,1	40,3	27,3
160	86,2	56,6	-13,4	43,2	30,2
200	87,0	57,0	-10,9	46,1	33,1
250	87,7	56,3	-8,6	47,7	34,7
315	87,1	55,7	-6,6	49,1	36,1
400	87,2	56,6	-4,8	51,8	38,8
500	88,9	59,6	-3,2	56,4	43,4
630	90,8	61,9	-1,9	60,0	47,0
800	93,2	64,7	-0,8	63,9	50,9
1000	95,9	67,4	0	67,4	54,4
1250	96,2	67,6	0,6	68,2	55,2
1600	95,5	66,8	1	67,8	54,8
2000	93,2	64,3	1,2	65,5	52,5
2500	89,2	60,0	1,3	61,3	48,3
3150	85,9	56,4	1,2	57,6	44,6
4000	87,9	52,7	1	53,7	40,7
5000	84,2	49,0	0,5	49,5	36,5
6300	81,1	46,0	-0,1	45,9	32,9
8000	78,5	43,4	-1,1	42,3	29,3
10000	75,0	40,0	-2,5	37,5	24,5
Banda Ancha		75,1 dB		74,5 dBA	61,5 dBA

INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
3. Modelo CNOSSOS
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

4. Dispositivo experimental

Dispositivo experimental

Sonómetro: Sonómetro integrador B&K tipo 2260 ("Investigator"). Nº de serie: 2027578, con micrófono de precisión B&K tipo 4189. Nº de serie: 1931036.

Calibrador: Calibrador sonoro B&K tipo 4230. Nº de serie: 1380268. El módulo usado fué el B&K tipo BZ 7203 ("Perfiles sonoros").

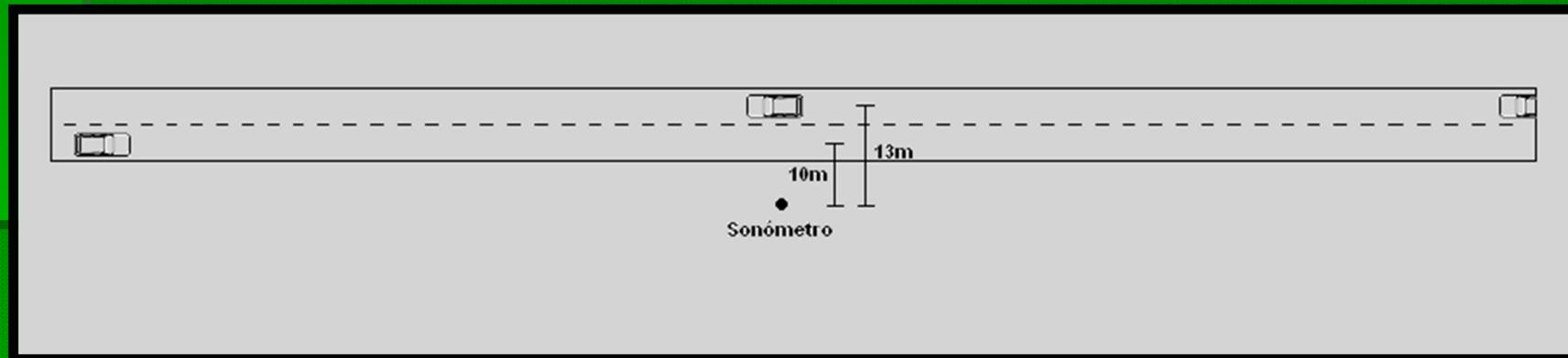
Análisis: Software Noise Explorer de B&K en el Laboratorio de Acústica del Departamento de Física de la Universidad Pública de Navarra.

INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
3. Modelo CNOSSOS
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

5. Medidas

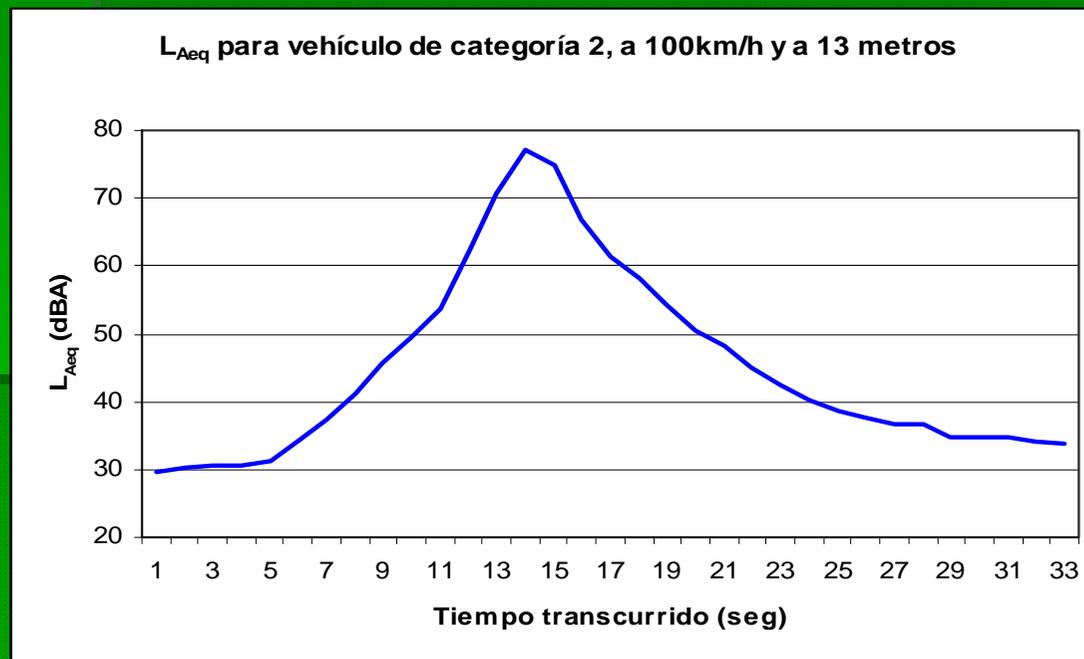
Descripción del caso práctico



5. Medidas

Caso particular

Cálculo del L_{Aeq} a partir de los datos obtenidos en el sonómetro



Energía: $10^{(L/10)}$

$$L_{eq} = 10 * \log \left(\frac{N}{T} * \text{"energía"} \right)$$

Frec (Hz)	Energía	L_{eq} (dB)	L_{Aeq} (dBA)
25	8626897,3	54,2	9,5
31,5	8182410,9	53,9	14,5
40	6542222,3	53,0	18,4
50	6468664,8	52,9	22,7
63	6924673,7	53,2	27,0
80	14817555,6	56,5	34,0
100	9353576,3	54,5	35,4
125	4524269,4	51,4	35,3
160	8145334,2	53,9	40,5
200	8896278,1	54,3	43,4
250	7872230,6	53,8	45,2
315	20737894,8	58,0	51,4
400	10160434,6	54,9	50,1
500	14543211,4	56,4	53,2
630	9705586,0	54,7	52,8
800	12200801,2	55,7	54,9
1000	14970614,1	56,6	56,6
1250	20620516,8	58,0	58,6
1600	11270565,9	55,3	56,3
2000	5587008,7	52,3	53,5
2500	4197950,2	51,0	52,3
3150	2106132,0	48,0	49,2
4000	1099360,5	45,2	46,2
5000	533544,5	42,1	42,6
6300	259337,1	39,0	38,9
8000	110923,8	35,3	34,2
10000	44647,1	31,3	28,8
Banda ancha:			65,0

