

TESIS DOCTORAL
UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE



**“Adaptación del modelo de predicción de ruido
de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la
presencia de vehículos eléctricos”**

Héctor Campello Vicente

DIRECTORES:

Dr. Ing. Emilio Velasco Sánchez

Dr. Ing. Ramón Peral Orts

Abril - 2014

AUTORIZACIÓN DE LA PRESENTACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL POR LOS DIRECTORES

D. Emilio Velasco Sánchez, Profesor Doctor del Área de Ingeniería Mecánica en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche y D. Ramón Peral Orts, Profesor Doctor del Área de Ingeniería Mecánica en el Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

Autorizan:

La presentación de la Tesis Doctoral titulada “**Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos**”, realizada por D. Héctor Campello Vicente, bajo nuestra dirección y supervisión, en el Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica de la Universidad Miguel Hernández de Elche, y que presenta para la obtención del grado de Doctor por la Universidad Miguel Hernández de Elche.

En Elche, a 20 de Marzo de 2014.

Los Directores de la Tesis:

Fdo: Emilio Velasco Sánchez

Fdo: Ramón Peral Orts

Dña. **JULIA ARIAS RODRIGUEZ**, Profesora Titular de Universidad y Directora del Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica de la Universidad Miguel Hernández de Elche,

CERTIFICA,

Que el trabajo realizado por D. Héctor Campello Vicente, titulado **“Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB-ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos”** y dirigido por el Dr. Emilio Velasco Sánchez y el Dr. Ramón Peral Orts, ha sido realizado en el Departamento de Ciencia de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica y se encuentra en condiciones de ser leído y defendido como Tesis Doctoral ante el correspondiente tribunal en la Universidad Miguel Hernández.

Y para que así conste y surta los efectos oportunos, firmo la presente en Elche, a 20 de Marzo de 2014.

Fdo. Dña. Julia Arias Rodríguez
Poveda Dir. Dpto. Ciencia de
Materiales, Óptica y Tecnología
Electrónica





A todos los que habéis pasado por
mi vida a los largo de estos años.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis doctoral no es el fruto de mi esfuerzo, es el de muchos, que creyendo que aportaban un granito de arena con su apoyo, aportaban un torrente de fuerza sin la cual nunca hubiese llegado hasta aquí.

En primer lugar, y como no, agradecerles a mis padres que no dejasen de hacerme la eterna pregunta “¿Cuándo acabas la tesis?”, esa pregunta señalaba el camino para poder decirles “Ya está”. Y por supuesto a mis hermanos que a su manera también me apoyaban y al resto de la familia.

Agradecer a los amigos del “volei”, del pádel, compañeros de carrera y de la vida en general, el estar ahí para los buenos y malos momentos. Dentro de este agradecimiento general siempre hay una mención especial, en este caso es para Josevi y Pacheco a los que sé que si les llamo me sacarán una sonrisa.

Por otro lado, me gustaría agradecer a todos mis compañeros de laboratorio de estos años los buenos momentos y risas mientras trabajábamos, Alfredo, María, Nacho, Ginés, Juani y proyectantes... Sé que soy un pesado, gracias por aguantar mis bromas y a algunos lo siento por no dejaros dormir para hacer los ensayos de esta tesis.

No puedo olvidarme del grupo del comedor, por supuesto es un placer compartir cafés, comidas y tertulias con vosotros. Lorenzo, David, Fran, Arturo, Pedro G, Lucas, etc. Gracias por esos ratitos. Del mismo modo quiero agradecer a todos los compañeros del Departamento de Mecánica y Energía la oportunidad de ser un compañero más entre ellos.

Javi y Nuria, hemos crecido juntos con nuestras tesis, con alegrías, penurias y dolores de cabeza durante nuestra andadura en la universidad. El “final”, que parecía que no llegaba para los 3, ha llegado al fin. Ha sido un placer compartir este camino con vosotros.

Empezando con los agradecimientos al núcleo del LIAV, empiezo por ti Nuria. Somos el día y la noche del laboratorio, ya sabes que tú eres el orden y yo soy el caos, gracias pasarme los miles de archivos que he extraviado a lo largo de estos años y por supuesto por animarme a terminar... Más de una vez hubiese terminado con la solución fácil, abandonar.

Por supuesto Emilio tú no puedes faltar en estas palabras, gran tutor, excelente persona y mejor amigo. Tu visión de las cosas ha sido fundamental, no solo para acabar la tesis sino para crecer como persona.

Y a ti te dejo el último Ramón. No puedo solo darte las gracias, porque sería poco... Te debo un mundo por ponerme un sonómetro en las manos y hacerme disfrutar de estos casi 9 años juntos en el laboratorio. Lo siento no puedo llamarte “Tutor”, solo puedo llamarte “Gran Amigo”. Gracias por los consejos sobre cualquier cosa y lo siento por las ocasiones en que has sufrido mis cambios de humor...

Adaptación del modelo de predicción de ruido de tráfico rodado NMPB- ROUTES 2008 a la presencia de vehículos eléctricos

Héctor Campello Vicente

RESUMEN

La contaminación acústica genera una molestia en las personas que es difícilmente evaluable de forma cuantitativa, pero es un factor muy importante a tener en cuenta para la calidad de vida en las ciudades. Es por ello que la sociedad está tomando conciencia del problema de la contaminación acústica y la administración está adoptando medidas para reducir los niveles de ruido, mediante textos legislativos destinados a evitar, prevenir o reducir con carácter prioritario los efectos perjudiciales de la exposición al ruido ambiental.

A partir de la Directiva 2002/49/CE se obligó a las administraciones a realizar mapas de ruido en cada municipio con la finalidad de disponer de información de forma documentada de los niveles de ruido existentes, pudiendo así evaluar la necesidad de realizar medidas correctoras con las que mejorar la situación acústica.

La representación cartográfica de los niveles de presión sonora existentes en una zona concreta, se confecciona a partir de modelos matemáticos debidamente contrastados en función de las fuentes de ruido existente en la zona bajo estudio. Dichos modelos evalúan la propagación del sonido a través del medio para la posterior cuantificación de la exposición de la población al ruido, siendo la fuente de ruido de mayor contribución en las ciudades el tráfico rodado.

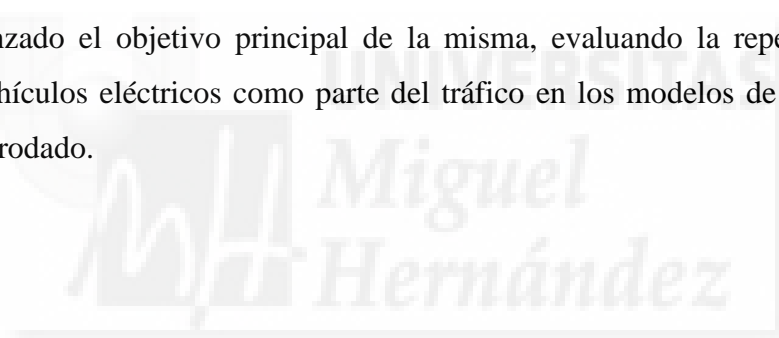
La presente Tesis Doctoral recoge el estudio de la inserción del vehículo eléctrico dentro de los modelos de predicción de ruido basados en el tráfico rodado, justificando los resultados sobre el modelo de predicción NMPB ROUTES empleado como modelo estándar en España.

El punto de partida para el estudio del vehículo eléctrico como fuente de ruido, ha sido la caracterización de los niveles de emisión de éste según la metodología descrita en la norma UNE-EN-ISO 11819-1:2002.

A partir de la determinación de los niveles de emisión sonora de los vehículos eléctricos, se ha generado una nueva variable a implementar en el modelo de predicción de ruido NMPB ROUTES, siendo así posible evaluar la repercusión de estos vehículos dentro del flujo de tráfico, en diferentes condiciones de circulación.

Parte de esta investigación se ha realizado colaborando con el Proyecto Europeo E-vader. Como resultado de esta fase se ha analizado la repercusión de la aplicación de señales de ruido que aumenten la percepción acústica de los vehículos eléctricos frente a peatones y ciclistas. La introducción de una fuente de ruido adicional en estos vehículos genera un cambio del comportamiento como fuente de ruido respecto al punto inicial del proyecto. Por ello, se han analizado los resultados al aplicar estas señales adicionales sobre los vehículos eléctricos con la intención de comprobar cómo afectarán en la representación en los mapas de ruido.

El trabajo realizado y los resultados expuestos en esta Tesis Doctoral permiten concluir que se ha alcanzado el objetivo principal de la misma, evaluando la repercusión de la presencia de vehículos eléctricos como parte del tráfico en los modelos de predicción de ruido de tráfico rodado.



NMPB-ROUTES 2008 noise prediction model adapted to electric vehicles presence

Héctor Campello Vicente

ABSTRACT

Noise pollution causes a nuisance to people, which is difficult to assess quantitatively, but is a very important factor to take into account regarding the quality of life in the cities. This is why the society is becoming aware of the problem of noise pollution and the government is taking steps to reduce noise levels through legislative texts aimed at avoiding, preventing or reducing, as a matter of priority, the harmful effects of the exposure to environmental noise.

Following the Directive 2002/49/CE, the government was obliged to create noise maps in every municipality in order to provide documented information on existing noise levels, which allows assessing the need for taking corrective measures to improve the noise situation.

The cartographic representation of the sound pressure levels existing in a given area is developed from mathematical models which are properly contrasted according to the noise sources in the area under study. These models evaluate the sound propagation through the medium for the subsequent quantification of noise exposure of the population, being the road traffic the most contributing source in the cities.

This Doctoral Thesis includes the study of introducing the electric vehicle into the road traffic noise prediction models and supports the results on the noise prediction model NMPB ROUTES.

The starting point when studying the electric vehicle as a noise source has been the description of its emission levels according to the methodology described in ISO 11819-1.

After determining the noise emission levels of electric vehicles, a new variable to be implemented in the noise prediction model NMPB ROUTES has been created; this variable assesses the repercussion of introducing these vehicles into the traffic flow with different traffic conditions.

Furthermore, we have taken part in the European Project E-vader and we have analyzed the repercussion of using noise signals which increase the noise perception of electric vehicles by pedestrians and cyclists. The introduction of an additional noise source in these vehicles produces a change in behavior as a noise source with regard to the initial point of the project. Therefore, the repercussion of applying these additional signals to electric vehicles has been analyzed in order to verify whether the current noise situation would worsen in noise maps.

The work carried out and the results shown in this Doctoral Thesis allow us to conclude that the main aim of this Thesis was achieved by assessing the repercussion of the presence of electric vehicles as part of the traffic in noise prediction models.



INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN	1
2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE	5
2.1. MODELOS DE PREDICCIÓN DE RUIDO.....	5
2.2. VEHÍCULO ELÉCTRICO	16
3. OBJETIVO	21
4. CARACTERIZACIÓN SONORA EXPERIMENTAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO	23
4.1. RUIDO EN VEHÍCULOS	23
4.1.1. RUIDO DE RODADURA.....	26
4.1.2. <i>Mecanismos de generación de ruido</i>	27
4.1.3. <i>Métodos de medida</i>	31
4.2. OBJETIVO DE LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES	40
4.3. ENSAYOS E INSTRUMENTACIÓN	41
4.4. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS	47
4.4.1. <i>Estudio del ruido de rodadura</i>	47
4.4.2. <i>Análisis del vehículo eléctrico como fuente de ruido</i>	54
4.4.3. <i>Análisis del vehículo eléctrico frente a modelos de predicción.</i>	61
4.5. CONCLUSIONES.....	66
5. MODELO DE PREDICCIÓN FRANCÉS NMPB-ROUTES	69
5.1. BASE DEL MODELO IMPLEMENTADO	70
5.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO FUENTE ORIGINAL	71
5.2.1. <i>Valores de emisión sonora en vehículos</i>	74
5.3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE PROPAGACIÓN	76
5.4. DATOS ACTUALIZADOS EN EL MODELO FRANCÉS 2008	82
6. IMPLEMENTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN EL MODELO NMPB-ROUTES ...	85
6.1. APLICACIÓN DE UN CAUDAL DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN MEDIDAS EXPERIMENTALES	86
6.2. CONDICIONES DE ACELERACIÓN EN MAPAS DE RUIDO	91
6.3. MODELOS DE ALTA DENSIDAD Y APLICACIÓN A CASOS REALES	93
6.4. MEJORA DE LAS CONDICIONES DE EXPOSICIÓN SONORA EN LA POBLACIÓN.	104
6.5. CONCLUSIONES.....	110
7. PROBLEMÁTICA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	113
7.1. ANTECEDENTES	116
7.2. APLICACIÓN DEL MODELO FRANCÉS PARA LA DETECCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	118
7.3. CONDICIONES DE LA SIMULACIÓN SEGÚN SAE J2889-1	121
7.4. CONTRIBUCIÓN DE LOS SONIDOS DE ALERTA EN LOS MAPAS DE RUIDO.....	126
7.5. CONCLUSIONES.....	128
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	131
8.1. CONCLUSIONES.....	131
8.2. TRABAJOS FUTUROS	132

9. BIBLIOGRAFÍA135



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelización de una fuente de ruido dentro de los modelos de predicción.	9
Figura 2. Vehículo eléctrico diseñado por Thomas Edison.....	17
Figura 3. Previsión de matriculaciones de vehículos eléctricos	19
Figura 4. Flujo de trabajo desarrollado	22
Figura 5. Principales fuentes de ruido de un vehículo	23
Figura 6. Contribución de las diferentes fuentes sonoras al ruido total de un vehículo [10]	25
Figura 7. Composición básica de un neumático.....	26
Figura 8. Esquema del proceso de generación de ruido “Air pumping”	28
Figura 9. Esquema del proceso de generación de ruido “Stick slip”.....	29
Figura 10. Esquema del proceso de generación de ruido “Stick snap”	29
Figura 11. Vibración de la carcasa del neumático provocada por la rodadura [8]	30
Figura 12. Efecto bocina creado entre el neumático y el pavimento.....	31
Figura 13. Amplificación del sonido generada la resonancia de Helmholtz.....	31
Figura 14. Esquemización del ensayo Stadistical Pass-By	32
Figura 15. Requerimientos dimensionales para los ensayos Pass-By y Coast-By	34
Figura 16. Máquina de ensayos de neumáticos empleada en el Método Drum	35
Figura 17. Esquema de posicionamiento de micrófonos según el método CPX.....	37
Figura 18. Esquema de posicionamiento de los micrófonos según el método A-CB	38
Figura 19. Región rectangular asumida como foco sonoro.....	39
Figura 20. Esquema de posicionamiento de los micrófonos según el método A-CPX	40
Figura 21. Composición y situación de la pista de ensayo.....	42
Figura 22. Medidas de la pista de ensayo respecto a los ensayos Coast-By y Pass-By	42
Figura 23. Equipos de adquisición de datos IMC Cronos Compact y LMS Pimento	44
Figura 24. Esquema de localización de las fotocélulas de paso	45
Figura 25. Vehículos de propulsión eléctrica empleados.....	46
Figura 26. Instantánea de los ensayos realizados sobre un vehículo eléctrico	46
Figura 27. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 185	50
Figura 28. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 195	51
Figura 29. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 205	52
Figura 30. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 205 frente a un vehículo eléctrico	56
Figura 31. Comportamiento de un vehículo eléctrico frente a térmico circulando en Coast-By	57
Figura 32. Comportamiento de un vehículo eléctrico frente a térmico circulando en Pass-By	58
Figura 33. Comportamiento de 2 vehículos térmicos con diferentes modos de conducción	59
Figura 34. Comportamiento de un vehículo eléctrico frente a un vehículo híbrido circulando en modo eléctrico.....	60
Figura 35. Comparación del comportamiento del vehículo eléctrico frente a los ábacos del modelo NMPB-ROUTES.....	61
Figura 36. Comparación de espectros entre el modelo de predicción y las medidas experimentales	62
Figura 37. Comparación de espectros entre el modelo de predicción, las medidas experimentales y el reparto espectral establecido por la UNE-EN 1793-3	63

Figura 38. Comparación del comportamiento del vehículo eléctrico frente a los niveles extraídos del Imagine Project.....	65
Figura 39. Comparación de espectros entre el modelo de predicción NMPB ROUTES 2008 y los niveles extraídos del Imagine Project.....	66
Figura 40. Comparación de los diferentes espectros de tráfico rodado considerados por el NMPB-ROUTES 2008	72
Figura 41. Esquema de las diferentes posiciones consideradas para la aplicación de la atenuación por difracción entre fuente y receptor para firmes discontinuos	81
Figura 42. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos en carretera.....	87
Figura 43. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos circulando en carretera..	87
Figura 44. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos circulando en ciudad	88
Figura 45. Diferencia de niveles por la sustitución del total de vehículos por vehículos eléctricos	90
Figura 46. Diferencia de niveles máxima en función del tipo circulación	92
Figura 47. Reducción de niveles en función del caudal de tráfico	95
Figura 48. Esquema de la composición de la vía estudiada	97
Figura 49. Extracto del mapa acústico de la ciudad de Elche	98
Figura 50. Diferencia de comportamientos según las condiciones de circulación	99
Figura 51. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico en ausencia de pesados .	100
Figura 52. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico con un 5% de pesados en circulación	101
Figura 53. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico en ausencia de pesados en situación de aceleración.....	103
Figura 54. Mapa de Ruido L_{DEN} aplicando vehículos eléctricos	106
Figura 55. Distribución de habitantes afectados por franjas de recepción	107
Figura 56. Distribución de habitantes afectados dependiendo del tipo de tráfico	108
Figura 57. Esquemización de los ensayos descritos en la norma SAE Standard J2889-1	114
Figura 58. Esquemas simulados y evaluados a partir de las mediciones del proyecto eVADER. .	116
Figura 59. Niveles de percepción acústica en función del ruido de fondo	117
Figura 60. Esquema del paso de la fuente ante el receptor.....	119
Figura 61. Simulación de los ensayos Coast-By a 7,5m	120
Figura 62. Simulación de los ensayos Coast-By estudiados a 3,75m.....	120
Figura 63. Esquema de la posición del receptor para la simulación.....	121
Figura 64. Resultado gráfico de la simulación a 20 km/h	122
Figura 65. Resultado de la aplicación de los warning sounds en la simulación.....	123
Figura 66. Instantánea de los ensayos experimentales del proyecto eVADER.....	124
Figura 67. Umbral de seguridad en función de la detectabilidad del vehículo y el ruido de fondo [46]	125
Figura 68. Simulación de la desconexión de los warning sound a 35 y 50 km/h.....	126
Figura 69. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico aplicando los warning sounds en ausencia de pesados	127
Figura 70. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico aplicando los warning sounds con un 5% de pesados en circulación.....	128
Figura 71. Niveles del vehículo eléctrico frente a los estándares internacionales estudiados.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de vehículos para cada categoría.....	14
Tabla 2. Neumáticos comerciales evaluados.....	48
Tabla 3. Resultados obtenidos para cada neumático.....	49
Tabla 4. Valores medios obtenidos para los neumáticos de ancho 185mm.....	50
Tabla 5. Valores medios obtenidos para los neumáticos de ancho 195mm.....	51
Tabla 6. Valores medios obtenidos para los neumáticos de ancho 205mm.....	52
Tabla 7. Diferencias de niveles en función de la velocidad.....	53
Tabla 8. Comparación de neumáticos por velocidades ante el vehículo eléctrico.....	56
Tabla 9. Valores de Lrodadura en función de la superficie de rodadura. [79].....	74
Tabla 10. Corrección del Lrodadura dependiendo de la antigüedad de la superficie.....	75
Tabla 11. Valores de Lmotor para un vehículo a velocidad constante.....	75
Tabla 12. Valores Lmotor para un vehículo acelerado.....	75
Tabla 13. Valores Lmotor para un vehículo desacelerado.....	75
Tabla 14. Coeficientes de absorción atmosférica (a 15°C y 70% de H.R.) para cada banda de tercio de octava.....	78
Tabla 15. Valores de G en función del tipo de superficie [80].....	79
Tabla 16. Expresiones del efecto suelo en condiciones favorables NMPB-ROUTES 96.....	79
Tabla 17. Datos actualizados entre las últimas versiones del NMPB ROUTES.....	83
Tabla 18. Valores de Lmotor para un vehículo en condiciones “Start&Stop”.....	91
Tabla 19. Máximo caudal de tráfico para una vía en función de la velocidad.....	94
Tabla 20. Porcentajes de vehículos pesados circulando por una vía según NMPB ROUTES.....	95
Tabla 21. Porcentaje de saturación de la vía estudiada.....	102
Tabla 22. Porcentaje de saturación de la vía estudiada asumiendo un semáforo como elemento de retención.....	102



1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco de la investigación

El ruido ambiental es uno de los problemas que afecta más gravemente a los ciudadanos que residen en los núcleos urbanos. Éste se percibe como una molestia que disminuye la calidad de vida de las personas que lo sufren y puede tener consecuencias muy variables, desde no poder mantener una conversación entre dos personas, hasta llegar a producir alteraciones del sueño y de concentración, así como trastornos en el sistema nervioso.