5. Medidas

Caso particular

Cálculo del $L_{W,0}$ a partir de los datos obtenidos en el sonómetro

$$L_{W,0} = L_{Aeq} + 3 + 10 \log (h) - 10 \log \left(\frac{N}{T \cdot V} \right)$$

Frec (Hz)	L_{Aeq} (dBA)	$L_{W,0}$ (dBA)
25	9,5	53,2
31,5	14,5	58,3
40	18,4	62,1
50	22,7	66,5
63	27,0	70,8
80	34,0	77,8
100	35,4	79,2
125	35,3	79,0
160	40,5	84,3
200	43,4	87,2
250	45,2	88,9
315	51,4	95,1
400	50,1	93,8
500	53,2	97,0
630	52,8	96,5
800	54,9	98,6
1000	56,6	100,3
1250	58,6	102,3
1600	56,3	100,1
2000	53,5	97,2
2500	52,3	96,1
3150	49,2	93,0
4000	46,2	90,0
5000	42,6	86,3
6300	38,9	82,6
8000	34,2	77,9
10000	28,8	72,6
Banda ancha:		108,8

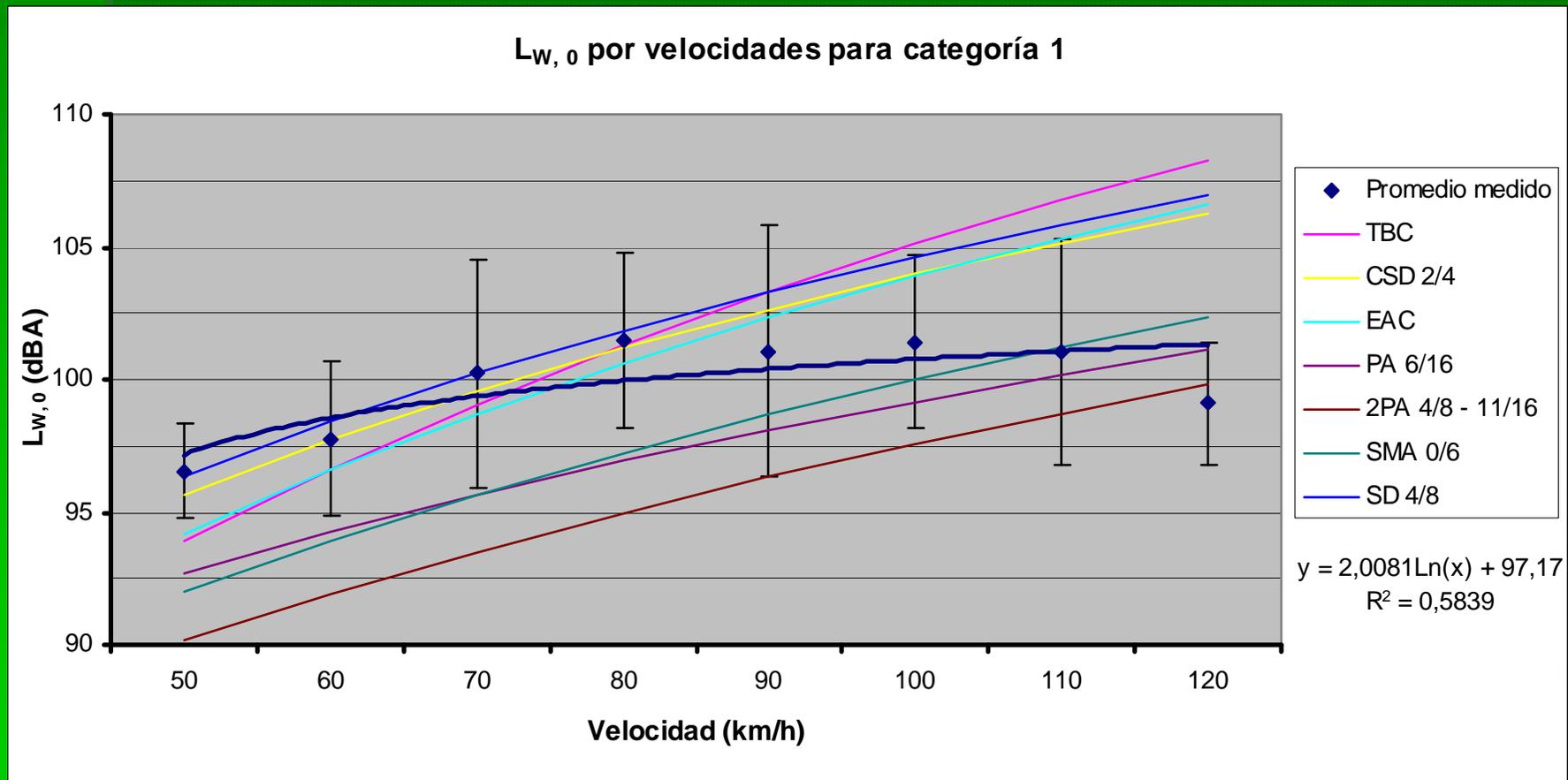
INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
3. Modelo CNOSSOS
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

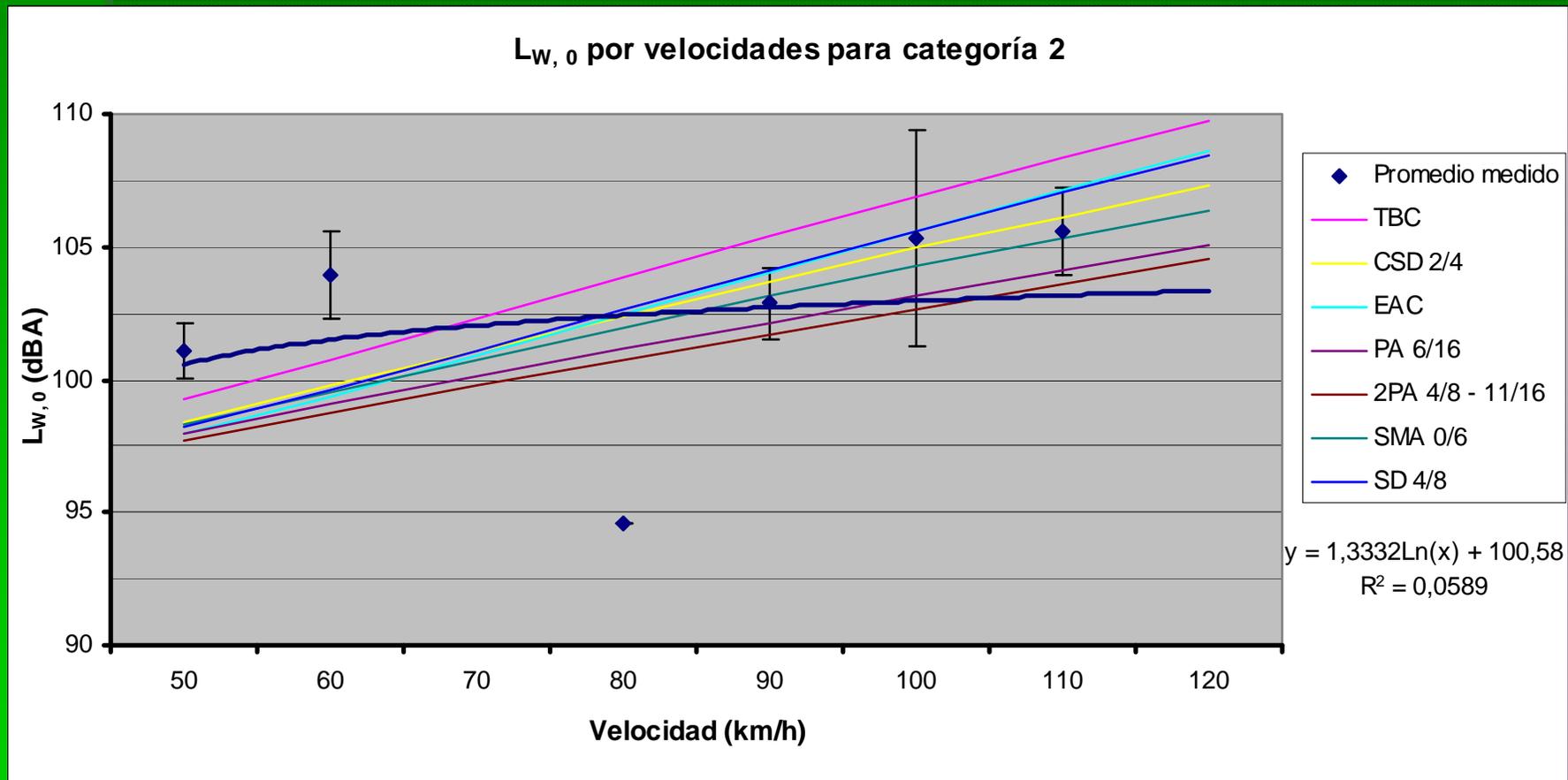
$L_{w,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