La contaminación acústica es un tipo de contaminación que no se acumula, no se traslada y no se mantiene en el tiempo, pero puede causar alteraciones en la calidad de vida de las personas si no se controla de forma adecuada. En las últimas décadas, las diferentes administraciones han considerado necesario cambiar el planteamiento global en política de reducción de ruido, desarrollando medidas a diferentes niveles con el fin de controlar o reducir el ruido ambiental. En el caso de España, el 18 de noviembre de 2003 se publicó la Ley 37/2003, del Ruido[57], viniendo a establecer un marco de referencia para la regulación de la contaminación acústica, ajustada a las características, costumbres y estado del medio ambiente acústico del país, teniendo en cuenta el enfoque de la Unión Europea presentado en el “Libro Verde de la Comisión Europea” (Bruselas 1996) [69], en éste se identifica el ruido del tráfico rodado como el mayor problema de ruido, y establece diferentes pautas a seguir para reducir los niveles generados por el tráfico como una de las medidas más destacables.

Todas estas actuaciones van orientadas a evitar o combatir los resultados que se han ido mostrando en diferentes encuestas sobre nivel, calidad y condiciones de vida, como por ejemplo la publicada por el Instituto Nacional de Estadística, y que según se recogía en 2006 en la memoria publicada por el Ministerio de Medio Ambiente sobre el “Medio Ambiente en España 2006” [60], el problema más habitual en las viviendas españolas, considerado en su conjunto, es el ruido. Entonces se estimaba que el 25% de los hogares españoles estaban afectados por problemas de ruido, ampliándose este porcentaje en 2009 y 2011 hasta el 31% [27] [61], estando expuestos al ruido ambiental generado por fuentes de emisión sonora de características muy diferentes entre sí. Entre las más significativas

figuran las infraestructuras y medios de transporte (tráfico rodado, ferroviario, aeropuertos y puertos marítimos), las actividades e instalaciones industriales, comerciales, deportivo-recreativas y de ocio. De entre los medios de transporte, el tráfico rodado (turismos, camiones, autobuses, motocicletas, etc.) constituye la fuente de ruido ambiental más importante en entornos urbanos.

Para poder cumplir con los niveles máximos establecido por la legislación, es necesario conocer los aspectos más significativos de cada fuente de ruido, siendo el tráfico rodado la fuente sonora de mayor repercusión en entornos urbanos. El ruido regenerado por el tráfico rodado se compone de tres fuente principales: el ruido mecánico (sistema motriz, escape y sistemas mecánicos), el ruido de rodadura (interacción entre el neumáticos y el pavimento) y ruido aerodinámico [63] [71].

Dependiendo de la situación en que se estudie el vehículo como fuente de ruido, la composición de sus niveles se distribuirá en mayores proporciones de una fuente o de otra. Por ejemplo en situaciones de tráfico urbano denso, cuando se emplean marchas cortas se producen frecuentes aceleraciones y frenadas predominando el ruido provocado por la propia mecánica del vehículo; en cambio en la circulación en carretera el ruido de rodadura repercute en mayor proporción.

Durante años, las medidas encaminadas a la disminución del ruido generado por el tráfico se han basado únicamente en estrategias de diseño de dispositivos reductores de ruido, tales como pantallas acústicas. Pero en los últimos veinte años, muchos fabricantes de automóviles han conseguido disminuir notablemente los ruidos debidos al motor, a la transmisión y al escape, provocando con ello que el ruido generado por el contacto neumático/carretera llegue a ser predominante en la mayoría de las situaciones a velocidades medias.

Para la disminución del ruido de rodadura, las soluciones pasan por actuar sobre el neumático y las características del pavimento, siendo de vital importancia tener en cuenta la influencia de las características de la superficie de rodadura sobre el ruido generado en la interacción neumático/asfalto.

Por otro lado y tratando de paliar el problema de la contaminación acústica, se está trabajando en la elaboración y puesta en práctica de una política de lucha contra el ruido basada en la responsabilidad compartida entre la Unión Europea y las administraciones, incluyendo medidas para la mejora de la exactitud y estandarización de los datos.

Los trabajos en materia de control de ruido en la Unión Europea condujeron a la adopción de la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo sobre evaluación y gestión del ruido ambiental [25] ofreciendo una oportunidad idónea para dotar de mayor estructura y orden al panorama normativo sobre contaminación acústica, aplicando las siguientes medidas de forma obligatoria:

- 1) Determinar la exposición al ruido ambiental, elaborando mapas sonoros según los métodos de evaluación comunes en los Estados Miembros.
- 2) Poner a disposición de la población la información sobre el ruido ambiental y sus efectos.
- 3) Adoptar planes de acción tomando como base los resultados de los mapas de ruido, con vistas a reducir o prevenir el ruido ambiental siempre que sea necesario y, en particular, cuando los niveles de exposición puedan tener efectos nocivos en la salud, manteniendo la calidad del entorno acústico cuando ésta sea satisfactoria.

Estos mapas de ruido se utilizarán como documentos básicos sobre la situación de ruido ambiental que afecta a la población, con la finalidad de desarrollar planes de acción que afronten las cuestiones relativas al ruido y sus efectos, tal y como define la Directiva en su definición mapa acústico:

“Mapa diseñado para poder evaluar globalmente la exposición al ruido de una zona determinada, debido a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales para dicha zona.”

Según la definición, un mapa de ruido es un instrumento empleado para evaluar la exposición al ruido de una zona o punto concreto. Por lo tanto los mapas sonoros contienen información sobre los niveles a los que la población está expuesta debido a las diferentes fuentes de ruido que le rodean.

Tras la aprobación de la Directiva 2002/49/CE, el Ministerio de Medio Ambiente Español constituyó la Ley 37/2003[57], mediante la cual respondió al compromiso de realizar los mapas estratégicos de ruido de las grandes aglomeraciones y en el entorno de las infraestructuras viarias, ferroviarias y aeroportuarias.

Para la realización de estos mapas de ruido es necesario el empleo de herramientas adecuadas que recreen situaciones reales en función de las fuentes de ruido existentes en la zona bajo estudio. La elaboración de un mapas puede llevarse a cabo o bien a partir de mediciones acústicas en la zona estudiada, o mediante simulaciones computacionales, siendo la metodología más usual la utilización de un método mixto que combine la utilización de mediciones experimentales para validar y calibrar las predicciones realizadas de forma computacional.

Para llevar a cabo la realización de estos mapas de ruido es necesario aplicar modelos adecuados y contrastados en función de cada tipo de ruido, por ejemplo España carece de un modelo propio de predicción de ruido de tráfico y por ello se emplea de forma reconocida por la administración el método nacional francés “NMPB-ROUTES”.

Dicho modelo describe un procedimiento detallado para la evaluación de los niveles sonoros causados por el tráfico rodado en las inmediaciones de una vía, teniendo en cuenta los efectos de la propagación según norma UNE 9613 [45]. Este modelo, así como otros empleados en otros países, parte de la aplicación de ruido generado por vehículos en función de su velocidad.

Al contemplar el tráfico como la fuente de mayor repercusión en los mapas de ruido, se ha creído conveniente el estudio de la repercusión del vehículo eléctrico como parte del tráfico en mapas de ruido debido a sus características “silenciosas”.

2. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

2.1. Modelos de predicción de ruido

Los modelos de predicción de ruido de tráfico rodado nacen de la necesidad de disponer de una herramienta que permita prever los niveles sonoros que producirá una vía de tráfico. La comparación entre las previsiones y los máximos niveles sonoros permitidos en la normativa dota a las autoridades de información de la situación acústica del un lugar para realizar las medidas correctoras necesarias tratando de evitar impactos no deseados o la realización de medidas correctoras posteriores más costosas en el caso la predicción sobre nuevos planteamientos urbanísticos.

La elaboración de un modelo debe contemplar, esencialmente, dos aspectos: el modelo de fuente y el modelo de propagación:

- Modelo de fuente: Se encarga de asignar una potencia acústica a la vía (o bien directamente, o estableciendo un nivel base a la distancia de referencia) en función de las variables de la circulación y de la vía, tales como densidad, velocidad y composición del tráfico, naturaleza y pendiente de la vía, etc. [11].
- Modelo de propagación: Cuantifica las correcciones sobre el nivel sonoro base a partir de múltiples variables debidas a la propagación en el espacio, tales como la distancia a la vía, la absorción del aire y de terreno, efectos pantalla, reflexiones, etc.

Los niveles sonoros atribuidos al tráfico suelen determinarse a partir de un gran número de medidas en muy diferentes condiciones de tráfico. El conocimiento de la potencia acústica y directividad de cada uno de los vehículos individualmente es una tarea inabordable debido a los cambios producidos en las características de los vehículos, aunque se aconseje por ello la revisión y actualización periódica de los modelos fuente.

Los modelos de predicción representan una poderosa herramienta de aplicación para la planificación de espacios y control del impacto acústico, ya que en ellos se asocian parámetros geográficos a los niveles de ruido generados según las condiciones de contorno del lugar.

Los estudios en materia de contaminación acústica y la generación de modelos de predicción de ruido no son algo nuevo, aunque en la actualidad exista una mayor relevancia. En los inicios del diseño de modelos de predicción estos fueron confeccionados con el propósito de predecir el nivel de presión sonora de un único vehículo en carretera, avanzando con el tiempo a modelos que incorporaban el factor temporal para conseguir el nivel continuo equivalente del flujo de vehículos en distintas circunstancias [4].

En 1977, Gilbert [33] planteó una de las primeras ecuaciones para cuantificar niveles de ruido urbano obteniendo el percentil 10, L_{10} . Esta ecuación fue obtenida a través de mediciones tomadas en la ciudad de Edimburgo, siendo validada la expresión mediante 134 mediciones realizadas en las ciudades de Sheffield y Róterdam.

Años después, en 1980, Lawrence y Burgess [56] de forma similar presentaron un estudio comparativo entre diferentes métodos de predicción, evaluando la atenuación provocada por el apantallamiento de los edificios sobre el tráfico rodado.

Favre [31], en 1983, llevo a cabo un análisis de los tipos de modelos de predicción separando estos en función de la metodología por la cual se obtenían, ya sea mediante métodos manuales (Fórmulas o ábacos), métodos computacionales o modelos a escala.

Entre los modelos manuales Favre destacó el modelo FHWA (EEUU), el cual obtenía de una forma sencilla los niveles equivalentes a partir del uso de apéndices paso a paso, obteniendo los niveles de referencia según la clasificación de vehículos, así como la atenuación debida a la vegetación y apantallamiento por obstáculos respecto a un punto.

Por otro lado, dentro de este apartado Favre menciona el método de predicción desarrollado por los Países Nórdicos donde al igual que en el modelo estadounidense obtiene el nivel equivalente a partir de cálculos y ábacos.

En lo referente a estudios de modelos computacionales, se vienen desarrollando desde los años 60 hasta día de hoy, sintetizando las expresiones de los modelos mencionados anteriormente.

Por último se encuentran los modelos a escala, dichos modelos son útiles en situaciones específicas donde la formulación matemática pierde efectividad. Estas situaciones de baja efectividad suelen encontrarse en cruces de vías o situaciones de tráfico discontinuo donde cuantificar el ruido generado deja de ser constante en el tiempo.

Si se fija la atención en la separación de modelos de predicción realizada por Favre, se encuentran gran cantidad de investigadores que desarrollan expresiones de predicción de ruido a lo largo de los años, por ejemplo en 1987 Jraiw [50] y Radwan y Oldman [73] desarrollaron por separado sus modelos computacionales generando una mayor información que los primeros modelos comentados, ya que no solo obtenían el L_{eq} sino que aportaba de forma adicional con los niveles L_{10} , L_{50} y L_{90} (Jraiw) aplicando la teoría de trazado de rayos (Radwan y Oldman), generándose y validándose ambos a partir de mediciones de campo en zonas urbanas.

Buscando trabajos que se diferencien de los expuestos anteriormente, se encuentran los desarrollados por los investigadores Cammarata, Cavalieri y Fichera [14] en 1995, estos aplicaron redes neuronales a los modelos de predicción de ruido usando la red de retropropagación BPN, necesitando mediciones acústicas en determinados casos tan libres de error como fuese posible debido a la complejidad del método.

Federico Miyara [62] en 1999, brindó los fundamentos físicos, estadísticos y algorítmicos de la predicción del ruido del tráfico rodado. Miyara desarrolla los conceptos de propagación del sonido en exteriores, incluyendo los efectos de la divergencia geométrica, atenuación en el aire, reflexión y absorción superficial, efectos del viento y los gradientes térmicos, potencia sonora emitida por un vehículo, efectos de la pendiente, aceleración y desaceleración, espectro y parámetros estadísticos del ruido total. Finalmente el autor concluyó dando como resultado de su trabajo consejos para llevar a cabo protocolos de medición y ajuste de los parámetros en situaciones específicas.

Sin tener presente todavía los modelos de predicción actuales como punto de partida de la investigación, a lo largo de los años son muchos los autores y grupos de trabajo que han trabajado en la caracterización del ruido dentro de modelos de predicción de ruido desde el punto de vista de situaciones particulares.

La caracterización del entorno sonoro de una vía puede ser una tarea compleja, la saturación del tráfico rodado en función de las condiciones de circulación, características de la vía, elementos de retención, etc., produce una gran variabilidad temporal de los niveles sonoros. Por este motivo los autores que han centrado sus esfuerzos en caracterizar condiciones específicas, como pueden ser las proximidades de un cruce o el efecto sonoro producido por la existencia de semáforos.

Dichas condiciones específicas de tráfico generan una variabilidad temporal en el ruido ambiental que no estaría expresada en los mapas de ruido, estos documentos tienden a expresar los resultados para espacios de tiempo determinados representando valores acumulados de ruido.

En entornos urbanos aparecen frecuentemente eventos instantáneos que elevan los niveles de ruido de forma instantánea debido a varios factores, [92] apareciendo de forma aleatoria en espacios de tiempo cortos y generando la mayor molestia desde el punto de vista del receptor [20].

Dejando a un lado las condiciones particulares de la circulación del tráfico rodado en mapas de ruido, otra de las líneas de investigación trabajada por diferentes grupos es la comparación de resultados entre modelos de predicción [37] [3]. Estas Comparaciones no necesariamente deben ser entre modelos oficiales, de los cuales se hablará más adelante en este trabajo, sino frente a modelos simplificados realizados por investigadores. [54].

Después de esta breve revisión bibliográfica de los estudios realizados por investigadores a lo largo de los años, se va a dar paso a la exposición de algunos de los modelos de predicción de ruido validados y utilizados tanto en la actualidad como a lo largo de los años en el ámbito internacional.

El tráfico sobre una vía, ya sea urbana o una extraurbana, consiste en un gran conjunto de vehículos de distintos tipos, cilindrada, etc. cuya proporción relativa dentro del flujo total depende del tipo de vía y la hora del día estudiada, entre otros factores.

Los diferentes métodos de predicción de ruido de tráfico rodado consideran condiciones viales ideales, un flujo continuo de vehículos en una carretera de longitud infinita y con propagación sonora libre, sin absorciones o reflexiones indeseadas definiendo por otro lado el pavimento de referencia en cada modelo de forma particular[19]. La mayoría de estos

modelos consideran el flujo de tráfico como una fuente lineal donde toda la energía emitida por una sección de vía se concentra en un punto y se propaga hasta el receptor.

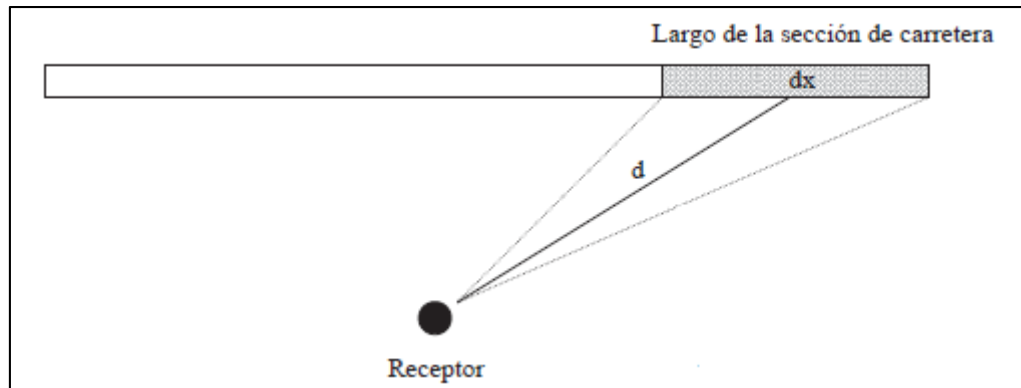


Figura 1. Modelización de una fuente de ruido dentro de los modelos de predicción.

$$l_i = 10 \log_{10}(dx) \quad (1)$$

Donde:

l_i Es la distancia al segmento de la fuente lineal modelada.

dx Es la Longitud en metros del segmento considerado de la vía.

La suposición de fuente puntual puede considerarse siempre y cuando todas las dimensiones de la fuente sean más pequeñas que la mitad de la distancia de la fuente al receptor, existiendo las mismas condiciones de propagación entre el receptor y fuente [36].

Como se ha mencionado anteriormente, no siempre es posible considerar a una carretera como fuente lineal y por ello es importante saber distinguir en qué circunstancias es posible tomar esta consideración. Teniendo en cuenta las condiciones de circulación de una vía, si el flujo de tráfico es bajo la fuente sonora estudiada se reducirá a subfuente puntuales, los vehículos de forma individual. Por lo tanto, si los modelos tienen en cuenta caudales de tráfico y no vehículos circulando como fuente unitaria, es necesario aplicar un flujo constante de vehículos para la aplicación de esta condición.

Los estándares o modelos de predicción que se conforman por ecuaciones matemáticas sencillas se elaboran a partir de la integración de los submodelos fuente y de propagación. A continuación se muestran diferentes tipos de modelos en función del método de consideración de la fuente a la hora de describir la generación del ruido.

En primer lugar se encuentran los estándares que modelan la emisión acústica a partir de un solo vehículo en la vía, y a partir de éste se produce el fenómeno de emisión del conjunto del tráfico, entre estos se encuentran por ejemplo el desarrollado por la FHWA, el "FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model".

Por otro lado existen modelos que toman la vía como una fuente lineal de ruido donde cada vehículo emite energía. En ellos se asigna una potencia acústica por unidad de longitud de vía, directamente o bien estableciendo un nivel base a una distancia de referencia en función de las variables de la circulación y de la vía, tales como la densidad, velocidad y composición del tráfico, naturaleza y pendiente de la vía, entre otros. Entre los modelos de este tipo se encuentran el STL-86 de Suiza, el RLS-90 de Alemania, el CoRTN de Inglaterra y NMPB-ROUTES de Francia.

Los modelos de fuente son esencialmente empíricos y conllevan una concepción estadística del fenómeno, obteniendo los niveles sonoros base a través de un gran número de medidas en diferentes condiciones de circulación para poder aislar el factor emisión de la influencia de otras variables del entorno.

Tras esta pequeña exposición se presenta un repaso de algunos modelos de predicción de ruido existentes, exponiendo los parámetros principales empleados en el cálculo, así como una pequeña muestra de su formulación, sin tener en cuenta las restricciones de sus modelos de propagación los cuales en la mayoría de los casos parten de la ISO 9613, será comentada en siguientes apartados.

En primer lugar se expone el documento llamado Directivas para la Protección de Ruido en las Carreteras, RLS 90, publicado por el Departamento de Construcción de Carreteras del Ministerio Federal de Transportes Alemán, éste proporciona un método de previsión de niveles de ruido producidos por la circulación del tráfico rodado.

Las características del modelo de forma general se presentan a continuación [78]:

- Descriptor: $L_{eq}(A)$:1hora
- Distancia de referencia: 25 m
- Altura de referencia: 4 m
- Altura de la fuente: 0.5 m
- Composición de flujo: Vehículos ligero y vehículos pesados

$$L_{ME} = L_{25} + C_{vel} + C_{pav} \quad (2)$$

Donde:

L_{25} Corresponde al nivel sonoro base a 25 metros.

$$L_{25} = 37.3 + 10 \log[Q_l(1 + 0.082Q_p)] \quad (3)$$

C_{vel} Corrección respecto de la velocidad en función del tipo de vehículo.

C_{pav} Corrección debida a la superficie de la carretera.

Por otro lado, dentro de los modelos europeos de predicción de ruido de tráfico encontramos el modelo de predicción de ruido desarrollado en Inglaterra por primera vez en 1975, el C.R.T.N [12] (Calculation of Road Traffic Noise), éste permite realizar una predicción del nivel estadístico L_{10} para una hora o para un periodo de 18 horas. El cálculo desarrollado por el modelo se subdivide en varias ecuaciones cuyos resultados son válidos para distancias hasta 300m.

- Descriptor: 10 L de 1 hora o 18 horas.
- Distancia referencia: 10 m
- Altura de referencia: 0,5 m
- Composición de flujo: Automóviles y vehículos pesados.

$$L_{10(1h)} = 42.2 + 10 \log_{10}(q) \quad (4)$$

$$L_{10(18h)} = 29.1 + 10 \log_{10}(Q) \quad (5)$$

Q, q Caudal de vehículos para 18 horas y 1 hora respectivamente.

Este modelo obtiene una corrección en función de la velocidad y la composición del tráfico a partir de la siguiente expresión:

$$C_{v,p} = 33 \log_{10} \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \log_{10} \left(1 + 5 \frac{p}{v} \right) - 68.8 \quad (6)$$

Siendo v la velocidad del flujo de tráfico en km/h y p la proporción de vehículos pesados dentro de este flujo.

Siguiendo con la revisión de los modelos de predicción europeos, encontramos el modelo oficial de los Países Nórdicos [55] (Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia) el cual se publicó por primera vez en 1989 y actualizado por última vez en 2000. El Nord 2000 considera niveles de referencia a una distancia sobre una vía plana y de longitud infinita para flujos de tráfico constantes para su análisis.

- Descriptor: Leq (A) :1hora
- Distancia de referencia: 10 m
- Altura de referencia: 1.5 m
- Composición de flujo: Vehículos ligero y vehículos pesados

$$L_{RE} = L_{Básico} + C_{vel} + C_{pav} + C_{traf} \quad (7)$$

Donde:

L_{RE} Corresponde a la suma de los niveles sonoros básicos para cada tipo de vehículos a 10 metros en 1 hora.

$$L_{Aeqi} = L_{AE,10m} + 10 \log \left(\frac{Q_i}{T} \right) \quad (8)$$

C_{vel} Corrección respecto de la velocidad en función del tipo de vehículo.

C_{pav} Corrección debida a la superficie de la carretera.

C_{traf} Corrección debida a la intensidad de circulación.

L_{AE} Nivel sonoro del tipo de vehículo evaluado.

$$L_{AE,10m}(Ligeros) = 73.5 + 25 \log_{10} \left(\frac{v}{50} \right) \text{ para } v > 40; v < 40 \quad L_{AE,10m} = 71 \text{ dB} \quad (9)$$

$$L_{AE,10m}(Pesados) = 81 + 30 \log_{10} \left(\frac{v}{50} \right) \text{ para } v > 50; v < 50 \quad L_{AE,10m} = 81 \text{ dB} \quad (10)$$

Saliendo de las fronteras de la Unión Europea, es posible encontrar diferentes modelos de predicción, como por ejemplo el modelo desarrollado en Estados Unidos de América por la "Federal High Administration", la cual difundió el modelo "FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model" en 1978 [32], actualizándose por última vez en 2004. El cálculo de los

niveles se realiza por separado para cada clase de vehículo obteniendo el nivel global al sumar los niveles de las diferentes clasificaciones de vehículos que componen el tráfico.

- Descriptor $L_{eq}(A)$: 1Hora
- Distancia de referencia: 15,2m.
- Altura de referencia: 1m.
- Composición del flujo de tráfico: Vehículos ligeros, Camiones Medianos (2 Eje, 6 Ruedas) y Camiones pesados (3 o más ejes).

$$L_{Eq}(A) = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{(0.1 \cdot L_{Eq}(d)_{Ligero})} + 10^{(0.1 \cdot L_{Eq}(d)_{Mediano})} + 10^{(0.1 \cdot L_{Eq}(d)_{Pesado})} \right) \quad (11)$$

Con el objetivo de mejorar la calidad y la fiabilidad de los resultados obtenidos con los modelos europeos citados anteriormente, la Comisión Europea ha elaborado un modelo común de evaluación del ruido para tráfico rodado, ferroviario, aeronaves y ruido industrial, destinado a obtener resultados uniformes entre los estados miembros de la Unión Europea.

Dicho modelo de cálculo común para los estados miembros de la Comunidad Europea se conoce con el nombre CNOSSOS-EU[51] [52] [53], acrónimo de Common NOise ASSEssment MethOdS in EU. La metodología del modelo parte como base de los modelos Nord 2000, Imagine [5] [38] y el NMPB ROUTES 2008[70].

El ruido de tráfico rodado en este modelo es el resultado de la suma del ruido producido por cada uno de los vehículos individuales que forman el tráfico, agrupando estos en cuatro categorías dependiendo de sus características:

Categoría	Nombre	Descripción
1	Vehículos Ligeros	Turismos, Furgones de reparto menos de 3500kg incluyendo trailers y caravanas
		Furgones de reparto superiores a 3500kg, autobuses, caravanas, etc.
2	Vehículos de peso medio	Con dos ejes y doble montaje neumático con eje trasero
		Camiones , autobuses, caravanas, con tres ejes como mínimo
3	Vehículos Pesados	
4a	Vehículos de dos ruedas	Ciclomotores, triciclos o quads inferiores a 50 c.c.
4b		Motocicletas, triciclos o quads superiores a 50 c.c.

Tabla 1. Tipos de vehículos para cada categoría.

La emisión de ruido del tráfico es representada por una fuente lineal, aplicando su potencia sonora por unidad de longitud. Esto se corresponde con el sumatorio del sonido emitido por cada vehículo individual, atendiendo al tiempo de circulación de cada vehículo por la sección de la vía evaluada. El ruido emitido por el flujo de tráfico en términos de fuente lineal equivalente es definido por la siguiente expresión:

$$Lw_{eq,line} = Lw_0 + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{1000 \cdot v} \right) \quad (12)$$

$Lw_{eq,line}$ Es el nivel de potencia sonora media por unidad de longitud en dB/m.

Lw_0 Es el nivel de potencia sonora para un único vehículo en dB/m.

Q Es el flujo de tráfico en vehículos por hora.

v Es la velocidad del flujo de tráfico bajo estudio.

El estudio en profundidad de este último modelo de predicción para la aplicación del vehículo eléctrico, se ha considerado como un trabajo futuro dentro de esta línea de investigación iniciada sobre 2 de sus modelos base, Imagine Project y NMPB ROUTES.

Estos dos últimos modelos no han sido nombrados en la anterior descripción debido a que se tratarán en profundidad a los largo del documento en diferentes fases del trabajo. Por una parte el modelo Imagine 2008 (actualización del modelo Harmonoise), se desarrollada dentro del marco del Imagine Project diferenciándose de la mayoría de los modelos de predicción por su estudio de la propagación del sonido diferente a la ISO 9613-2.

La evaluación del ruido por parte del tráfico en este modelo es evaluada en niveles de potencia por frecuencias, desarrollando la propagación del sonido desde la fuente hasta la recepción en un único plano de propagación [95] para niveles equivalente por hora mediante las siguientes ecuaciones:

$$L_{Eqh} = L_w + \Delta C \quad (13)$$

Donde:

L_w Corresponde a la suma de los niveles sonoros básicos para cada tipo de vehículos.

$$L_i(v) = A_i + B_i \cdot f(v) \quad (14)$$

En este modelo se evalúan por separado los niveles por frecuencias y por tipo de ruido separando entre los diferentes tipos de ruido, los cuales se consideran provenientes del motor y de la rodadura.

$$L_{wMotor} = A_p + B_p \cdot \left(\frac{v-v_{ref}}{v_{ref}}\right) \quad L_{wRod} = A_R + B_R \log_{10} \left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad (15)$$

Por otra parte, el Modelo Francés NMPB ROUTES tiene como objetivo proporcionar un modelo de predicción de ruido de tráfico que recoja las restricciones dictadas por la normativa para la recepción de niveles a larga distancia, considerando como variables iniciales para el cálculo la velocidad del tráfico y caudales.

Dicho modelo tiene en cuenta las consideraciones de propagación en la ISO 9613, variando la dispersión del ruido en función de las condiciones del terreno en el que se propaga, así como de los obstáculos que el ruido encuentra a su paso entre el emisor y el receptor.

$$L_{Awi} = 10 * \log_{10} \left((E_{vl} + (10 * \log_{10} Q_{vl})) + (E_{vp} + (10 * \log_{10} Q_{vp})) \right) \quad (16)$$

Donde:

E_{vl} y E_{vp} Son los niveles de emisión de ruido por hora diferenciados en vehículos ligeros y pesados, respectivamente.

Q_{vl} y Q_{vp} Son el flujo de vehículos por hora de ligeros y pesados respectivamente.

2.2. Vehículo eléctrico

El vehículo eléctrico fue uno de los primeros automóviles desarrollados, hasta el punto de existir pequeños vehículos eléctricos anteriores a los de motor de cuatro tiempos, creados por Diésel y Benz. Tras los primeros experimentos de Jedlik (1828) y Thomas Davenport (1835), se encuentra el primer vehículo eléctrico en 1838, cuando Robert Davidson consiguió mover una locomotora a 6 km/h sin usar carbón ni vapor.

Entre 1832 y 1839 Robert Anderson inventó el primer carruaje de tracción eléctrica, con pila de energía no recargable, mientras a su vez el profesor Sibrandus Stratingh de Groningen, en los Países Bajos, diseñó y construyó con la ayuda de su asistente Christopher Becker vehículos eléctricos a escala reducida en 1835.

Las primeras baterías recargables aparecieron antes de 1880 hallando el camino para los vehículos eléctricos, siendo Francia y Gran Bretaña las primeras naciones que apoyaron el desarrollo generalizado de estos vehículos.

Estos vehículos se hicieron con las carreteras en poco tiempo. En torno a 1900 se puede considerar su apogeo, cuando eran los vehículos que más se vendían gracias a que estos automóviles eléctricos realizaban registros de velocidad y distancia notables, entre los que destacan la ruptura de la barrera de los 100 km/h, de Camille Jenatzy el 29 de abril de 1899, alcanzando una velocidad máxima de 105,8 km/h.

Los vehículos eléctricos, producidos en los Estados Unidos por Anthony Electric, Baker, Detroit, Edison, Studebaker, y otros durante los principios del siglo XX tuvieron relativo éxito comercial.



Figura 2. Vehículo eléctrico diseñado por Thomas Edison

La caída del vehículo eléctrico vino contribuida por la introducción del arranque eléctrico de Cadillac en 1913, que simplificó la tarea de arrancar el motor de combustión interna el cual antes de esta mejora resultaba difícil incluso en ocasiones peligroso. Esta innovación, junto con el sistema de producción en cadena de montaje de forma masiva y relativamente barata implantado por Ford en 1908, favoreció a la desaparición del vehículo eléctrico.

A finales de 1930, la industria del automóvil eléctrico desapareció por completo, quedando relegada a algunas aplicaciones industriales muy concretas, como montacargas (introducidos en 1923 por Yale), elevadores con batería eléctrica y más recientemente carros de golf.

La crisis del petróleo fue el detonante de la reaparición de esta tecnología, forzando a los fabricantes de vehículos convencionales a mejorar su eficiencia mientras se buscaban alternativas al petróleo. Por otro lado algunas iniciativas legislativas que exigieron el descenso de las emisiones empujaron a los grandes fabricantes automovilísticos a investigar en este campo. Por ejemplo el estado de California, uno de los más contaminados de EEUU, fue el pionero en establecer una normativa de “0 emisiones” con su ZeroEmission Mandate (1990).

Por entonces el vehículo híbrido tenía más viabilidad como alternativa que el vehículo puramente eléctrico, sin embargo aparecieron en las carreteras de California varios automóviles eléctricos con prestaciones muy razonables y autonomías similares a las que hoy encontramos en este tipo de medios de transporte. Estos vehículos ofrecían una autonomía suficiente para el 90% de los desplazamientos habituales de la población, sus prestaciones eran ya adecuadas y despertaron una contenida expectación, pero por diferentes motivos no avanzaron.

En la actualidad el vehículo eléctrico debe superar diferentes barreras para introducirse de forma significativa en el mercado, siendo el mayor inconveniente social el desconocimiento de las posibilidades de estos vehículos por parte de los usuarios.

Es evidente que la tecnología actual ha evolucionado desde los primeros vehículos eléctricos, pero todavía es necesario avanzar en la mejora de sus prestaciones para poder equipararse a las de un vehículo térmico convencional.

Si se observa la autonomía como una de las limitaciones de estos vehículos, cabe destacar que aunque no se pueda comparar con la autonomía de un vehículo cualquiera debido a sus limitaciones kilómetros recorridos por ciclo de carga (aprox. 180-250km); este sistema de propulsión si es adecuado para 80% de los recorridos cotidianos. [54]

Otra de las limitaciones importante a tener en cuenta para estos vehículos es la localización de puntos de recarga en las ciudades. Independientemente del punto de recarga habitual de cada consumidor, es necesaria la proliferación de puntos de recarga en las ciudades para ampliar las posibilidades de estos vehículos.

El fomento de la infraestructura de recarga es uno de los puntos que el gobierno introduce en el documento “Estrategia integral para el impulso del vehículo eléctrico en España 2010-2104” [28], así mismo dentro de este documento se recogen las medidas planteadas para una introducción considerable de estos vehículos con la siguiente previsión aproximada:

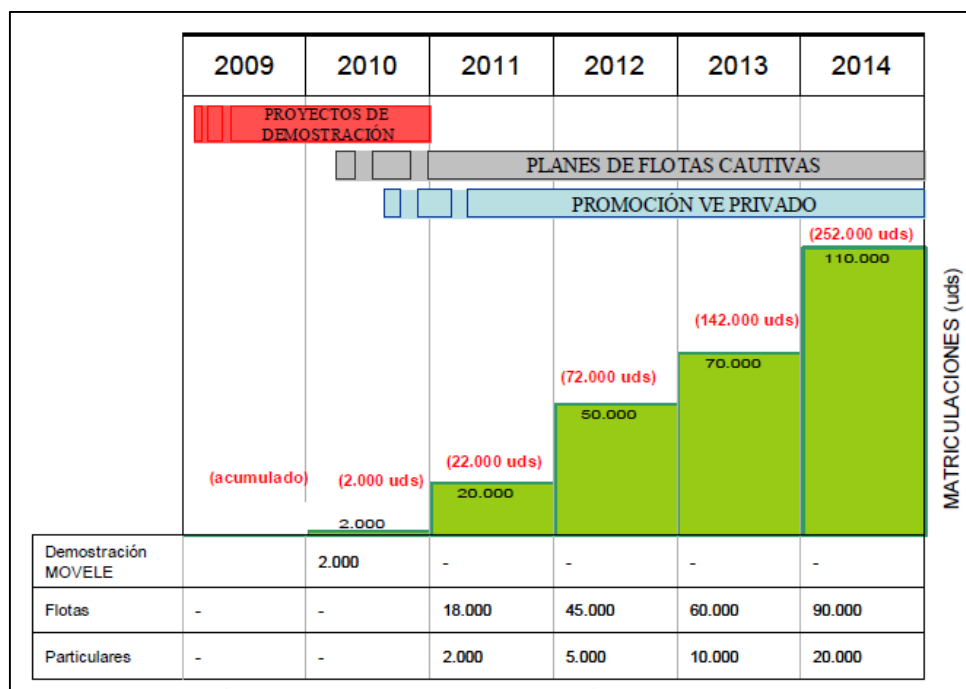


Figura 3. Previsión de matriculaciones de vehículos eléctricos

Dentro del documento nombrado anteriormente se encuentran diferentes planes de acción para conseguir los diferentes objetivos marcados, uno de estos planes de acción sería el proyecto MOVELE, el cual se traduce en una guía para la promoción de estos vehículos en las ciudades.

Dicho proyecto insta a los ayuntamientos a involucrarse en el impulso del vehículo eléctrico, ofreciendo una aproximación de la introducción de estos en entornos urbanos mediante una serie de consejos para implantación de los servicios necesarios para constitución de la infraestructura de recarga.

Por otro lado dentro de la estrategia de impulso del vehículo eléctrico, aparecen las subvenciones al consumidor, siendo la última actualización de la legislación reguladora de las ayudas económicas el Real Decreto 294/2013 [76]. Esta legislación marca la dotación económica aportada por la administración de forma directa al consumidor en función del tipo de vehículo adquirido y la autonomía del mismo, por ejemplo para un turismo con una autonomía mayor a 90km la subvención sería de 5.500€

Estas actuaciones, y otras que no se han nombrado debido a la menor relevancia, pretenden incrementar el número de vehículos eléctricos en el parque automovilístico español hasta los 250.000 vehículos tal y como se muestra la figura 3.



3. OBJETIVO

Tras la revisión realizada en las secciones anteriores, se extraen diferentes conclusiones que sirven de base para el planteamiento de los objetivos de la presente tesis doctoral. En primer lugar queda patente que las administraciones están trabajando en la regulación de la contaminación acústica, mediante un marco legislativo que obligue a controlar los niveles de contaminación acústica en las ciudades a partir de la ejecución de mapas de ruido.

La realización de estos mapas de ruido se lleva a cabo empleando los modelos de predicción de sonora aceptados por la administración correspondiente, e independientemente del método o modelo empleado, los cálculos se basan en la cuantificación y propagación de las fuentes de ruido existentes en la zona bajo estudio. Dichos focos sonoros existentes en los núcleos urbanos pueden proceder de fuentes muy diversas, siendo la fuente de mayor repercusión el tráfico rodado.

El presente trabajo pretende realizar un estudio del vehículo eléctrico como fuente sonora dentro de los modelos de predicción de ruido, evaluando su repercusión como parte del parque automovilístico en las ciudades.

El objetivo general planteado, ha sido determinar si la aplicación de este nuevo modo de propulsión genera una mejora de las condiciones acústicas ambientales debido a las condiciones silenciosas de los motores eléctricos.

Para llegar a dicho objetivo deberán alcanzarse diferentes objetivos parciales:

- Analizar y evaluar las diferentes metodologías empleadas para la obtención del ruido generado por los vehículos a motor.
- Realizar un desarrollo experimental para validar las hipótesis de partida.
- Llevar a cabo un trabajo de documentación y estado del arte sobre los diferentes modelos de predicción de ruido aprobados de forma internacional.
- Implementar el modelo de predicción empleado en España con la aplicación de una nueva variable eléctrica.
- Verificar el modelo implementado mediante ensayos experimentales en vías públicas.

- Simular diferentes condiciones de circulación y evaluar de los resultados al aplicar un caudal de vehículos eléctricos un modelo de predicción sonora.