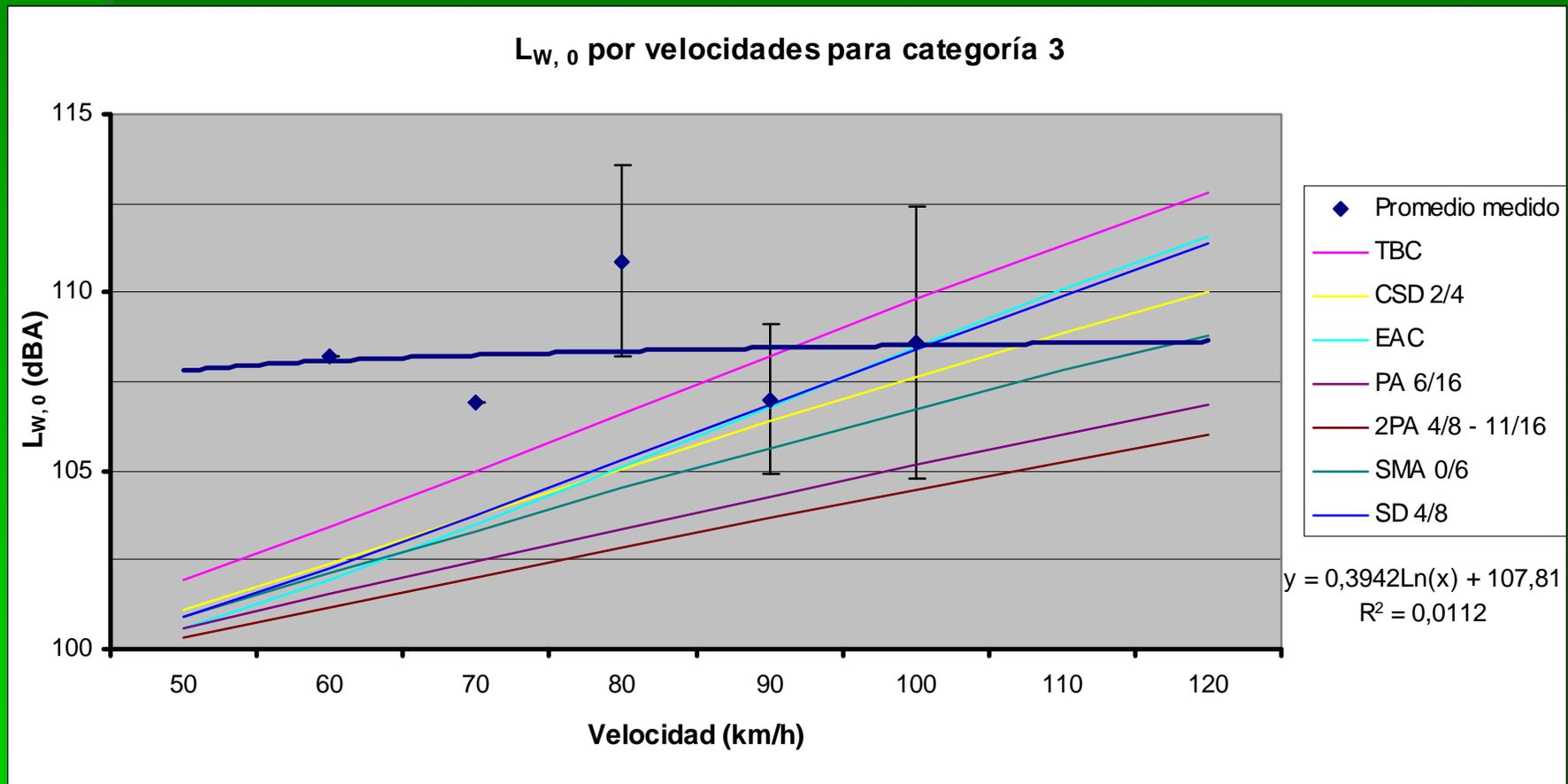
$L_{W,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

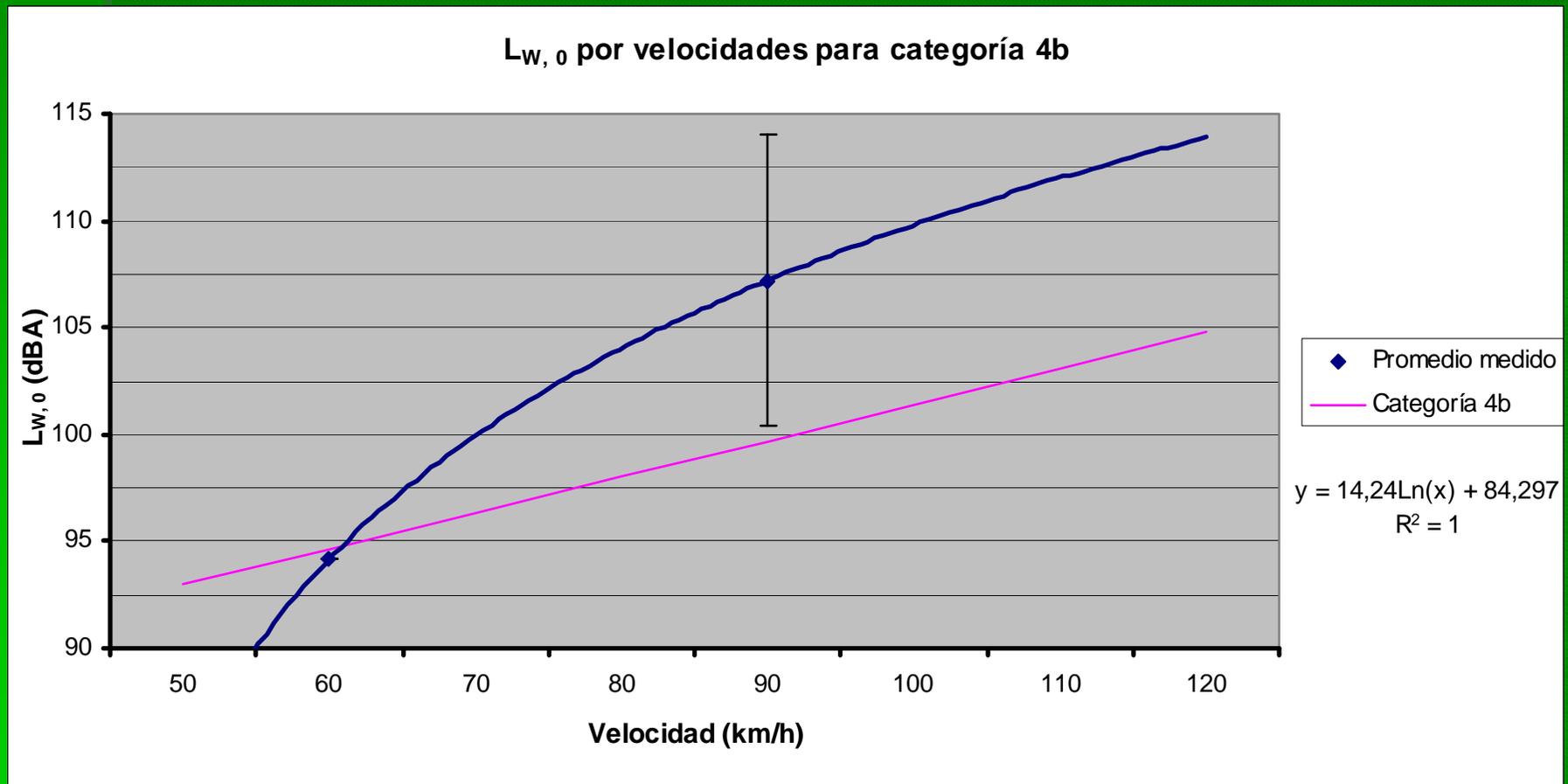
$L_{w,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

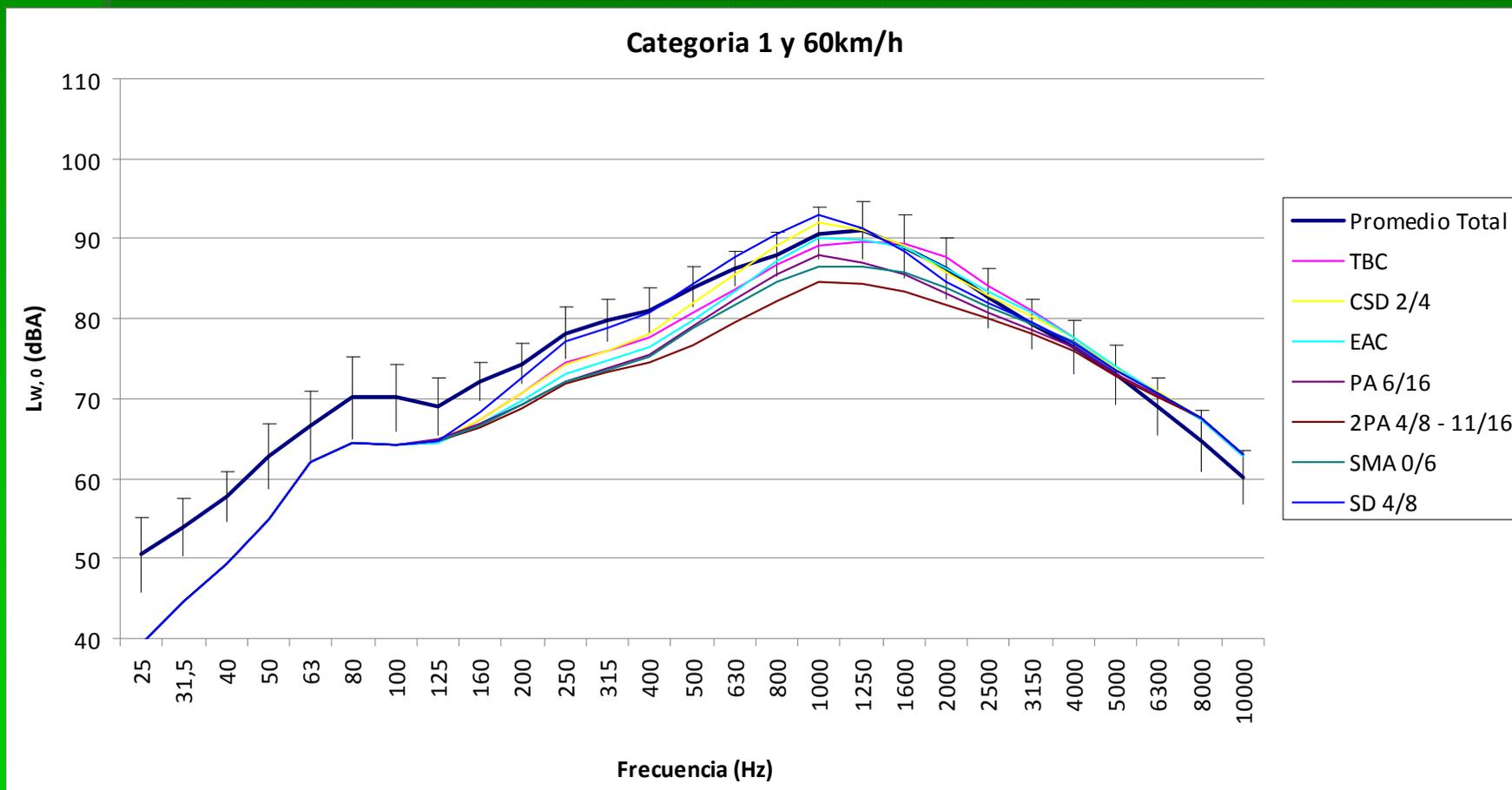
$L_{w,0}$ en banda ancha por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

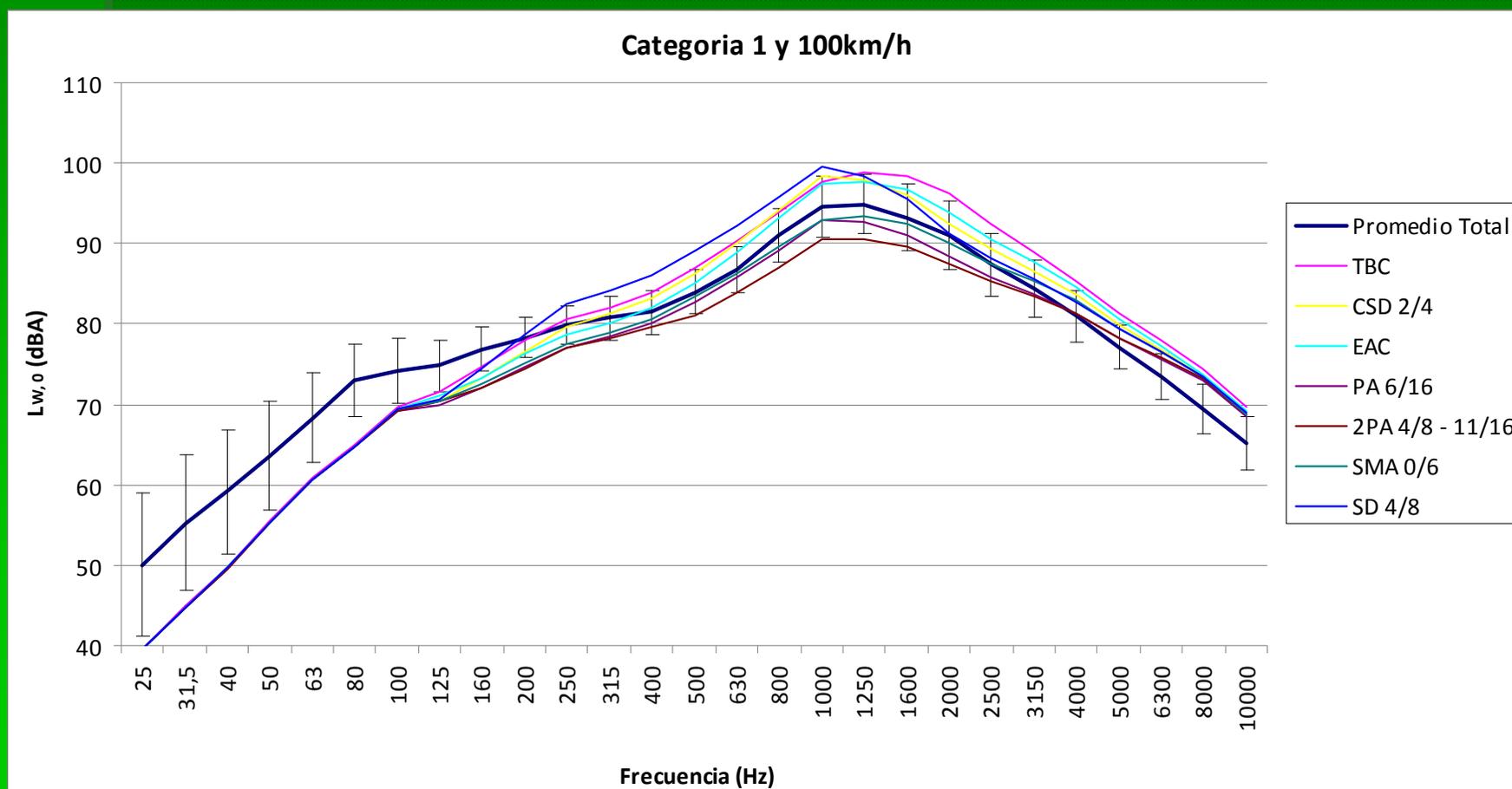
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