La presente Tesis Doctoral se enmarca en la línea de investigación en acústica ambiental aplicada a mapas de ruido llevada a cabo por el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Departamento de Mecánica y Energía de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

El diagrama de flujo que sigue el trabajo realizado es el siguiente:

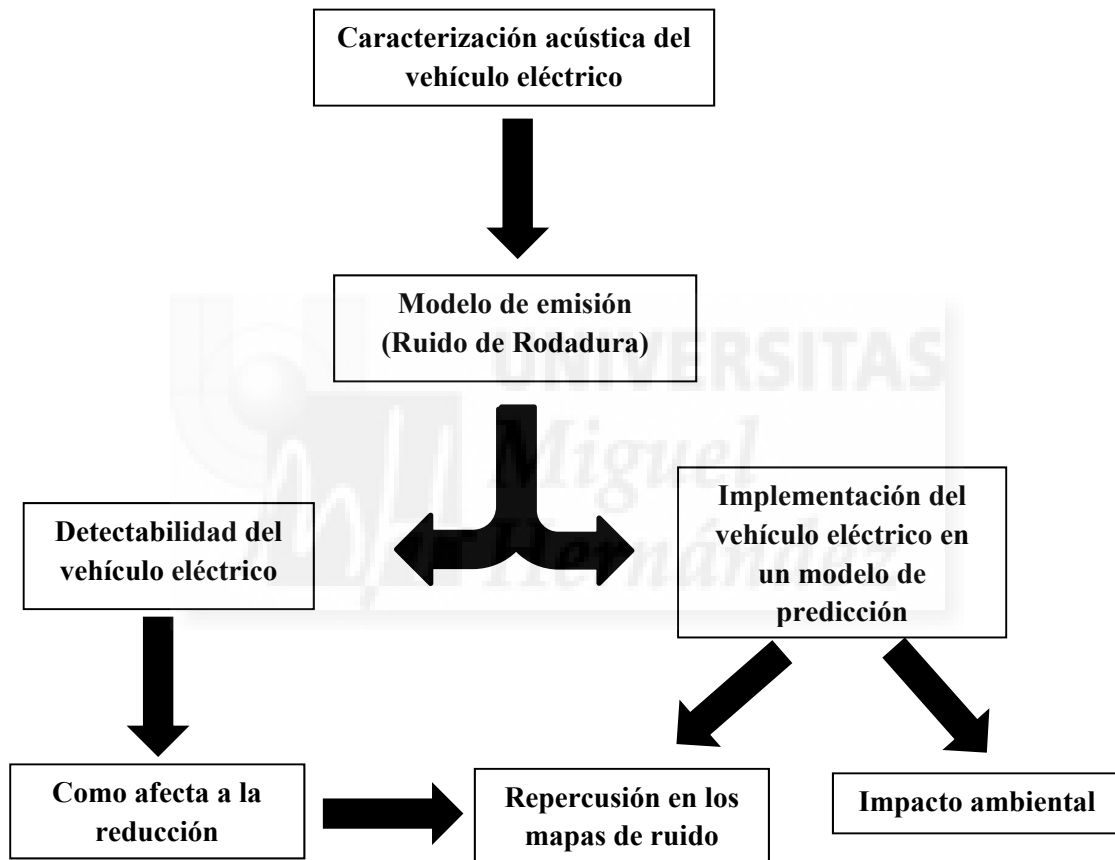


Figura 4. Flujo de trabajo desarrollado

4. CARACTERIZACIÓN SONORA EXPERIMENTAL DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

4.1. Ruido en vehículos

Una vez comentados los principales modelos de predicción de ruido de tráfico actual y su formulación en base a la modelización del tráfico como fuente sonora, es necesario conocer cuáles son los mecanismos de generación de ruido existentes en un vehículo.

Existen numerosos estudios en los que se recogen y analizan las diferentes fuentes de ruido que generan los niveles sonoros totales de un vehículo, siendo uno de los más exhaustivos el expuesto por Paul Nelson en su libro “Transportin Noise Reference Book” [63], donde se expone que el ruido del tráfico rodado se genera principalmente por la superposición de tres fuentes con orígenes bien diferenciados y dependientes de la velocidad: el ruido de mecánico o de propulsión, el ruido de rodadura y el ruido aerodinámico.

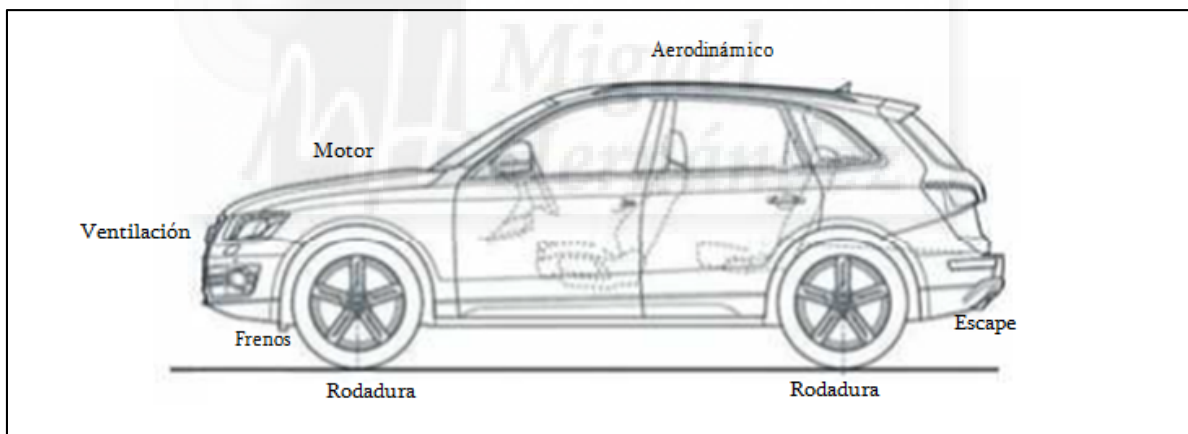


Figura 5. Principales fuentes de ruido de un vehículo

El ruido mecánico, engloba todas aquellas fuentes localizadas en el vehículo que tienen como origen el funcionamiento mecánico de sus componentes, variando la importancia de cada una de ellas en función de las características propias del vehículo (tipo de motor, cilindrada, sistema de ventilación, etc...).

Dentro de los focos considerados como mecánicos se encuentra:

- ❖ El Motor: Es el sistema encargado de proporcionar energía al vehículo, cuenta con dos fuentes principales de ruido: la combustión, esta induce una fuerte vibración derivada de la carga de gas aplicada a la estructura del motor, y el ruido debido a impactos mecánicos(pistones, engranajes, rodamientos, etc.). Las características de los motores condicionan los niveles sonoros producidos, siendo el combustible empleado y su modo de combustión el factor que más alterará sus características sonoras.
- ❖ Sistema de refrigeración: Aunque la mayoría de los vehículos incluyen ventiladores de refrigeración con en el motor controlado por un termostato y por lo tanto operados en función de las demandas de refrigeración, cuando estos ventiladores se ponen en funcionamiento el ruido que producen puede ser una importante fuente sonora del vehículo. Tradicionalmente el ruido generado por el sistema de ventilación tiene dos aspectos característicos diferentes: un ruido de banda ancha causado por los vórtices y turbulencias del aire, y un ruido tonal causado por el giro del ventilador y el paso de las aspas, en el que la frecuencia depende del número, ángulo de las aspas y la velocidad de giro.
- ❖ Escape de Gases: El ruido provocado por este dispositivo se ocasiona por la expulsión repentina de gas del sistema cuando se abre la válvula de escape. El régimen turbulento que se produce a su salida, excita componentes mecánicos produciendo niveles sonoros importantes y localizados [15]. La importancia relativa de esta fuente dependerá de la velocidad de circulación y la capacidad absorbente de la calzada por la que se desplace el vehículo.

Otra subfuente característica del vehículo es la aerodinámica. Esta se origina como resultado de las perturbaciones producidas por las turbulencias, fruto de la interacción del flujo de aire y la estructura del vehículo en su movimiento. La importancia relativa de esta fuente respecto al total del ruido del vehículo ha ido desapareciendo con la mejora en los diseños, materiales y acabados de los vehículos modernos, pasando a ser relevante su estudio únicamente para la optimización del confort acústico en el interior de la cabina de conducción, englobándose en los modelos de predicción dentro del ruido de rodadura en la mayoría de los casos debido a las dificultades técnicas que supone el estudio de esta fuente por separado ante su aportación.

Por último, el ruido de rodadura se genera durante el contacto de los neumáticos rodando sobre la superficie de la carretera, teniendo una influencia considerable sobre los niveles de ruido emitidos, en función de la velocidad de circulación. Diferentes estudios demuestran que a partir de velocidades cercanas a los 35 km/h, el ruido de rodadura empieza a ser predominante sobre el ruido motor [87].

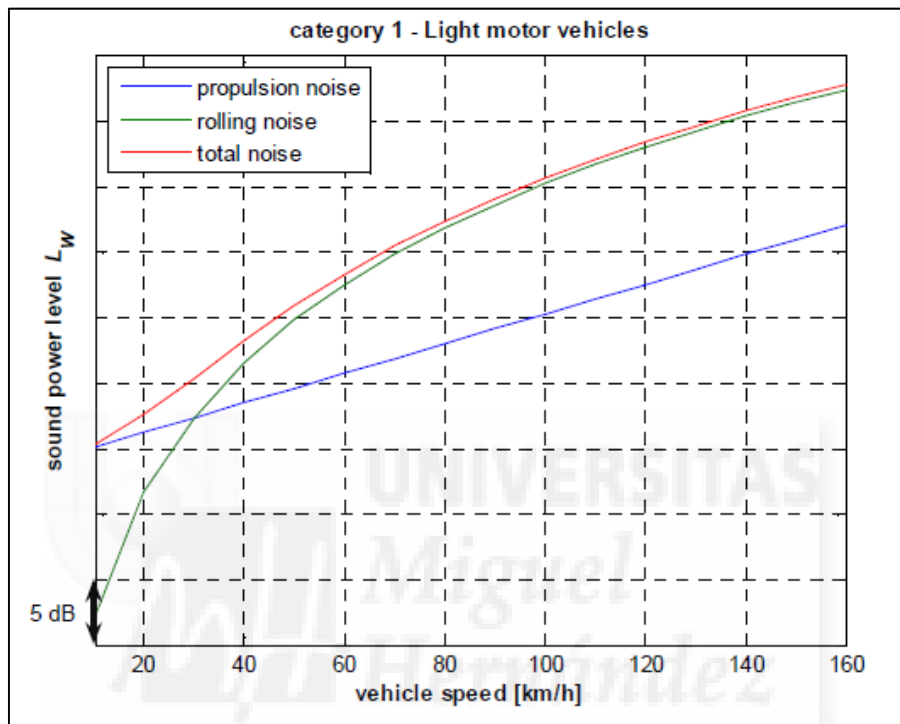


Figura 6. Contribución de las diferentes fuentes sonoras al ruido total de un vehículo [10]

Existe la determinada “velocidad de cruce” para la cual las contribuciones del ruido del sistema motriz y de la rodadura prácticamente se igualan. Al principio de los años 70, cuando surgieron las primeras investigaciones sobre ruido de rodadura, la velocidad de cruce entonces se situaba en el rango de 50-70km/h para automóviles y de 70-90km/h para camiones. No obstante, en la literatura publicada a lo largo de los años 80 y 90, la velocidad de cruce se reducía a 40-50km/h para automóviles y a 60-70km/h para camiones. De todos modos, estos datos implican que el ruido del sistema motriz domina en condiciones de circulación en entornos urbanos, mientras que el ruido de rodadura predomina en las condiciones de tráfico en carreteras y autopistas [84].

Cabe destacar que las labores de mantenimiento sobre los vehículos consiguen mantener los valores generados por las fuentes mecánicas dentro de los límites marcados por los ensayos de homologación de vehículos [24]. Para controlar la degradación sonora de los vehículos, existen textos legislativos que exigen la evaluación sonora en la inspección técnica del mismo [22] [59].

El resultado de aplicar un control del ruido emitido por parte de la administración está siendo estudiado por la Universidad Miguel Hernández en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia a partir de los registros llevados a cabo por las ITV's como organismos de control.

Uno de los resultados de este trabajo es la existencia de una correlación entre los niveles sonoros medidos en un vehículo y la antigüedad del mismo, habiéndose obtenido los modelos de regresión de estas variables para las diferentes categorías de vehículos [67]

Tras esta exposición de los diferentes mecanismos que componen el ruido de un vehículo, ha de mencionarse que cada una de estas fuentes tendrá una importancia relativa dentro de los niveles totales emitidos, dependiendo de las condiciones de circulación siendo la velocidad uno de los factores más relevantes.

4.1.1. Ruido de rodadura

Debido a la inexistencia o baja contribución del ruido generado por el motor eléctrico, el ruido generado la rodadura será la principal fuente sonora, y por ello se profundizará en el estudio de esta tipología de fuente sonora.

En primer lugar resulta necesario definir las distintas partes que componen un neumático:

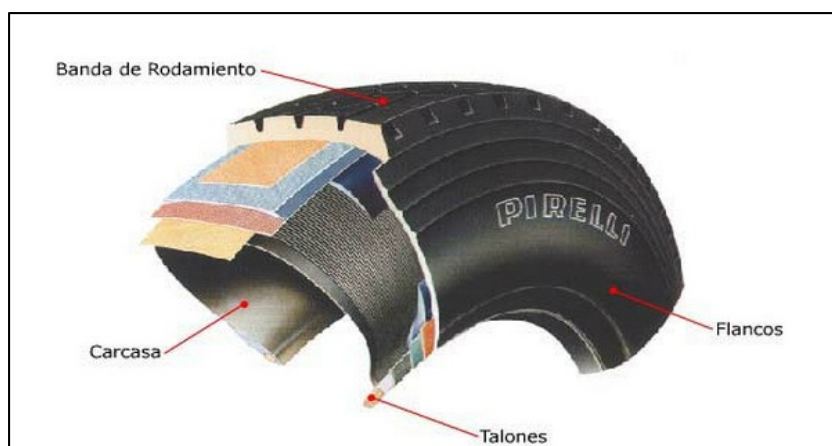


Figura 7. Composición básica de un neumático

- **Banda de Rodamiento o Rodadura:** Es la parte del neumático que se mantiene en contacto directo con el pavimento, esta se compone de una combinación de caucho que ofrece gran resistencia a los esfuerzos y al desgaste. Sus dibujos, formados por partes llenas (tacos) y vacías (surcos) dependiendo de la aplicación, pueden tener características direccionales, de tracción o mixtas destinadas a ofrecer un rendimiento adecuado en servicio, adherencia y seguridad del vehículo.
- **Flancos / Paredes laterales:** Son los costados del neumático, estos protegen la carcasa mediante de capas de material compuesto esencialmente de caucho, favoreciendo las flexiones bajo la acción del peso durante el desplazamiento del vehículo.
- **Talones:** Están formados por hilos de acero de alta resistencia cuyo propósito es mantener el neumático acoplado firmemente a la llanta, evitando movimientos independientes.
- **Carcasa:** Es la parte más resistente del neumático y en función la categoría del neumático, la composición de sus capas es diferente pudiendo ser de poliéster, nailon o acero. Ésta mantiene bajo presión el aire interior del neumático soportado el peso del vehículo, en neumáticos radiales los cinturones están integrados a la carcasa completando su resistencia.

El ruido de rodadura como definición a gran escala, es el resultado de la interacción entre la banda de rodadura de los neumáticos y la superficie de contacto. Los grupos de investigación dedicados a establecer medidas para la evaluación y control del ruido generado por la interacción entre el neumático y la calzada [16] cumplen la complicada tarea de identificar con claridad los mecanismos que aportan una mayor influencia en la generación y emisión del ruido. Estos mecanismos de generación acrecentados por varios fenómenos de amplificación del ruido de rodadura, causan que la energía producida en el contacto se convierta en sonido y se incremente.

4.1.2. Mecanismos de generación de ruido

En el siguiente apartado se expondrán los diferentes mecanismos de generación y amplificación del ruido de rodadura, clasificándose de una forma general en los siguientes 5 grandes grupos:

- Generación de ruido por impacto.
- Generación de ruido por vibraciones.

- Generación de ruido por proceso aerodinámico.
- Generación de ruido por adhesión.

Los impactos y golpes causados por la variación de fuerzas entre la banda de rodadura y la calzada durante el movimiento, generan una respuesta vibracional de la carcasa del neumático que unida a los efectos aerodinámicos entre la banda y la superficie de la carretera causan el ruido generado por la rodadura.

A medida que la huella contacta con la superficie, los impactos son transmitidos por medio del bloque, generando vibraciones y comprimiendo a su vez el aire atrapado entre los surcos del neumático.

Este aire atrapado entre los bloques del neumático se comprime y descomprime con el paso del neumático, provocando lo que se conoce como "air pumping". Este suceso desencadena un efecto de resonancia longitudinal en las ranuras de los neumáticos debido a los cambios de presión de aire, produciéndose un efecto acústico similar al sonido creado por aplaudir.

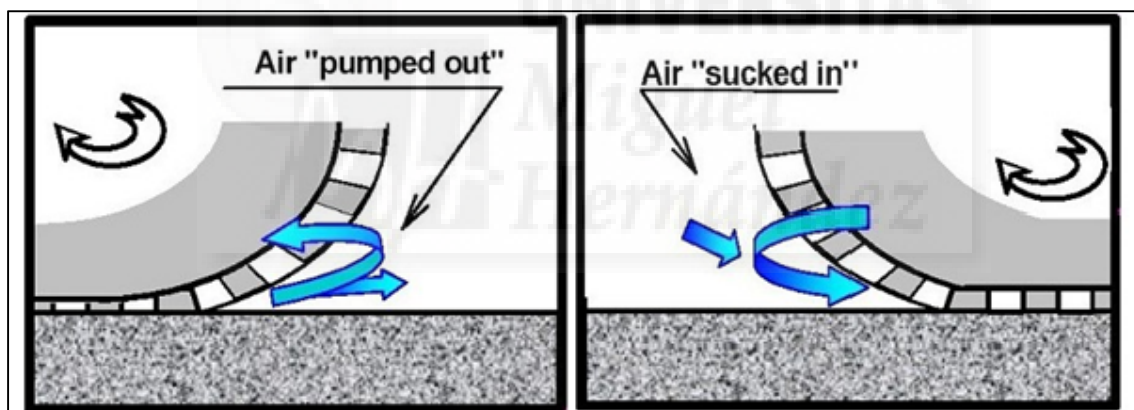


Figura 8. Esquema del proceso de generación de ruido “Air pumping”

A su vez las fuerzas de fricción que actúan en la cara de contacto con la superficie de los bloques causan el efecto "slip-stick", dichos esfuerzos son transferidos desde el neumático al pavimento en los momentos de aceleración o el frenado experimentándose importantes fuerzas laterales en la interfaz neumático/pavimento. En el caso de que estas fuerzas laterales excedan los límites de fricción, el neumático patinará brevemente y se volverá a adherir al pavimento generando tanto ruido como vibraciones.

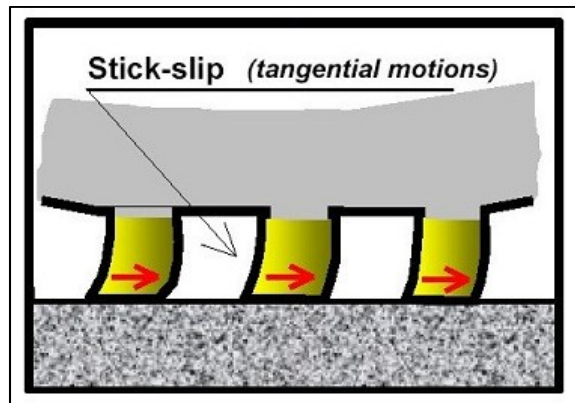


Figura 9. Esquema del proceso de generación de ruido “Stick slip”

A medida que la banda de contacto va separándose de la superficie durante el proceso de rodadura, el aire comprimido en las ranuras es expulsado rápidamente finalizando el proceso del "air pumping" y el bloque del neumático vuelve a su posición de rodadura inicial generando ruido por el efecto "stick snap" por el estado de descompresión y adhesión de superficie de contacto.

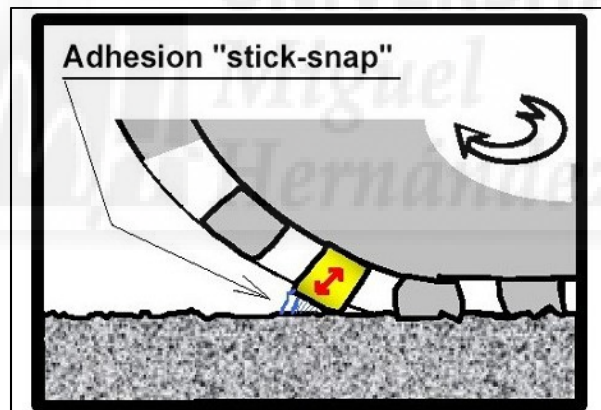


Figura 10. Esquema del proceso de generación de ruido “Stick snap”

En cuanto a las vibraciones del neumático, estas se generan por los impactos y las desviaciones ocurridas como consecuencia de los cambios de contacto con la superficie y como resultado del movimiento de los elementos de la banda de rodadura.