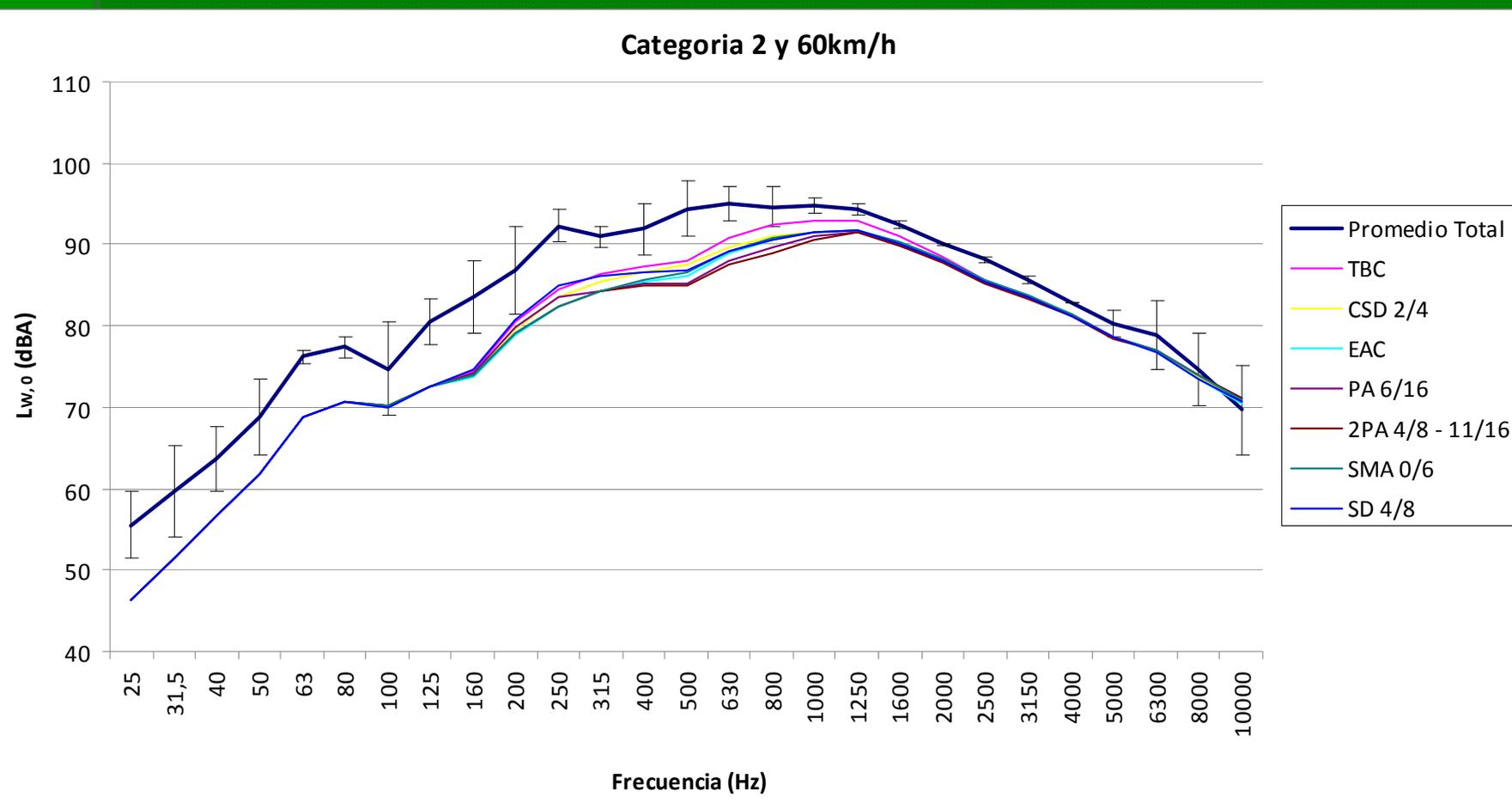
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

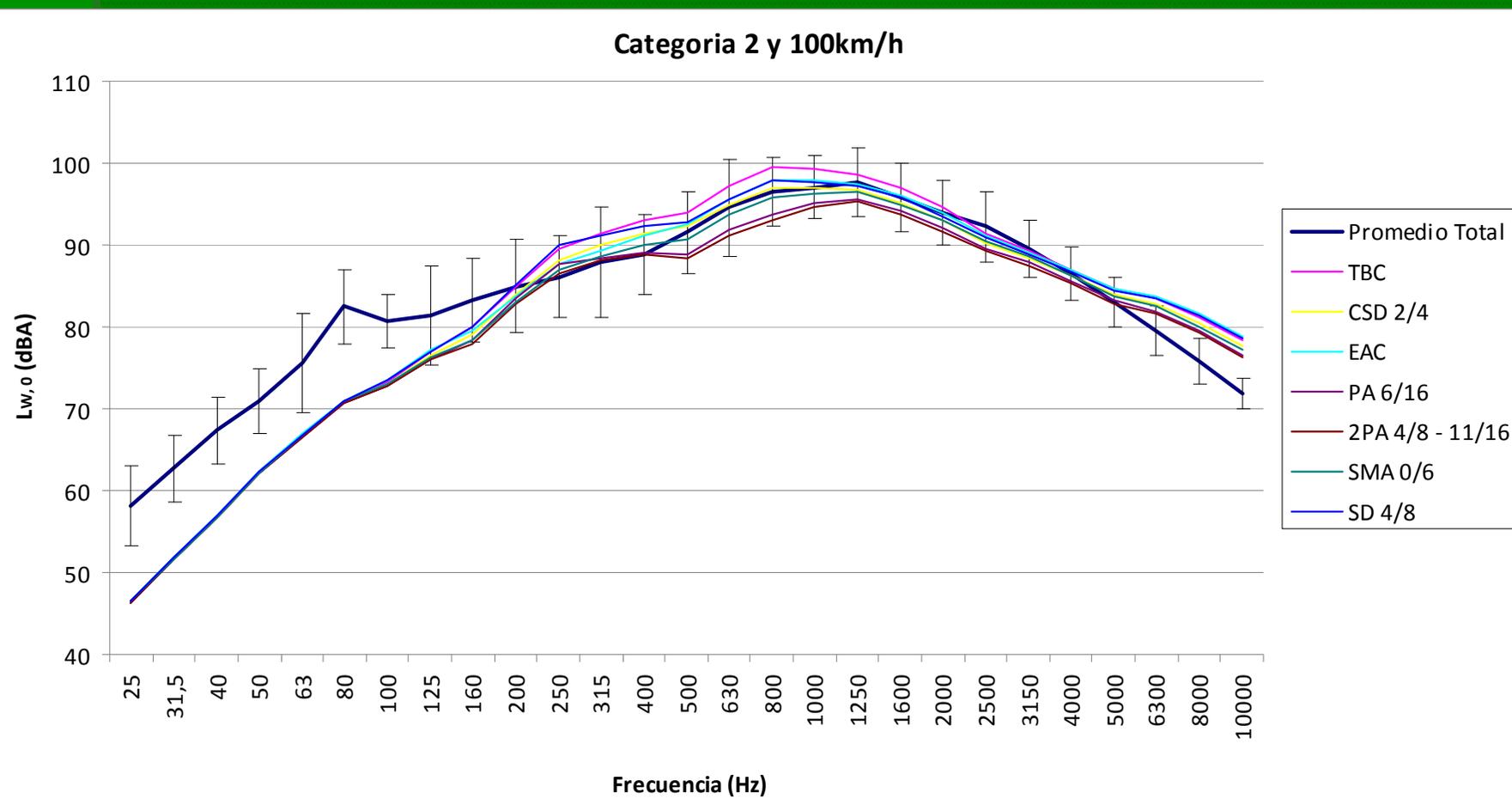
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