El bloque de la banda de rodadura que entra en contacto con la superficie, impacta y genera vibraciones conducidas radialmente al interior del neumático. Durante este proceso la tensión ejercida en la banda, aumenta y disminuye dependiendo de las fuerzas de rozamiento entre el neumático y la carretera, mientras el bloque pasa a través de la zona de contacto. A medida que el borde de salida del bloque deja la zona de contacto, se libera

una tensión que hace que rápidamente el bloque regrese a su radio sin desviarse, el regreso del bloque a su radio original se conoce como el efecto "snap out", el cuál excita la vibraciones radiales y tangenciales en la estructura del neumático.

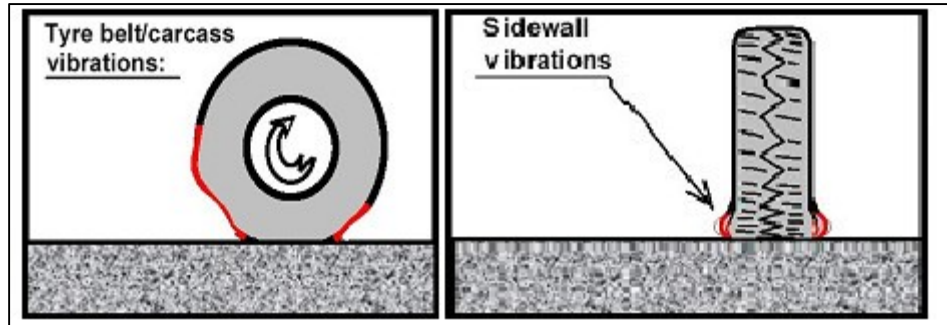


Figura 11. Vibración de la carcasa del neumático provocada por la rodadura [8]

El movimiento del aire en las cavidades de la banda de rodadura, como ya hemos mencionado anteriormente y llamado "air pumping", provoca un efecto adicional llamado "organ pipe" producido por la resonancia del aire atrapado en las ranuras longitudinales en la superficie de contacto. El efecto "organ pipe" generado por los mecanismos aerodinámicos tiende a ser importante en el rango de frecuencias próximo a 1000, siendo ésta la frecuencias característica del ruido de rodadura [85].

Los mecanismos de generación de ruido en la rodadura expuestos, se ven amplificados por varios fenómenos físicos dependiendo de las características de la zona de contacto entre el neumático y el pavimento.

El primero de estos mecanismos sería el Horn Effect o Efecto Bocina, el cual asimila la geometría de un neumático en movimiento a la de un cuerno semejante al empleado en los instrumentos musicales capaces de amplificar el sonido emitido. Debido a esto, cualquier sonido generado por cualquiera de los mecanismos descritos puede ser amplificado si se provoca próximo a la "garganta del cuerno".

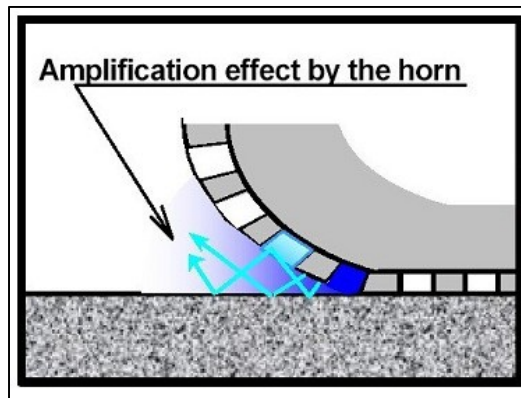


Figura 12. Efecto bocina creado entre el neumático y el pavimento

Por otra parte la banda de rodadura en contacto con el pavimento genera unos pasajes por los que circula el aire, apareciendo fenómenos acústicos que propician la generación de sonido mediante efectos similares a los producidos por los tubos de órgano o los resonadores de Helmholtz

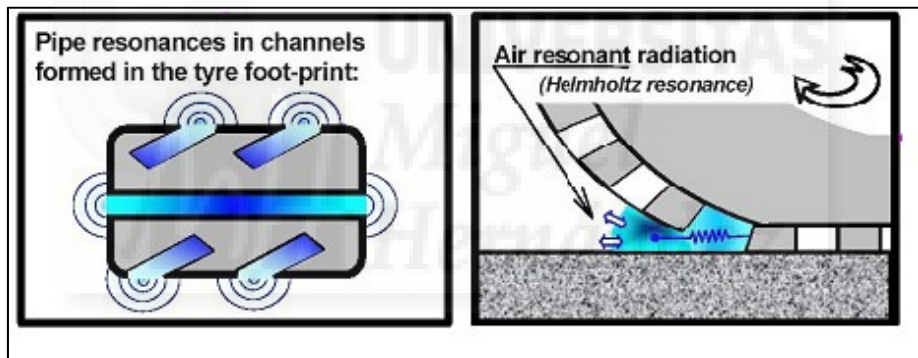


Figura 13. Amplificación del sonido generada por la resonancia de Helmholtz

4.1.3. Métodos de medida

Independientemente de la metodología empleada para desarrollar la parte experimental de este trabajo de investigación, a continuación se van a mostrar diferentes técnicas de medida estandarizadas para cuantificar el ruido generado por vehículos. Estas metodologías pueden clasificarse en dos tipos dependiendo de si el objeto a analizar es el neumático, o por el contrario el pavimento.

Método Statistical Pass-By.

El método Statistical Pass-By (SPB) [41] es un procedimiento empleado para determinar la influencia de la superficie de rodadura, clasificando las diversas superficies de acuerdo con su influencia en el ruido de tráfico.

El SPB está diseñado para eliminar la variabilidad de emisiones de diversos vehículos dentro de cada tipo, aunque estas variaciones afectan a los resultados obtenidos a largo plazo, así como las diferencias regionales en la composición del tráfico. La ventaja que proporciona este método frente a otros, es la medición del ruido a nivel suelo en posiciones cercanas a los receptores finales (casas, edificios...) emplazados a lo largo de las vías de tráfico rodado, de forma que los resultados obtenidos representen de una forma más fiable las condiciones reales del tráfico.

Aunque es ampliamente reconocido que este método es adecuado para la evaluación superficies, presenta un número de desventajas que restringen su uso. Una de estas es la necesidad de hacer medidas en una sección plana y recta situada en un espacio abierto sin objetos reflectantes en sus proximidades, pero en muchos casos no es posible tomar medidas en las proximidades de la calzada, lo cual dificulta la determinación de la mejora acústica al comparar una nueva superficie respecto a la original en un posible cambio de pavimento.



Figura 14. Esquematización del ensayo Statistical Pass-By

Al registrar las mediciones en una localización específica, 7,5m de distancia al centro de la vía y 1,2 metros respecto del suelo, los resultados solamente pueden ser relacionados con secciones cortas de vía. Esto se traduce en que las variaciones en los niveles de ruido de rodadura debido a texturas superficiales no homogéneas, imposibilitan la determinación del ruido de rodadura a lo largo de una carretera usando el Pass-By.

Como variante al método Statistical Pass-By, encontramos el ensayo Controlled Pass-By [64], el cual se emplea en zonas de pruebas específicas donde es posible controlar todas las variables a partir de las especificaciones de diseño establecidas en la ISO 11819-1.

Las características que ha de cumplir una pista para poder reproducirse sobre ella ensayos de ruido mediante este método son muy concretas: ésta debe ser recta y llana asumiendo como mínimo que un 50% del terreno entre el micrófono y la vía de la prueba con características acústicas similares a la superficie que se va a evaluar.

El entorno de esta zona de ensayos debe estar libre de objetos reflectantes, tales como barreras de seguridad o terraplenes en las proximidades de la zona de medición para evitar reflexiones, así como la propia superficie de la vía ha de estar seca y con unas condiciones de temperatura dentro de los rangos especificados en la norma ISO 11819-1 para la superficie de la pista de ensayo.

Método Coast-By.

Como variante del ensayo anterior se encuentra el ensayo denominado Coast-By [43], éste es un método de medida controlado donde los vehículos estudiados se evalúan en las mismas condiciones de la prueba mencionadas anteriormente, Controlled Pass-By, con la salvedad entre estos métodos en la forma de ejecutar el ensayo.

En el en este último método el vehículo se hace circular por la pista comentada anteriormente hasta alcanzar la velocidad deseada y una vez éste se aproxima a la zona de medición, el motor del vehículo se desconecta y se deja circular en punto muerto a lo largo de toda la zona de medición. Con ello, se consigue eliminar el ruido de propulsión estudiando únicamente los mecanismos de generación de ruido provocados por la rodadura y la aerodinámica.

Las pautas marcadas por la normativa plantean unos requisitos generales partiendo desde el propio vehículo hasta llegar al receptor. Empezando por la fuente de ruido en este caso el vehículo, en ambos métodos se deben equipar las llantas con un juego de neumáticos de la misma designación y la misma banda de rodadura.

Las dimensiones de la pista de ensayo como tal, describiendo únicamente la zona de medición, debe tener una longitud de 20 metros de tramo de circulación controlada y un ancho mínimo de 15 metros desde el centro de la calzada colocándose los micrófonos a una distancia de $7,5 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$ de la línea central de la pista y $1,2 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$ respecto al suelo.

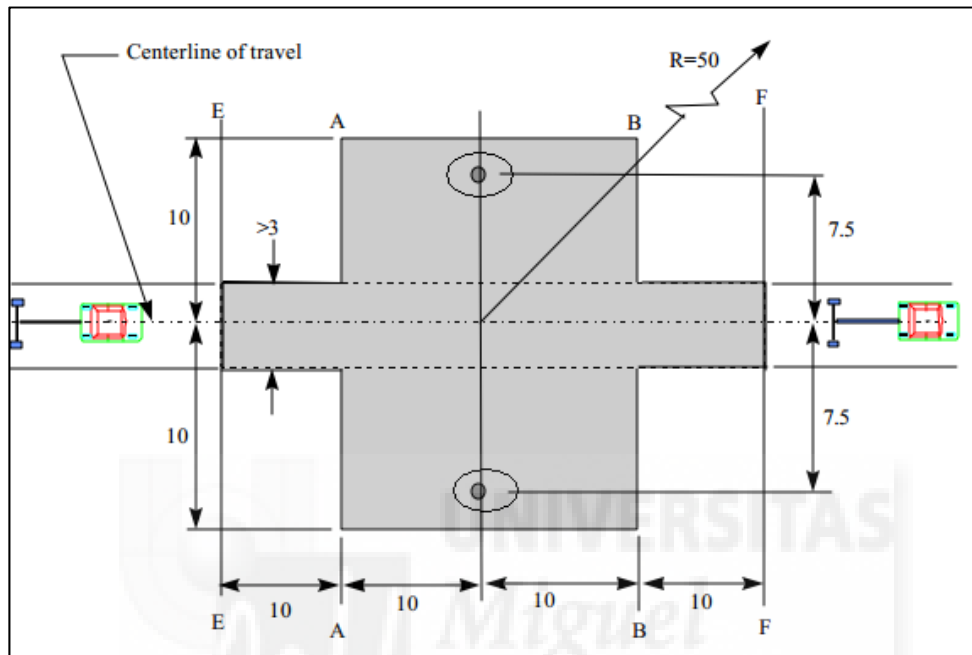


Figura 15. Requerimientos dimensionales para los ensayos Pass-By y Coast-By

Método Drum.

Como método específico para analizar el ruido de rodadura en condiciones de laboratorio desde el punto de vista del neumático se encontraría el Método Drum, el cual se desarrolla según la Norma JASO 1981: “Test procedures for tire noise” [48]. En este procedimiento de medida se hace girar un neumático contra la superficie de un tambor preparado con unas condiciones superficiales controladas simulando la rodadura.

El Método Drum presenta como una de sus ventajas, la posibilidad de simular gran cantidad de alternativas y posibilidades dentro de un mismo entorno de trabajo. Por contra pueden aparecer ruidos ajenos a la rodadura como por ejemplo reflexiones dentro del propio tambor distorsionando los resultados.



Figura 16. Máquina de ensayos de neumáticos empleada en el Método Drum

Método Close-Proximity (CPX).

El método CPX, expuesto en el borrador de norma internacional ISO/DIS 11819-2 [42], establece el procedimiento para la evaluación de superficies de vía con respecto a la influencia del ruido de tráfico rodado. La interpretación de los resultados se aplica a un flujo de tráfico viajando esencialmente en carretera desde la velocidad constante de 50 km/h en adelante, en cuyo caso el ruido de rodadura es predominante.

Este procedimiento puede emplearse para comparar las características acústicas de diferentes superficies de carreteras, dando a las autoridades una herramienta para establecer prácticas comunes o límites en cuanto al uso de pavimentos que cumplan ciertos criterios de ruido.

El CPX es un método rápido, práctico y económico, pero a pesar de ello es un método que se ve limitado puesto que únicamente es relevante en casos en los que el ruido neumático/carretera es predominante, siendo despreciable el ruido de la unidad de potencia y únicamente aplicable vehículos ligeros.

La metodología de ensayo CPX consiste en registrar el nivel de presión sonora emitido por un único neumático desplazándose por una superficie en concreto, a unas velocidades de referencia (50 Km/h, 80 Km/h y 110 Km/h). Para obtener el nivel de presión sonora se deben embarcar en el vehículo al menos dos micrófonos a unas distancias establecidas con respecto al neumático.

A la hora de escoger el lugar donde ejecutar el ensayo CPX se deben tener en cuenta las siguientes condiciones para elegir la zona más oportuna:

- a) Cada tramo de carretera en el que se realice una medición deberá ser de al menos 100 m de longitud, pudiéndose reducir esta distancia en tramos con longitudes entre 20 m y 100 m aumentándose el número de registros hasta completar una distancia de registro de total de 200 m.
- b) La vía debe ser recta, a no ser que la intención del ensayo sea estudiar la curvatura de la misma. Sin embargo, carreteras con curvatura leve (definido como un radio de curvatura mayor de 250 m a 50 Km/h, 500 m a 80 Km/h y 1000 m a 110 Km/H) pueden ser consideradas como llanas.
- c) El tramo de vía empleado para el ensayo debe ser lo suficientemente largo para habilitar la medición con una longitud adicional al principio de unos 10 m.

Este método no admite elementos que reflejen el sonido a lo largo del recorrido del vehículo tales como barandillas, barreras de seguridad o cualquier otro tipo de barrera o terraplén, rocas o vehículos estacionados que se encuentren a una distancia inferior a 2 m de un micrófono de medición.

El vehículo de ensayo puede ser auto-propulsado o un remolque, teniendo en cuenta que en el caso de que el vehículo de ensayo sea auto-propulsado una de las ruedas debe ser tomada como referencia y alrededor de ella se montarán los micrófonos sin que influya el ruido del motor sobre los resultados. La rueda sobre la que se montan los micrófonos nunca podrá formar parte del eje de tracción, así como la distancia entre los micrófonos y los neumáticos que no son tomados como referencia deberán ser de 1,5 m como mínimo.

En cuanto a la posición de los micrófonos para la realización de los ensayos, se deben usar al menos dos micrófonos pudiendo aumentar el número micrófonos de forma opcional. Dichos micrófonos obligatorios deben funcionar simultáneamente teniendo una posición fija con respecto al neumático de $0,2 \pm 0,02$ m metros en horizontal del plano del neumático más cercano y una altura por encima del nivel del pavimento de $0,10 \pm 0,02$ m.

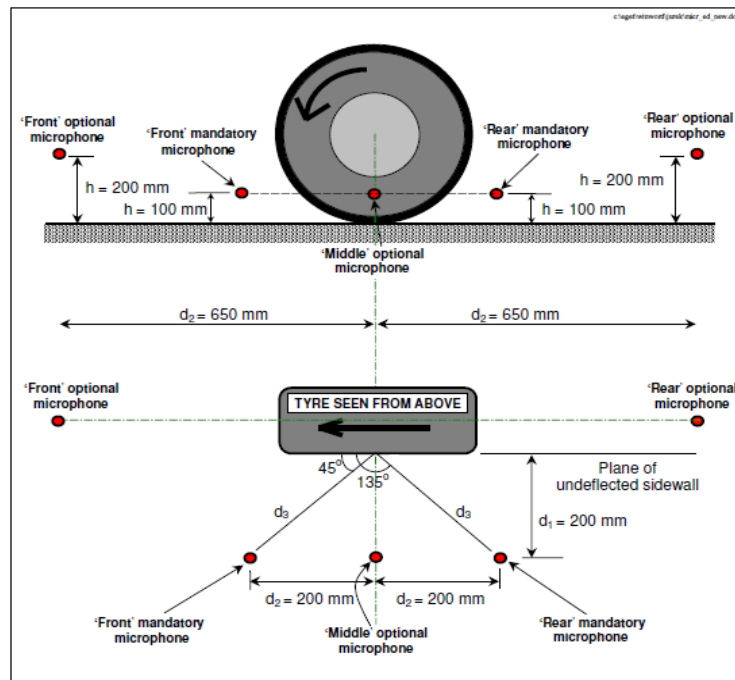


Figura 17. Esquema de posicionamiento de micrófonos según el método CPX

En la figura 17 se representa la ubicación de los micrófonos respecto al neumático en esta metodología, todas estas medidas se refieren al centro del diafragma del micrófono. A menos que se indique lo contrario por el fabricante de los micrófonos, el eje de referencia para las condiciones de campo libre debe apuntar hacia la interfaz neumático/carretera.

Métodos de nueva creación: Alternative Coast-By y Alternative Close-Proximity (CPX).

En este apartado el grupo de trabajo de la Universidad Miguel Hernández de Elche ha desarrollado 2 metodologías de ensayo alternativas para la evaluación del ruido de rodadura a partir de los procedimientos descritos anteriormente, Close-Proximity (CPX) y Coast-By.

La novedad de estos métodos radica en obtener el nivel de potencia sonora de la fuente, considerando la fuente como un sistema en el que el neumático y el pavimento intervienen de forma simultánea.

En primer lugar se mencionará el procedimiento Alternative Coast-By (A-CB) [18]. Esta metodología se ha diseñado para el cálculo del nivel potencia sonora de la rodadura de un vehículo bajo condiciones de funcionamiento Coast-By, compartiendo características con

el método recogido en la Directiva 2001/43/EC [23] así como con el procedimiento descrito en la ISO 3744 [44]. El método se basa en los siguientes supuestos:

- Cada neumático es una fuente sonora puntual omnidireccional desplazándose sobre un plano reflectante.
- La distancia entre los neumáticos y los micrófonos es suficiente para considerar que las medidas se realizan en campo lejano.
- El método considera que la potencia acústica emitida por la fuente es directamente proporcional a la raíz cuadrática media de la presión sonora obtenida a una distancia de la misma, promediada en el tiempo y en el espacio.

La “fusión” de metodologías para la creación de este procedimiento de ensayo, se ha desarrollado sobre una pista de ensayos con las mismas características descritas en el procedimiento Coast-By. El registro de datos se lleva a cabo en base a la nube de puntos de medida descrita en el procedimiento de la ISO 3744 para la cuantificación de la potencia acústica de una fuente.