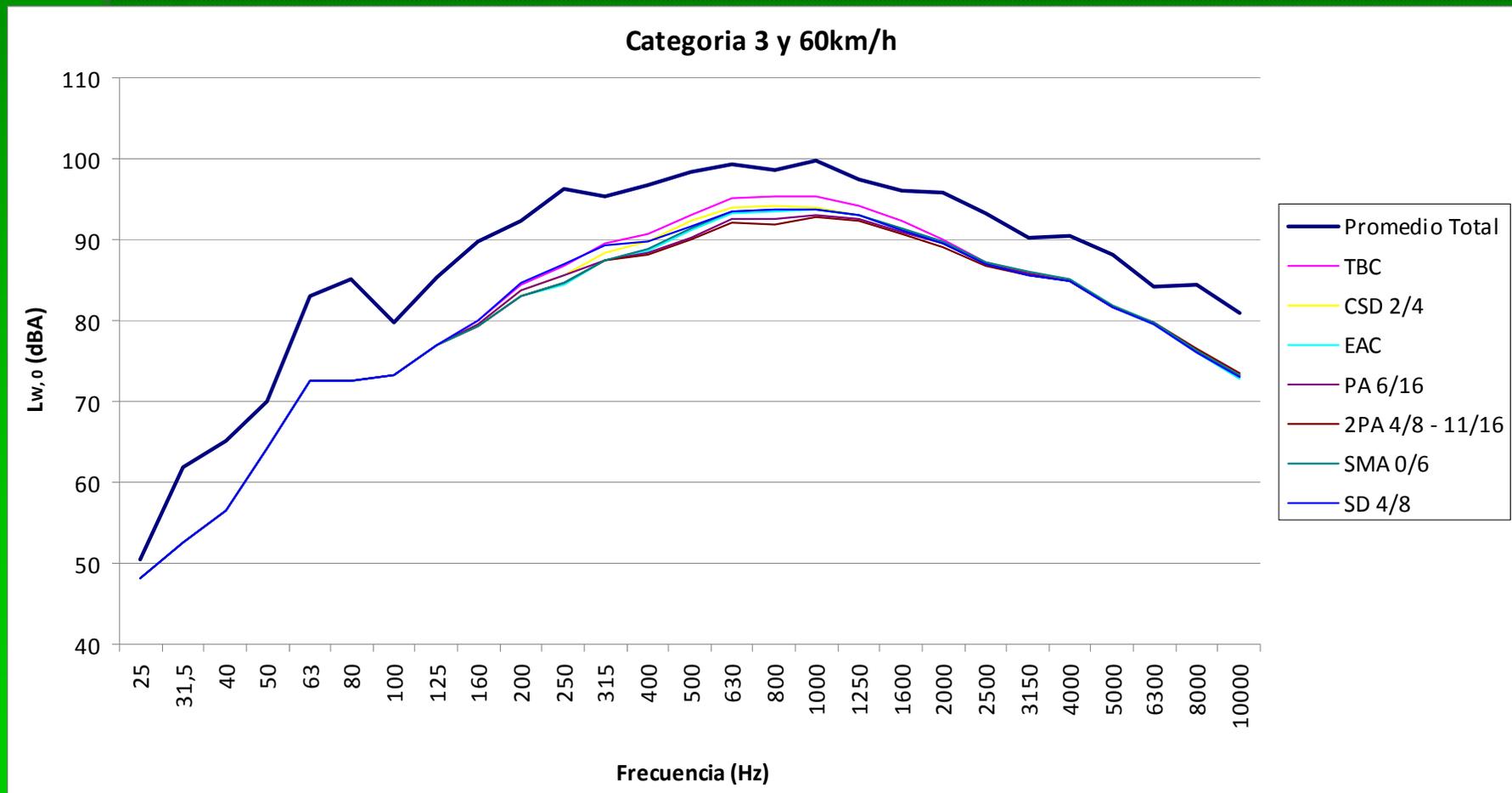
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