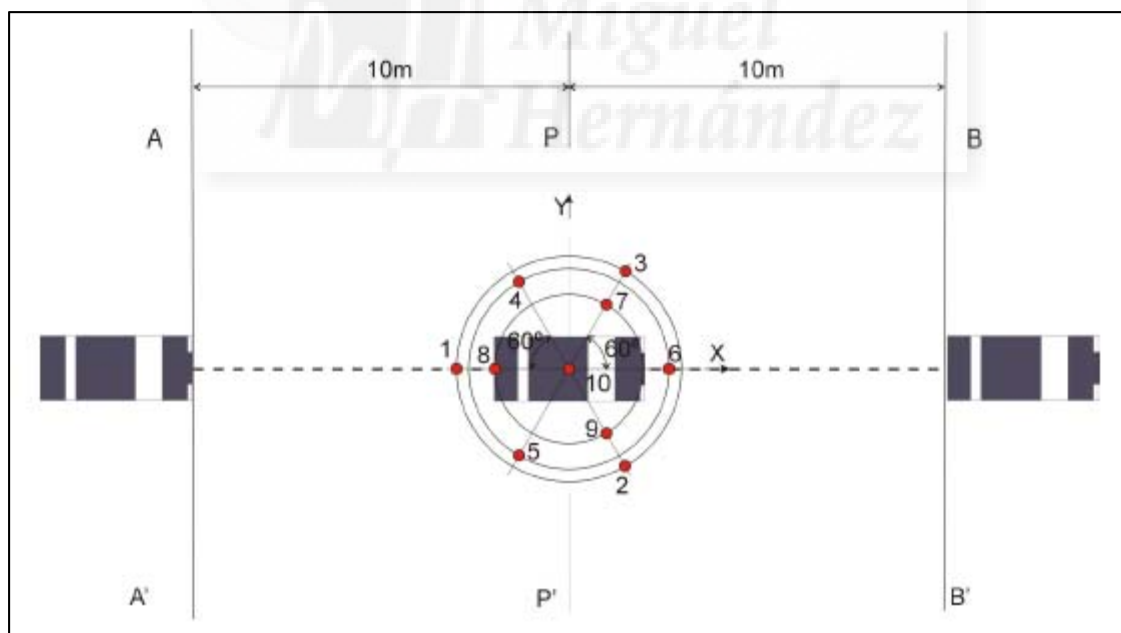


Figura 18. Esquema de posicionamiento de los micrófonos según el método A-CB

La localización de los micrófonos en la nube de puntos utilizada en el ensayo, se distribuye en función del tamaño de la fuente según la ISO 3744. En el caso de estos ensayos la localización de los micrófonos vendrá definida según el tamaño de la región rectangular que engloba el foco de sonoro, los neumáticos.



Figura 19. Región rectangular asumida como foco sonoro.

El tamaño de la semiesfera que engloba las posiciones de los 9 micrófonos necesarios para el ensayo, se define a partir del paralelepípedo de referencia que delimita del volumen total de la fuente mediante la siguiente expresión:

$$d_{0A-CB} = \sqrt{\left(\frac{l_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{l_2}{2}\right)^2 + l_3^2} \quad (17)$$

La otra metodología comentada y desarrollada en base la misma línea de trabajo, evalúa la potencia sonora de un único neumático instalado en un vehículo cuando éste circula a velocidad constante. Este método tiene en común con el anterior que también se basa en la norma ISO 3744, desarrollando el cálculo de la potencia sonora a partir de los niveles de presión sonora registrados. Sin embargo, la principal diferencia con respecto al A-CB radica en que los micrófonos están embarcados en el vehículo.

Respecto al tradicional método CPX, la diferencia reside en medir en unas posiciones más alejadas que las CPX obligatorias. Aun estando en una posición próxima a la fuente de ruido, es posible asumir que las mediciones se realizan en campo acústico lejano.

La hipótesis de partida de la metodología Alternative Close Proximity (A-CPX) considera el neumático como una fuente sonora puntual omnidireccional estática, situada sobre dos planos reflectantes: el pavimento y la carrocería del vehículo.

En este caso la superficie paralelepédica envuelve sólo un neumático, la dimensión característica del paralelepípedo, $d0_A-CPX$, se expresa mediante la ecuación (2.7), obteniendo a partir de este parámetro la posición de los micrófonos para esta metodología.

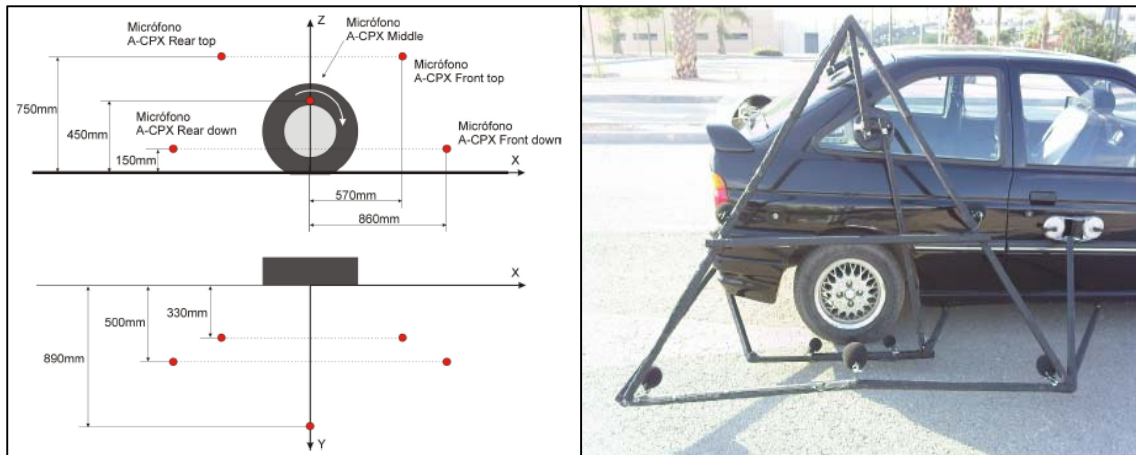


Figura 20. Esquema de posicionamiento de los micrófonos según el método A-CPX

4.2. Objetivo de los ensayos experimentales

El punto de partida de los modelos de predicción de ruido de tráfico es el vehículo de forma individual, por tanto es necesario realizar una caracterización sonora de los vehículos de propulsión eléctrica para iniciar el desarrollo de la inclusión de estos vehículos en cualquiera de los estándares de predicción.

La caracterización sonora del vehículo eléctrico es necesaria debido al cambio de las condiciones sonoras generadas por la aparición de este modo de propulsión. El silencio relativo de los motores eléctricos abre una puerta hacia los vehículos silenciosos, siendo necesaria la caracterización de estos nuevos vehículos con vistas a evaluar la mejora de las condiciones acústicas ambientales aportadas por este modo de propulsión alternativo.

Es evidente pensar que en este caso la mejora reside en la eliminación del ruido motor, pero cabe recordar que el ruido motor deja de ser predominante a partir de los 35km/h, [87] y por tanto en determinadas ocasiones éstos perderan la consideración de “silenciosos”.

Por lo tanto se intuye que si el ruido generado por el motor desaparece, las fuentes de ruido principales del vehículo eléctrico serán: el ruido de rodadura y el ruido aerodinámico.

En este apartado se ha buscado caracterizar un turismo eléctrico por ser el tipo de vehículo eléctrico con más oferta en el mercado, así como el de mayor volumen dentro del caudal de tráfico de una vía cualquiera.

Las mediciones experimentales realizadas para llegar al objetivo planteado, se han basado en las premisas expuestas en la Directiva 2001/43/CE del Parlamento Europeo y del Consejo [23] y la ISO 11819-2 " Método para medir la influencia de las superficies de la carretera en el ruido del tráfico" [42]. Al seguir estos procedimientos se emula el paso de un vehículo por una vía registrando valores a una distancia suficientemente alejada para no registrar reflexiones directas (7,5m), asumiendo a su vez las condiciones de propagación que aparecerían en cualquier mapa sonoro con la salvedad de realizar los ensayos en un entorno controlado.

Una vez estudiados los resultados de las mediciones será posible realizar una caracterización del ruido generado por el vehículo eléctrico, así como plantear la introducción de una nueva variable en los modelos de predicción sonora que cuantifique la aportación de estos vehículos.

4.3. Ensayos e instrumentación

Los ensayos experimentales relacionados en esta tesis doctoral fueron llevados a cabo en las instalaciones de la Universidad Miguel Hernández de Elche, más concretamente en aparcamiento norte de la propia universidad el cual se encuentra alejado de las zonas urbana, siendo por lo tanto una zona apropiada gracias a sus bajos niveles de ruido de fondo.

La pista sobre la que han circulado los vehículos, cumple con los requisitos marcados por la norma ISO 13325 [43], siendo una superficie plana, en todo su recorrido, la cual permite alcanzar las velocidades deseadas en la prueba sin dificultad, dado que su recorrido total es aproximadamente de unos 600 m, que permite diferenciar 3 tramos de pista:

- **1** Zona de aceleración.
- **2** Zona de medición.
- **3** Zona de frenada.



Figura 21. Composición y situación de la pista de ensayo

Las velocidades tomadas en los ensayos, según la normativa deben estar comprendidas dentro del intervalo entre 70 y 90 km/h en el caso de querer ceñirnos estrictamente a la normativa, pero en este caso se ha creído conveniente ampliar el rango de velocidades por debajo de estas debido a que el objetivo no es cuantificar el ruido generado por una superficie o un juego de neumáticos sino buscar un patrón de comportamiento sonoro del vehículo en función de la velocidad como se detallará más adelante.

Como se puede observar en la siguiente figura, los micrófonos fueron situados tal y como plantea la normativa, a 7,5m de la línea central del ensayo y a 1,2m del nivel del suelo.

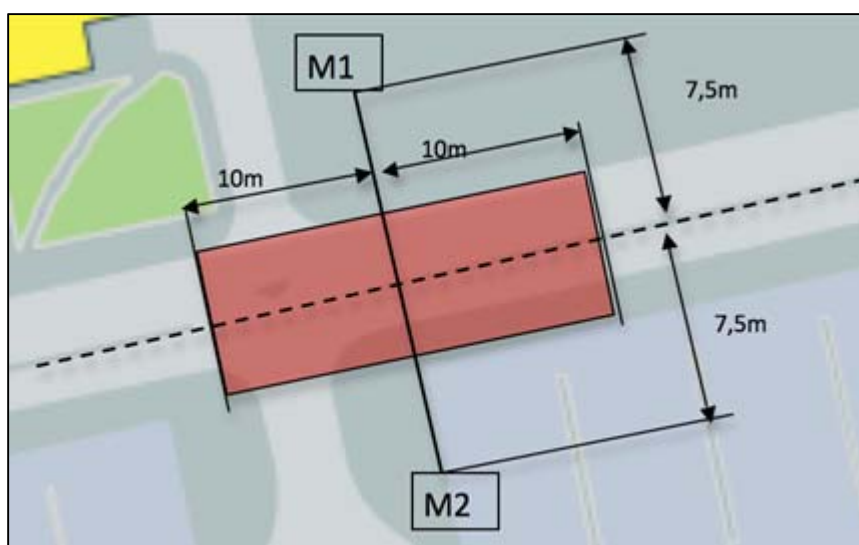


Figura 22. Medidas de la pista de ensayo respecto a los ensayos Coast-By y Pass-By

La pista de ensayos está construida mediante un tipo de asfalto compuesto por una base de 20cm de espesor de zahorra artificial, 20cm de espesor de zahorra artificial y una capa de rodadura formada por dos capas, una de 5cm de G-20 y otra de 4cm de S-20 con árido porfídico, con riegos de imprimación y adherencia.

La caracterización de los parámetros acústicos aportados por la pista de ensayos han sido obtenidos por el Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Universidad Miguel Hernández de Elche, dentro de la línea de investigación relacionada con el estudio de la emisión sonora en la interacción entre neumático y pavimento [17].

Los resultados de dicho estudio proporcionan unos valores de absorción acústica promedio en función de la de frecuencia de 0,16, mientras que por otro lado la profundidad media de la textura (MTD) de 0,65mm, cumpliéndose en ambos casos con los requisitos expuestos en la norma ISO10844:2011 [40] para pavimentos destinados a ensayos acústicos.

En la bibliografía comentada anteriormente se describen los procedimientos para ejecutar los ensayos de ruido Pass-By y Coast-By, siendo estos los métodos de medida utilizados en este trabajo de investigación. Para realizar de una forma conveniente estos ensayos es necesario emplear equipos de precisión, siendo ésta una de las premisas expuesta en la directiva.

Los sensores empleados fueron micrófonos de ¼ pulgada Bruel&Kjaer, modelo 4935, protegidos en todo momento por pantallas antiviento con la finalidad de evitar posibles desviaciones provocados por la meteorología.

Independientemente de las medidas tomadas para la prevención de anómalos por efectos climatológicos, la normativa establece la necesidad de controlar las condiciones atmosféricas para la correcta ejecución de los ensayos. En este punto las condiciones meteorológicas se monitorizaron mediante una estación meteorológica portátil Kestrel 4000.

Así mismo, la temperatura de la superficie de la pista deben encontrarse dentro de un rango comprendido entre 5° y 50° para la correcta ejecución de las mediciones, asumiendo posteriormente las correcciones pertinentes para el procesado los datos. Para esta tarea, se empleó un termómetro de infrarrojos laser con una desviación máxima de 1°C y se

registraron mediciones de temperatura en intervalos de 5 minutos dada la importancia de este factor.

Los micrófonos empleados para las mediciones, fueron conectados a 2 sistemas de adquisición de datos LMS Pimento (LMS International) y por otro lado el sistema IMC Cronos Compact ambos de 16 canales en función de la disponibilidad. Ambos equipos siempre fueron debidamente calibrados al inicio y final de cada jornada de medición mediante un calibrador sonoro del fabricante Bruel&Kjaer, modelo 4231.



Figura 23. Equipos de adquisición de datos IMC Cronos Compact y LMS Pimento

El control de la velocidad del vehículo durante el paso por la zona de ensayos se realizó mediante la instalación de 3 fotocélulas de paso situadas en los puntos -10m, 0m y +10m respecto al centro de la pista, ver figura 24.

Gracias a los registros extraídos del sistema de fotocélulas, fue posible controlar la velocidad del vehículo en los diferentes tramos de los 20 metros de la zona de medición. Con estos datos se comprobó que un vehículo circulando a velocidades por debajo de los 25km/h en la modalidad Coast-By, no pierde la suficiente velocidad, <1km/h, como para repercutir en los niveles sonoros.

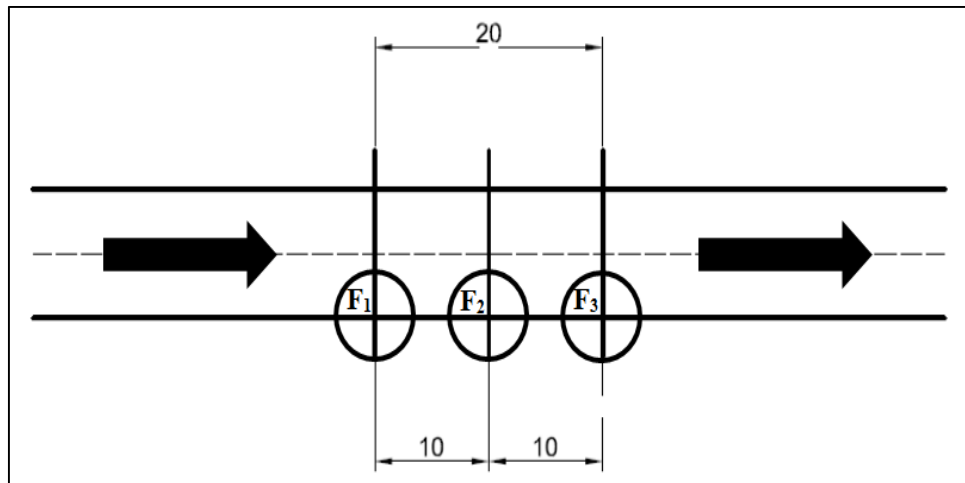


Figura 24. Esquema de localización de las fotocélulas de paso

La configuración de los sistemas de adquisición de datos se planteó de modo que los registros se almacenasen obteniéndose como dato el nivel L_{max} para la integración temporal de 0,125s.

Por otro lado, para evitar posibles problemas relacionados con el “aliasing” en el registro de datos, se ha tenido en consideración el teorema de Muestreo de Nyquist-Shannon, el cual define la frecuencia de muestreo sf como el doble de la frecuencia máxima a registrar.

$$sf \geq 2 \cdot f_{max} \quad (18)$$

sf Es la frecuencia de muestreo configurada.

f_{max} Es la máxima frecuencia de análisis deseada.

Para estos ensayos se ha considerado la frecuencia más alta 4.000Hz, marcando este máximo debido a que las frecuencias de mayor aportación de ruido del espectro generado por el tráfico están comprendidas entre 500 y 2.500Hz.

Al tener una fuente de ruido en movimiento el Efecto Doppler puede provocar desviaciones en los resultados, por ello y con el propósito de evitarlo, se ha desarrollado el análisis de los resultados a partir de los valores en tercio de octava reduciendo así las posibles desviaciones que puedan aparecer [94].

En cuanto a los principales vehículos sobre los que se ha realizado el estudio han sido 2 vehículos, un Renault Fluence ZE y un Honda Insight, evaluándose ambos como vehículos eléctricos.



Figura 25. Vehículos de propulsión eléctrica empleados

Como muestra de vehículos térmicos se han ensayado un total de 8 vehículos, tanto de combustión Diésel como Otto. De los vehículos térmicos se destaca la disposición de un Renault Fluence Diésel para realizar la comparación de los niveles con su variante eléctrica.

El ancho de neumático empleado por estos vehículos varía desde 185mm a 205mm de anchura, sin que ninguno de estos instalase medidas diferentes entre sus ejes y siempre con la misma banda de rodadura en cada juego de neumáticos.



Figura 26. Instantánea de los ensayos realizados sobre un vehículo eléctrico

4.4. Análisis de los ensayos

El análisis de los ensayos experimentales se ha dividido en dos grandes apartados bien diferenciados con la finalidad de comprobar la hipótesis inicial: “El ruido de rodadura es el foco sonoro principal de los vehículos eléctricos”. Con este propósito, se ha realizado en primer lugar el estudio sobre la variación del ruido de rodadura en función del ancho del neumático y diferentes dibujos de banda de rodadura.

Tras este estudio, se ha buscado la comprobación de la hipótesis comentada anteriormente de forma experimental. Dicha comprobación se ha desarrollado mediante mediciones sobre 2 vehículos eléctricos, comparando los resultados con los valores obtenidos para vehículos convencionales circulando bajo las condiciones de la metodología Coast-By.

4.4.1. Estudio del ruido de rodadura

Con la finalidad de establecer la desviación a considerar para el ruido de rodadura ante diferentes dimensiones y dibujo de neumático, se llevó a cabo una campaña de mediciones bajo las condiciones del ensayo Coast-By, sobre un total de 14 juegos de neumáticos instalados sobre una misma carrocería.

Estas mediciones facilitan el intervalo a través del cual poder asumir que el sonido emitido por un vehículo eléctrico principalmente el radiado por la rodadura, dependiendo de las dimensiones del neumático.

Para estos ensayos sobre una misma carrocería con diferentes neumáticos se tuvieron en cuenta las consideraciones tomadas en la ISO 11819-1 en cuanto a velocidad, circulando entre 65-90 kilómetros por hora, ampliando el margen 5 km/h por debajo del marcado en la normativa para obtener valores adicionales sobre la regresión de los mismos.

El análisis de los resultados ha sido desarrollado tanto para bandas de frecuencia en tercios de octava como para niveles sonoros en todo el ancho de banda, estudiando diferentes dimensiones de neumáticos según las correcciones de ancho de rodadura aplicadas en el Imagine Project [65].

$$\Delta L_{wr} = 0.04 \cdot (\text{tyre width} - 187) \quad (19)$$

Del mismo modo que se ha aplicado la corrección anterior, se han considerado las condiciones de la superficie de rodadura para cada ensayo con el fin de aplicar las correcciones correspondientes sobre las mediciones, siendo la alteración más significativa la provocada por la temperatura de la superficie.

$$\Delta L_{wr} = K \cdot (20 - T) \quad (20)$$

Donde el coeficiente **K** se define en función del factor MTD de la superficie variando dentro del margen de 0,03 a 0,12.

Partiendo de estas consideraciones comentadas, los resultados obtenidos que se mostrarán a continuación pertenecen a los ensayos realizados sobre 14 juegos de neumáticos diferentes montados un todo momento sobre una misma carrocería, la de un Peugeot 207 circulando en Coast-By para no obtener desviaciones debidas a diferencias en las emisiones del ruido aerodinámico. Independientemente del tipo de carrocería empleado, ha de destacarse que en estos ensayos han sido utilizados tanto neumáticos renovados como de nueva fabricación con un ancho de rueda variable entre las medidas comerciales 185 mm y 205 mm, siendo estos neumáticos de diferentes características y fabricantes.

R15/185	R15/195	R 16/205
INSA TURBO ECOSAVR 88H	INSA TURBO ECOSAVR 82V	INSA TURBO ECOEVOLUTION 91V
INSA TURBO SPORT 88H	INSA TURBO TVS 82V	INSA TURBO TVS 91V
NEXXEN	NEXEN	NEXEN
MICHELIN	INSA TURBO ECOSAVR 82V	MICHELIN
	MICHELIN	INSA TURBO ECO EVOLUTION 91V

Tabla 2. Neumáticos comerciales evaluados

Iniciando el análisis sobre los resultados de los ensayos basados en la metodología Coast-By a la velocidad de referencia de 80 km/h, los resultados obtenidos para el ruido de rodadura generado sobre la carrocería de un Peugeot 207 son los siguientes:

	NIVELES dB(A)		NIVELES dB(A)
NUEMÁTICO 1	74,30	NUEMÁTICO 8	75,70
NUEMÁTICO 2	73,39	NUEMÁTICO 9	75,37
NUEMÁTICO 3	74,37	NUEMÁTICO 10	74,33
NUEMÁTICO 4	74,28	NUEMÁTICO 11	75,07
NUEMÁTICO 5	74,61	NUEMÁTICO 12	74,34
NUEMÁTICO 6	74,94	NUEMÁTICO 13	75,92
NUEMÁTICO 7	73,98	NUEMÁTICO 14	76,62

Tabla 3. Resultados obtenidos para cada neumático

En este caso, los niveles están comprendidos entre 73,4 y 76,6dB situándose el nivel medio en 75 dB, si se tiene en cuenta que para estos ensayos el error se sitúa en $\pm 1,5$ dB según las consideraciones del NMPB2008 [90] se podría afirmar que los valores medios obtenidos en estos ensayos se encuentran dentro de un rango favorable, desviándose únicamente en uno de los casos por una diferencia de 0,09 dB.

Al observar los valores presentados en la tabla anterior, los niveles de emisión del vehículo eléctrico deberían situarse entre estos valores, pudiendo afirmar que la emisión acústica generada por un vehículo eléctrico únicamente proviene de la rodadura.

Con la intención de ampliar el estudio sobre el ruido de rodadura en función del ancho de rueda, se ha creído conveniente estudiar de forma particular los valores obtenidos en estos ensayos separando por ancho de neumático. Iniciando el análisis con los neumáticos de 185mm de ancho, estos serían los resultados obtenidos:

R15/185	Niveles Leq.	Velocidad	Niveles Leq.	Velocidad
INSA TURBO ECOSAVAR 88H	74,39	73,35	78,16	87,03
INSA TURBO SPORT 88H	73,52	73,34	75,93	85,65
NEXXEN 185	74,26	72,62	75,99	83,51
MICHELIN 185	75,28	74,47	77,44	83,70

Tabla 4. Valores medios obtenidos para los neumáticos de ancho 185mm

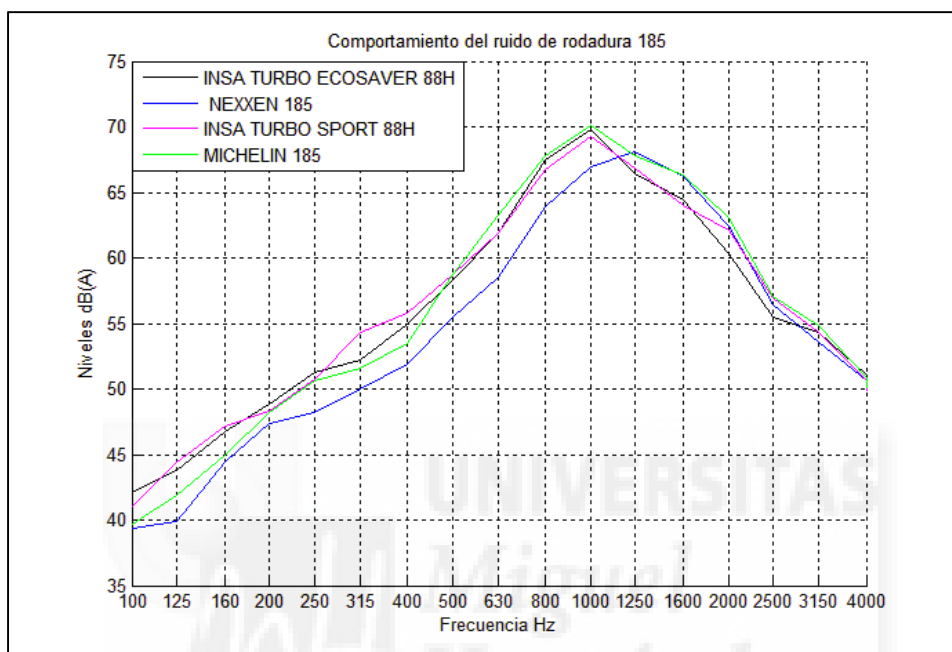


Figura 27. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 185

Al estudiar las curvas que describen el reparto espectral de los diferentes neumáticos, se extrae que la amplitud de la distribución del espectro de frecuencias varía en función de la velocidad e independientemente del neumático, tendiendo el reparto espectral a ser constante variando los niveles.

En el análisis, se debe considerar que la velocidad de circulación varía para los diferentes casos, ya que circular a la misma velocidad en todas las mediciones, es una tarea demasiado complicada. Por ello se ha tomado una velocidad media de las mediciones realizadas para cada juego de neumáticos.

R15/195	Niveles Leq.	Velocidad	Niveles Leq.	Velocidad
INSA TURBO ECOSAVER 82V	72,44	68,74	74,27	77,12
INSA TURBO TVS 82V	71,86	68,97	73,51	76,97
NEXEN 195	72,62	68,24	75,25	78,46
INSA TURBO ECOSAVER 82V	72,29	67,86	74,49	75,32
MICHELIN 195	74,42	68,94	76,07	76,21

Tabla 5. Valores medios obtenidos para los neumáticos de ancho 195mm

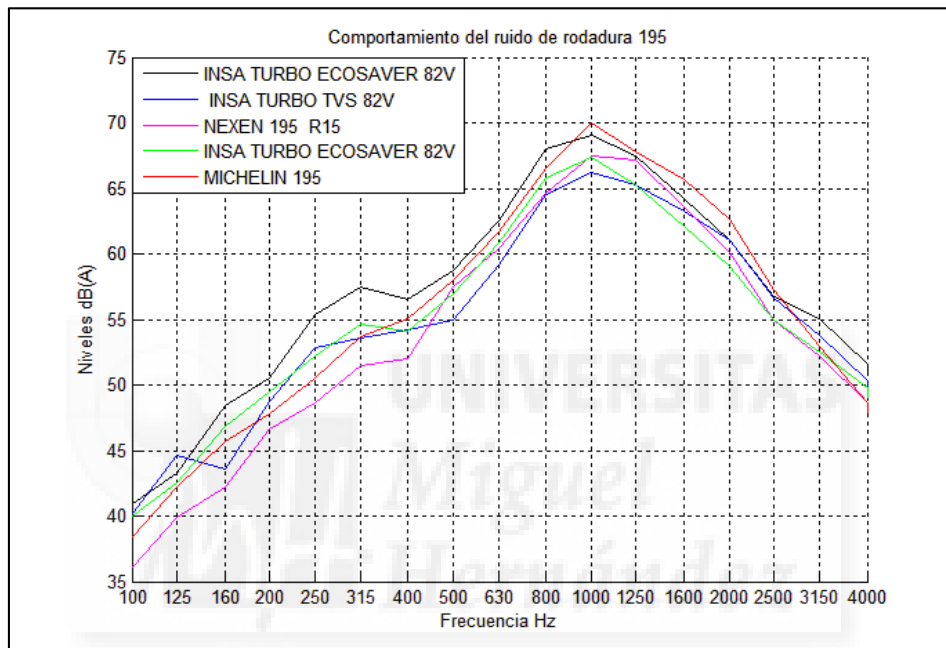


Figura 28. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 195

Siguiendo con el análisis de los neumáticos de mayores dimensiones, se observa que la distribución de los niveles a lo largo del espectro de frecuencia sigue manteniendo los mayores niveles sobre la banda de frecuencia de 1.000Hz, siendo esta la banda característica del ruido provocado por la rodadura [85].

R16/205	Niveles Leq.	Velocidad	Niveles Leq.	Velocidad
INSA TURBO ECOEVOLUTION 91V	72,15	75,17	74,08	83,73
INSA TURBO TVS 91V	73,27	75,63	75,15	85,33
NEXEN 205	73,64	74,27	75,65	84,45
MICHELIN 205	73,39	74,22	76,54	85,11
INSA TURBO ECO EVOLUTION 91V	72,69	73,60	75,36	85,08

Tabla 6. Valores medios obtenidos para los neumáticos de ancho 205mm

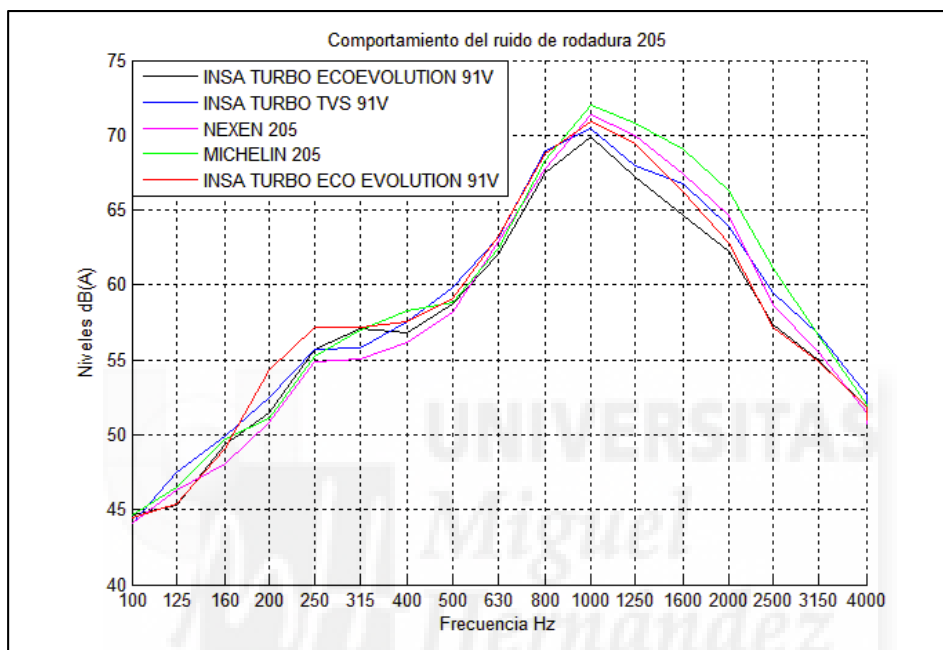


Figura 29. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 205

A medida que se avanza en el estudio de los diferentes anchos de neumático se observa que los niveles en las bandas de frecuencia por debajo de 1.000Hz se igualan en mayor proporción que para bandas de mayor frecuencia donde la diferencia entre ellas es mayor.

Con todo esto, y al estudiar los valores en nivel equivalente, se extraer como primera conclusión que la diferencia máxima entre neumáticos de una misma anchura es de 2,5 dB(A).

El hecho de que los neumáticos más anchos tengan un radio de rueda mayor, no afecta a los resultados una vez aplicada la corrección por ancho de neumático, siendo imposible diferenciar el ancho a partir de los niveles de emisión.

El análisis en conjunto de estos ensayos frente a los niveles máximos obtenidos y la diferencia entre ellos, presenta la máxima diferencia en 4,1 dB, pero este valor se desecha por tener una diferencia entre velocidades de más de 5 km/h en un caso puntual. Tras esto expondremos que la diferencia máxima entre ensayos es de 3,9 dB para los neumáticos estudiados. Para un margen más cerrado de velocidades las máximas diferencias que se encuentran son las siguientes:

Niveles Leq. V>65 Km/h	ΔVelocidad
2,56	0,03
Niveles Leq. V>70 Km/h	ΔVelocidad
3,91	1,04
Niveles Leq. V>80 Km/h	ΔVelocidad
2,46	1,38

Tabla 7. Diferencias de niveles en función de la velocidad

Una vez analizados los resultados de los ensayos de rodadura, pueden extraerse diferentes conclusiones aplicables al estudio de las mediciones realizadas sobre los vehículos eléctricos.

La primera de ellas reside en el margen de operación para sucesivos ensayos experimentales, tras el estudio de los resultados es posible establecer un margen de variación menor a 2dB independientemente de la velocidad a la que se circule durante los ensayos para un mismo ancho de neumático.

Por otro lado y haciendo referencia a la velocidad de referencia de 80 km/h que emplea la normativa, los resultados se ajustan al margen de maniobra aceptado por el modelo de predicción francés NMPB ROUTES 2008. Este modelo asume una desviación frente al ruido de rodadura de ± 1.5 dB a una distancia de 7.5 metros de la fuente.

Con todo lo expuesto anteriormente, es posible asumir la siguiente condición para caracterizar el ruido del vehículo eléctrico: Siempre y cuando el ruido del vehículo eléctrico no supere la desviación de ± 1.5 dB respecto del ruido emitido por un vehículo circulando en la modalidad Coast-By, se asumirá que la rodadura es la única fuente emisora del vehículo eléctrico.

En el caso de cumplirse esta última condición, se considerará válida la aplicación de la rodadura como única fuente de ruido en los vehículos eléctricos para generar una nueva variable a insertar dentro del modelo NMPB ROUTES 2008.

4.4.2. Análisis del vehículo eléctrico como fuente de ruido

Una vez macados los márgenes a los que asumir el ruido del vehículo eléctrico como la rodadura de un vehículo convencional, es necesario analizar los datos obtenidos para comprobar si es posible asumir la hipótesis inicial.

Independientemente de la ausencia de ruido de los motores eléctricos, varios son los estudios en los que se demuestra que a partir de 35 km/h el ruido de rodadura (circulación Coast-By) empieza a predominar sobre el ruido generado por el motor [59]. Por ello se ha decidido estudiar rango de velocidades de circulación comprendido entre 35 y 90 km/h mediante ensayos experimentales.

El margen inferior marcado en 35 km/h podría haber sido rebajado, pero en este caso el ruido de fondo de las inmediaciones de la pista enmascaraba los niveles emitidos por la rodadura a velocidades por debajo de ésta.

Por contra las velocidades por encima de 90 km/h no se han estudiado por motivos de seguridad, ya que en el momento de la desconexión del motor de los vehículos térmicos para circular bajo las condiciones Coast-By estos pierden capacidad de frenado. Independientemente de no alcanzar velocidades de ensayo superiores a 90km/h, es posible afirmar que a velocidades altas las fuentes de ruido predominantes serían la rodadura [65] y la aerodinámica por encima de los 120km/h [87].

La descripción de los resultados obtenidos se ha diferenciado en dos tramos de velocidades, situando el punto de inflexión en 65 km/h. Mientras que con los ensayos realizados por encima de esta velocidad se buscará la similitud acústica del vehículo eléctrico con los ensayos realizados sobre una misma carrocería con diferentes juegos de neumáticos, los ensayos a velocidades por debajo de 65 km/h se usarán para comprobar si a dichas velocidades se sigue manteniendo el comportamiento acústico.

Una vez comentadas las diferentes consideraciones y antes de iniciar el análisis, cabe destacar que para un mismo juego de neumáticos el desgaste relativo influye sobre la emisión sonora aumentando los niveles [87], y aunque no sea un aumento significativo,

debe tenerse en cuenta este factor para la comparación entre diferentes vehículos. El estado de desgaste de los juegos de neumáticos usados para determinar la desviación del ruido generado por la rodadura fue similar, y por tanto no repercutió en el resultado de las mediciones anteriores.

El análisis de los resultados de este trabajo sigue una estructura marcada por la comparación entre casos por separado según la siguiente estructura:

1. Vehículo eléctrico frente a diferentes ensayos en diferentes neumáticos sobre una misma carrocería en condiciones de Coast-By.
2. Vehículo eléctrico frente a térmico de igual carrocería en condiciones de Coast-By.
3. Vehículo térmico en condiciones de Pass-By y Coast-By.
4. Vehículo térmico frente a eléctrico de igual carrocería en condiciones de Pass-By.
5. Vehículo térmico eléctrico frente a diferentes neumáticos en una misma carrocería en condiciones de Coast-By.

En este punto inicial del análisis de la emisión de un vehículo eléctrico en circulación, es necesario puntualizar que la circulación durante la campaña de medición fue sin limitación en cuanto a la desconexión de los sistemas de refrigeración o cualquier otro mecanismo que pudiese generar algún foco sonoro en los vehículos de propulsión eléctrica.

El estudio por frecuencias de los diferentes modelos de neumáticos respecto al vehículo eléctrico, muestra que al aplicar las correcciones por ancho de neumático, 205 mm en este caso, es posible englobar el ruido generado por el vehículo eléctrico dentro de los valores obtenidos sobre los 14 juegos de neumáticos y una misma carrocería.

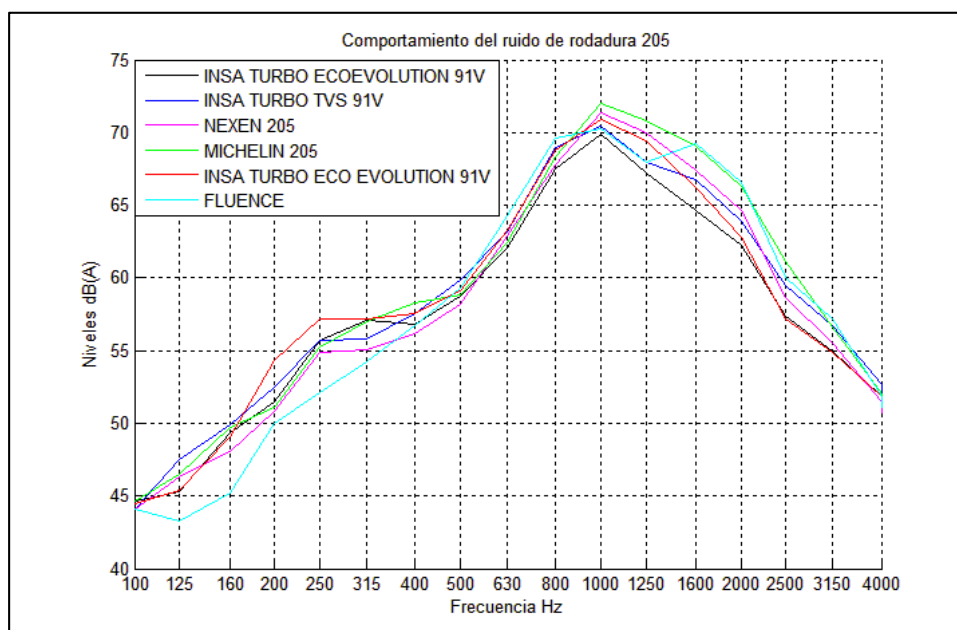


Figura 30. Niveles por frecuencias registrados para neumáticos con un ancho de rueda 205 frente a un vehículo eléctrico

En este caso para el Renault Fluence ZE evaluado dentro de campaña de medidas y buscando la comparación de los resultados sobre el nivel de referencia a 80km/h y los 14 juegos de neumáticos comparados anteriormente, el nivel medio emitido por este vehículo fue de 74,6dB. A priori es posible concluir que el ruido generado por vehículo eléctrico, con los neumáticos que en ese momento se empleaban, proviene únicamente de la rodadura ya que este valor se encuentra dentro del margen marcado por los ensayos realizados sobre los diferentes neumáticos de $74,8 \pm 1,5$ dB.

Paralelamente al resultado expuesto en el párrafo anterior, se ha realizado un análisis de los datos registrados a diferentes velocidades promedio:

Max 65	Fluence	Min 65	Promedio 65	Dif
74,42	73,48	71,86	73,14	0,30
Max 75	Fluence	Min 75	Promedio 75	Dif
76,07	74,92	73,51	74,79	0,13
Max 85	Fluence	Min 85	Promedio 85	Dif
77,44	75,64	74,08	75,76	-0,11

Tabla 8. Comparación de neumáticos por velocidades ante el vehículo eléctrico

Los resultados obtenidos muestran que el comportamiento sonoro del vehículo eléctrico ensayado tiene la tendencia similar a la obtenida para vehículos convencionales ensayados según el método Coast-By.

Como no puede ser de otro modo y para validar esta última afirmación, debe realizarse la comparación entre modos de propulsión para una misma carrocería. Para ello se dispuso en la misma pista de ensayo de dos vehículos en las modalidades térmica y eléctrica con neumáticos similares.