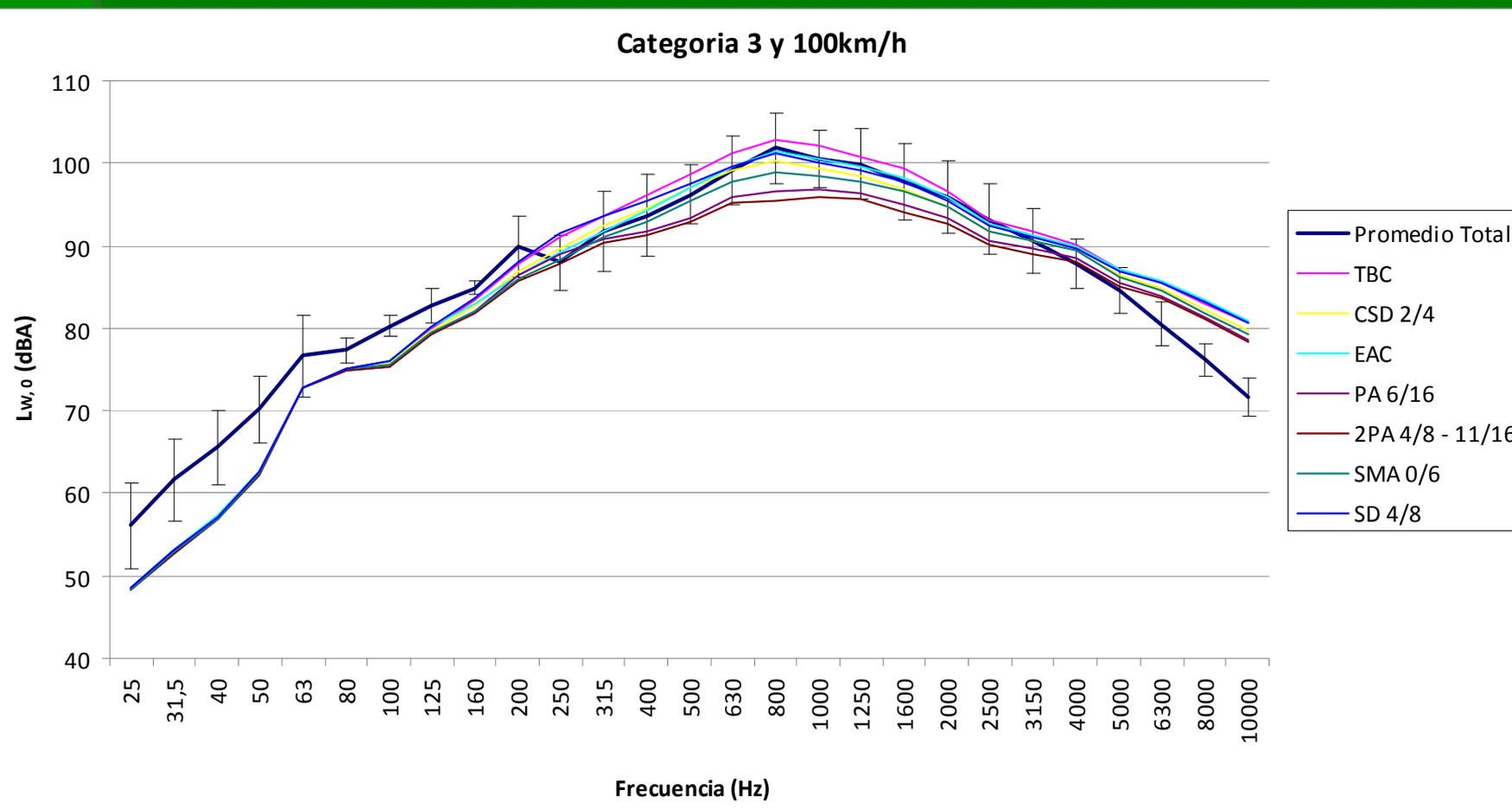
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

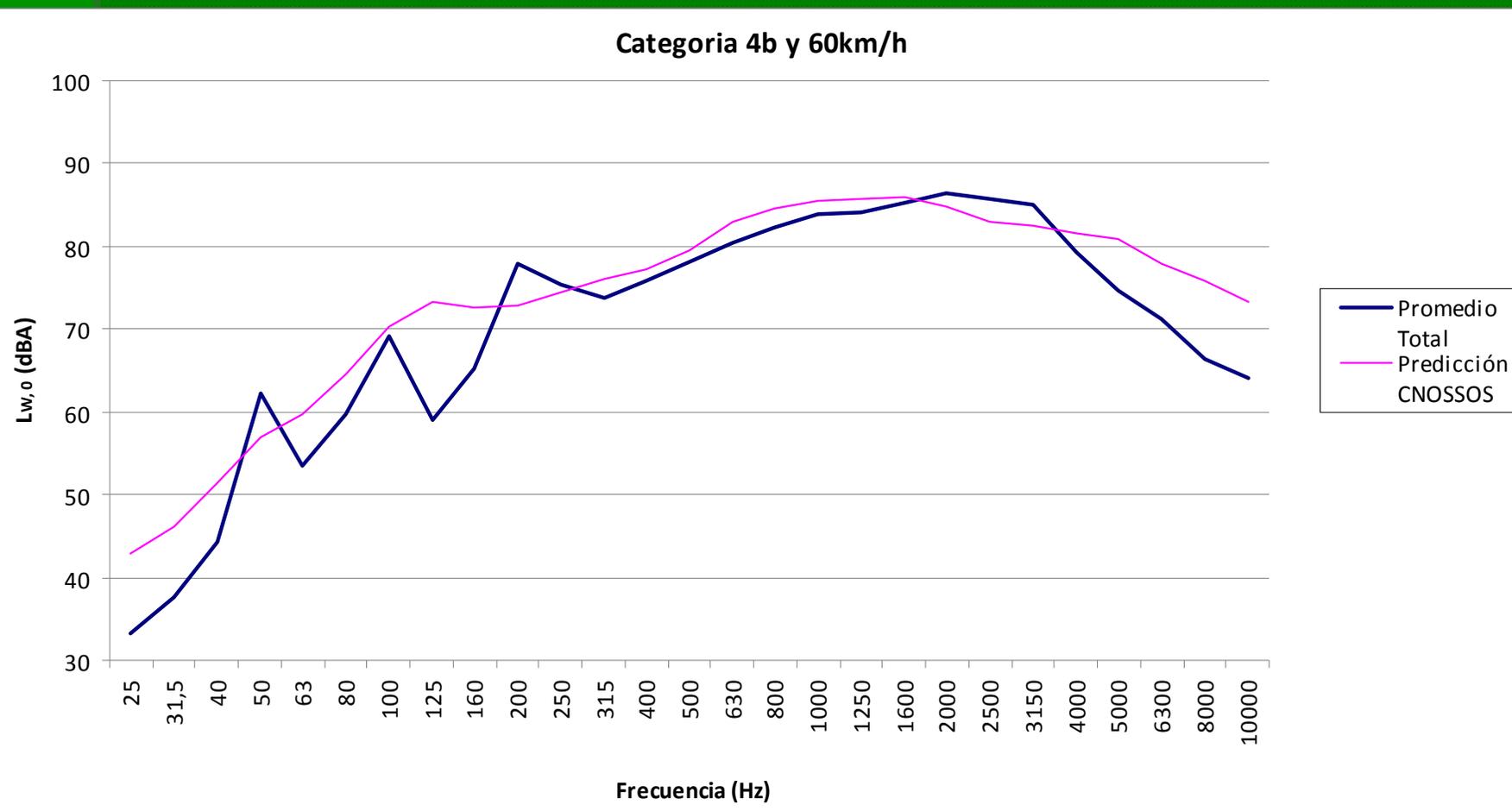
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

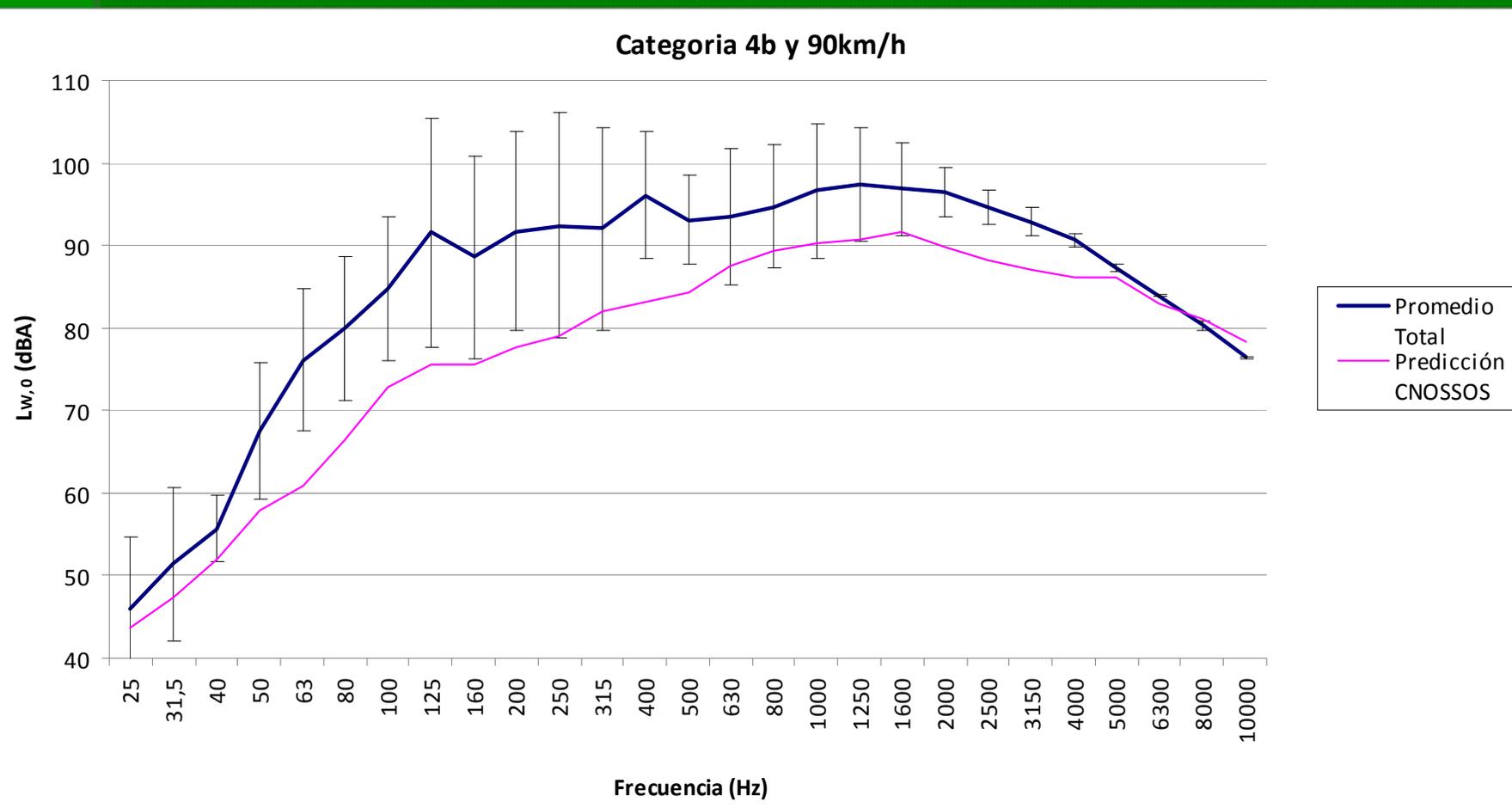
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

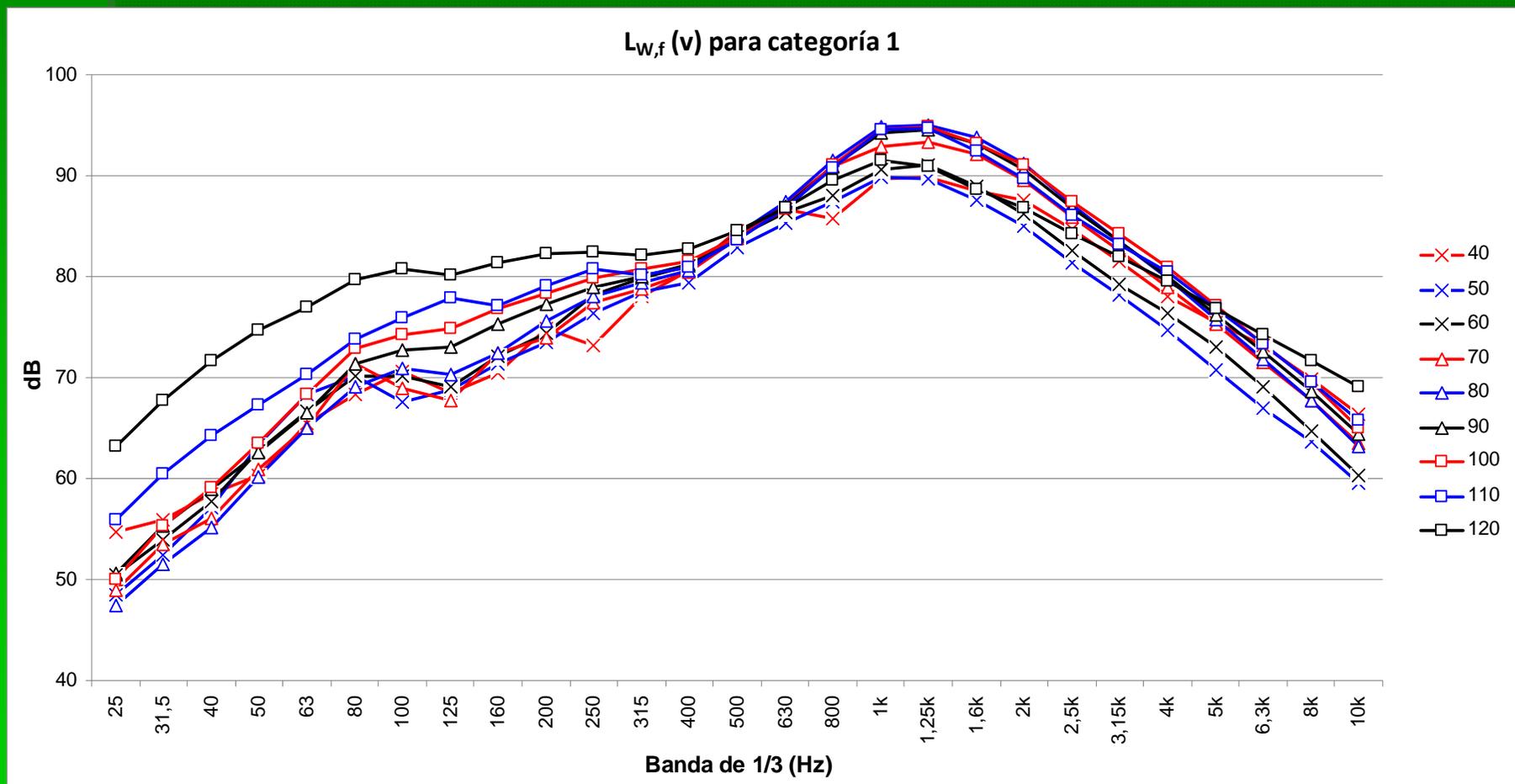
$L_{w,0}$ en tercios de octava por categorías y velocidades



6. Resultados y análisis

Exposición de los resultados

$L_{W,0}$ en tercios de octava por categorías



INDICE

1. Objetivos
2. Modelos previos
3. Modelo CNOSSOS
4. Dispositivo experimental
5. Medidas
6. Resultados y análisis
7. Conclusiones

7. Conclusiones

Comparar incertidumbre

Resultados

Banda ancha

Resultados en general no muy equiparables con los predichos por CNOSSOS.

Categoría 1: Mejores aproximaciones medido-predicho para bajas velocidades (50-70km/h).

Categorías 2, 3 y 4: Mejores aproximaciones para altas velocidades (90-110km/h) aunque datos menos representativos.

Tercio de octava

Resultados muy equiparables a los predichos por CNOSSOS.

Vehículos ligeros los más representativos con diferencias de unos 5 dBA.

No se define un tipo de asfalto más aproximado.

Por velocidades

Mayor dispersión para bajas frecuencias y menor para medias. Pico entorno a 1,25kHz.

Conclusión general

- Datos en banda ancha aproximados para bajas velocidades. En los resultados por tercios de octava las mayores dispersiones se dan en bajas frecuencias
- Los niveles promedio en banda ancha para velocidades superiores a 80km/h no son comparables a los predichos por el modelo para categoría 1. Modelo no muy representativo para muchos de los asfaltos en los que se han tomado datos.
- Aunque se dan algunas semejanzas, como para los valores de potencia instantánea de la fuente en función de la frecuencia.

Muchas gracias por su atención