A partir de este punto y con las premisas de los ensayos anteriores, se procedió a la elaboración del estudio comparativo entre ambos modos de propulsión. Las diferencias de emisión entre estos vehículos han sido en el peor de los casos menores a 1 dB entre las velocidades de circulación de 50 a 85 km/h como se puede observar en la figura 31.

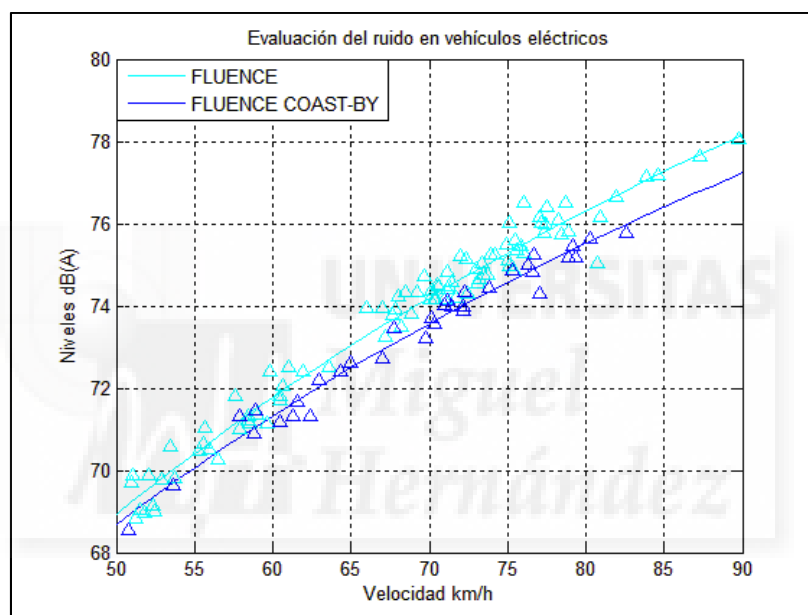


Figura 31. Comportamiento de un vehículo eléctrico frente a térmico circulando en Coast-By

Esta variación podría deberse a diferentes factores, como el mayor peso por parte del vehículo eléctrico. Este incremento de los valores sonoros podría verse afectado por la sobrecarga [87], siendo la diferencia de tara entre estos vehículos de 300kg, los cuales provienen en su mayor proporción del sistema de baterías.

Por otro lado un factor que podría ser influyente en la asimilación de la rodadura al ruido del vehículo eléctrico, es la conexión del sistema de refrigeración del vehículo eléctrico.

Independientemente del arranque de los sistemas de refrigeración, la variación menor a un decibelio es asumible por la propia desviación del método, corroborándose así que la hipótesis inicial de este trabajo permite asumir en próximos apartados que el comportamiento acústico de un vehículo eléctrico se ajusta al patrón del ruido de rodadura.

Una vez identificada la rodadura como la principal fuente de ruido en un vehículo eléctrico, han de compararse los niveles provocados por estos vehículos frente a los mecanismos de generación de ruido de un vehículo convencional de combustión interna.

Buscando de igual modo que en los casos anteriores la comparativa entre casos de forma experimental, se decidió circular con un Fluence térmico Diésel (mismo vehículo que en los casos Coast-By) a un régimen de funcionamiento bajo (entre 1500 y 2000), obteniendo de esta forma el mínimo nivel de ruido que éste generaría en condiciones de circulación a velocidad constante.

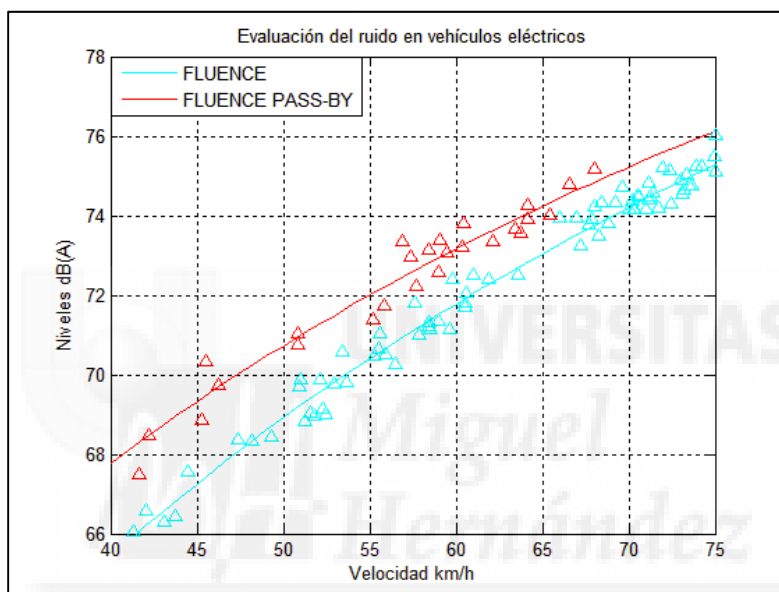


Figura 32. Comportamiento de un vehículo eléctrico frente a térmico circulando en Pass-By

En la comparativa frente al vehículo térmico se decidió reducir el régimen de revoluciones hasta valores mínimos para conseguir una conducción lo más relajada posible, buscando diferenciar la contribución mínima del motor en las velocidades estudiadas anteriormente, sin ser apreciable una gran diferencia a velocidades altas ya que el ruido de rodadura es predominante.

Por otro lado se decidió rebajar las velocidades de circulación del estudio buscando evaluar el comportamiento de estos nuevos vehículos en áreas urbanas donde los límites máximos están establecidos en 50 km/h y la reducción de niveles sonoros debe ser más apreciable.

Iniciando el análisis de los resultados mostrados en la figura 32 a velocidades altas, es apreciable una baja diferencia de niveles a partir de los 65 km/h, donde los resultados perfectamente podrían ser los obtenidos para un vehículo eléctrico circulando con un

neumático de características más ruidosas. En cambio para las velocidades urbanas, <50km/h, las diferencias de niveles son más apreciables, 2 dB de media.

Si comparásemos los resultados obtenidos para este vehículo térmico frente a otro similar circulando de forma constante pero más agresiva, entre 3500-4000 rpm, obtendríamos los siguientes resultados:

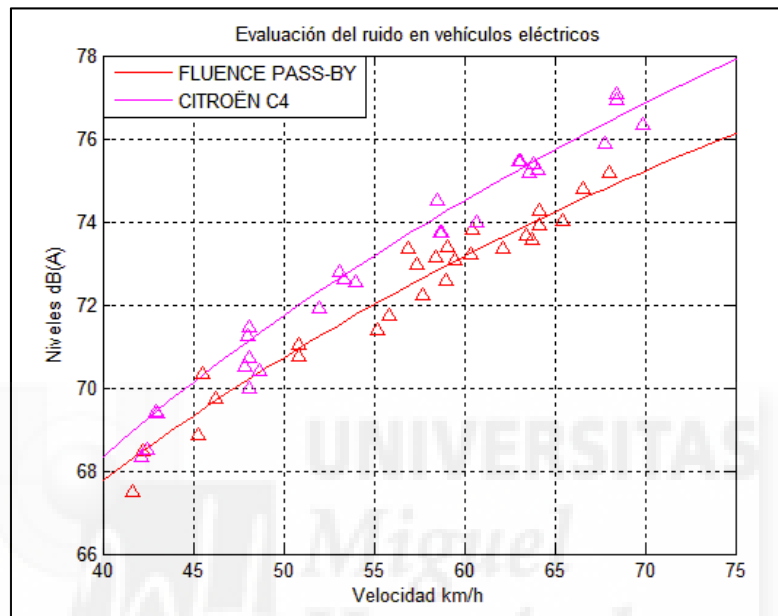


Figura 33. Comportamiento de 2 vehículos térmicos con diferentes modos de conducción

El estilo de conducción es fundamental para observar la repercusión acústica que provocará en el tráfico rodado la aparición de la propulsión eléctrica [13]. Si en el caso anterior se comprobaba la diferencia de niveles frente al vehículo eléctrico se encontrarían unos descensos que podrían llegar a superar los 3 dB en velocidades bajas.

El descenso de ruido a bajas velocidades generado por la propulsión eléctrica puede ser algo beneficioso o perjudicial. Dependiendo del ámbito en que se estudien los niveles sonoros, cabe la posibilidad de no percibir el ruido generado por el vehículo eléctrico en lugares acústicamente saturados, provocándose situaciones donde se comprometa la seguridad del peatón.

En la actualidad y haciendo referencia a temas relacionados con seguridad vial y ruido tráfico rodado, en los vehículos de propulsión eléctrica se pretende implantar el llamado "Ruido Dulce o Ruido Amigo" de cara a prevenir atropellos de peatones o ciclistas. En sucesivos capítulos se profundizará en esta cuestión, ya que los resultados de este trabajo

pueden aportar información interesante para cuantificar el incremento de los niveles del sonido a aplicar para no perjudicar la situación acústica actual.

Como aproximación a los vehículos eléctricos en la actualidad, las primeras sensaciones de “silencio” en vehículos fueron aportadas por las tecnologías híbridas aumentando su presencia dentro del parque automovilístico a medida que pasan los años, incluso formando parte importante en los servicios públicos de taxi donde son vehículos de referencia en el sector.

Teniendo el vehículo híbrido como único referente activo en la circulación diaria de la propulsión eléctrica, se decidió comparar un vehículo plenamente eléctrico frente a un híbrido en su modo eléctrico. Dada la limitación mecánica que presentan estos vehículos debido al apoyo del motor térmico a partir de determinadas condiciones, los ensayos se llevaron a cabo simulando la circulación por una vía urbana bajo las condiciones de los ensayos “Pass-By” del vehículo híbrido a estas velocidades empleando únicamente la propulsión eléctrica.

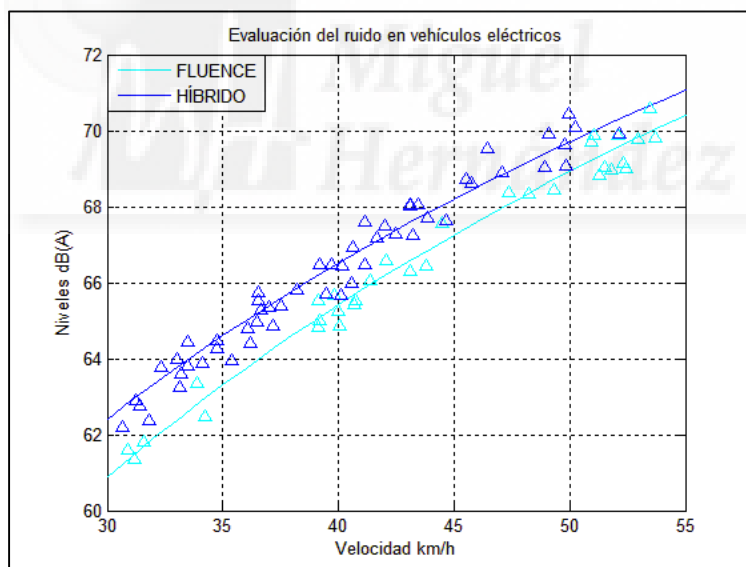


Figura 34. Comportamiento de un vehículo eléctrico frente a un vehículo híbrido circulando en modo eléctrico

En este caso las diferencias son mayores a las encontradas anteriormente entre los vehículos con una misma carrocería, independientemente de esto las diferencias de niveles registrados estarían enmarcadas dentro del rango de valores aceptados para la consideración marcada al principio del análisis de los resultados como ruido de rodadura.

4.4.3. Análisis del vehículo eléctrico frente a modelos de predicción.

Una vez ha sido corroborada la hipótesis sobre la generación de ruido por parte de los vehículos eléctricos, se han comparado los resultados experimentales mostrados anteriormente frente a datos extraídos del modelo de predicción de ruido francés NMPB ROUTES 2008, así como con datos extraídos del Imagine Project [65].

Iniciando el análisis sobre las bases de predicción aportadas por el modelo NMPB ROUTES sobre las superficies más silenciosas según este modelo y comparando los resultados frente a los obtenidos para el vehículo eléctrico, se ha obtenido un ajuste considerable el cual la variación es menor a 1 dB en los puntos más diferenciados.

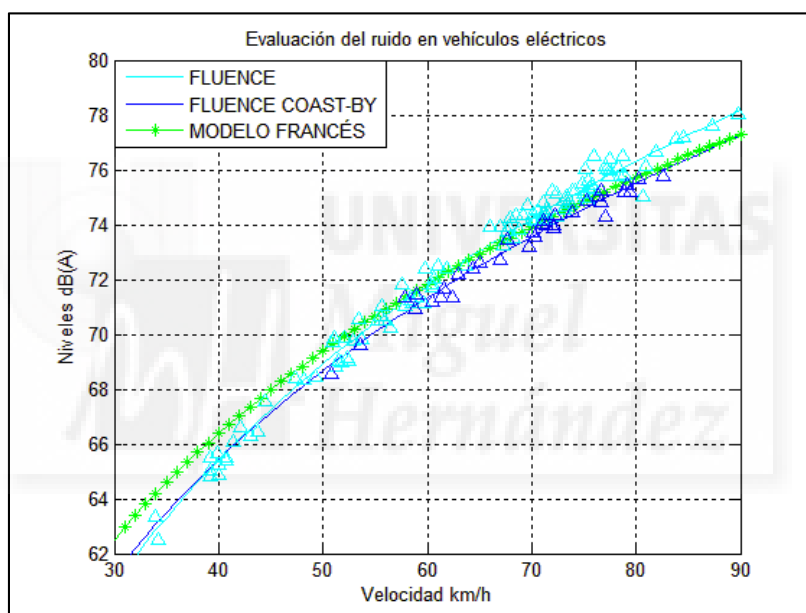


Figura 35. Comparación del comportamiento del vehículo eléctrico frente a los ábacos del modelo NMPB-ROUTES

Viendo el gráfico comparativo es posible afirmar que los niveles alcanzados por los vehículos eléctricos se ajustan a los datos empleados por el Modelo Francés, y por tanto, sería posible utilizar directamente sus ábacos o expresiones para la modelización de estos nuevos vehículos, pero antes de llegar a una conclusión final ha de comprobarse los niveles de forma frecuencial.

Si bien el espectro de frecuencias característico del tráfico rodado del Modelo Francés lo marcan las características del suelo, debe compararse el comportamiento de los ensayos frente a este parámetro, el cual depende del drenaje de la superficie de rodadura por la cual circulan los vehículos diferenciándose dentro del modelo entre “drenante” o “no drenante”.

En nuestro caso la pista de ensayos tiene unas características que podrían denominarse como “No Drenante” ante el ajuste del modelo, con lo cual el espectro característico de una medida cualquiera se asemeja al descrito por el siguiente gráfico según NMPB ROUTES 2008:

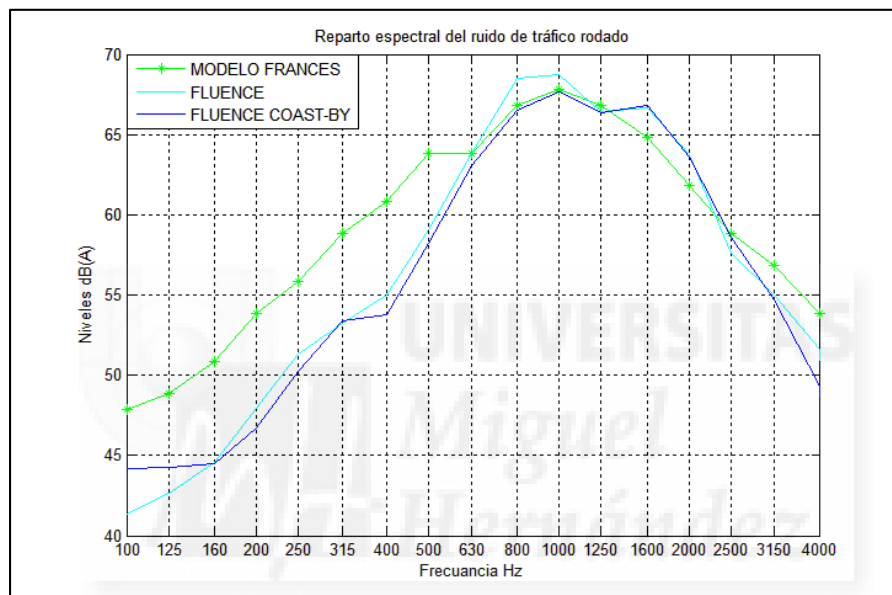


Figura 36. Comparación de espectros entre el modelo de predicción y las medidas experimentales

En el caso de comparar una medida cualquiera frente a este espectro de referencia, se obtiene un ajuste medio 1,2 dB para las frecuencias por encima de 630Hz, destacando en este punto que el modelo NMPB ROUTES considera un ajuste menos efectivo para bajas frecuencias, por debajo de los 500 Hz, debido a la consideración de un caudal del 15 % de vehículos pesados para la definición de este parámetro según el propio modelo [79].

Al estudiar el comportamiento de un vehículo con sus niveles por frecuencias y las variables aplicadas en el modelo de predicción, puede asumirse el uso del modelo fuente aplicado a la rodadura como el modelo para vehículos eléctricos.

Si bien es verdad que aparece un desajuste a frecuencias bajas, se ha comparado este comportamiento respecto a otros estándares con la intención de asegurar que el comportamiento descrito es válido para la inclusión en modelos de predicción.

En este caso se han comparado los valores anteriores frente al espectro de referencia expuesto en la norma UNE-EN 1793-3:1998: “Dispositivos reductores de ruido de tráfico en carreteras; método de ensayo para determinar el comportamiento acústico” [93]. En ella se muestra el espectro de frecuencias empleado para el dimensionamiento de pantallas acústicas a partir de la separación por frecuencias del ruido generado por el tráfico rodado.

Como se puede apreciar en la siguiente figura y tal y como ocurre con el reparto espectral del Modelo Francés, los niveles se ajustan en mayor medida en las bandas centrales ampliándose la desviación en bajas frecuencias debido a la mayor contribución de la rodadura en frecuencias medias y altas.

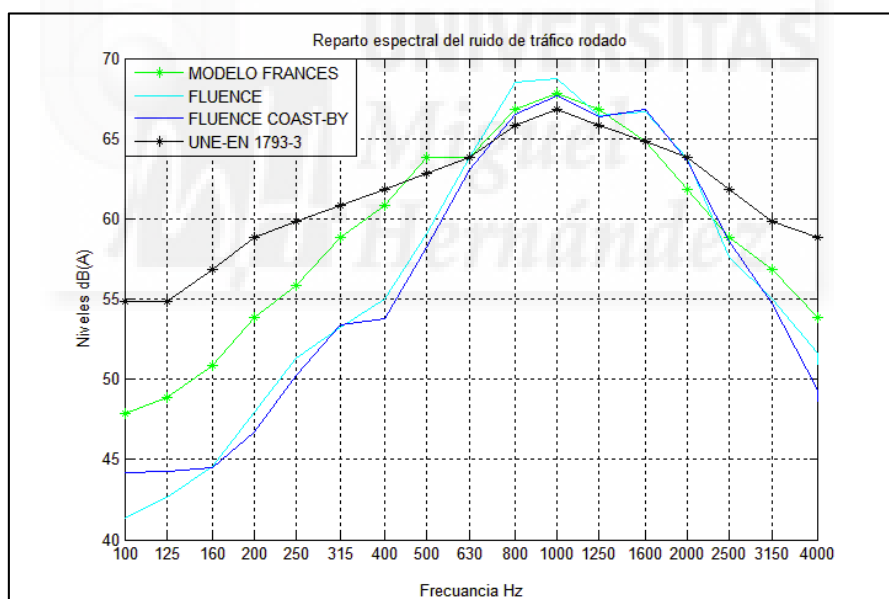


Figura 37. Comparación de espectros entre el modelo de predicción, las medidas experimentales y el reparto espectral establecido por la UNE-EN 1793-3

Con estos resultados y asumiendo el modelo de fuente del NMPB ROUTES como válido para la obtención del ruido del vehículo eléctrico al usar únicamente el ruido generado por la rodadura, es posible generar una nueva variable para la predicción de los niveles de ruido que asuma la aparición de un caudal de vehículos eléctricos dentro de parque automovilístico en este modelo.

Con el objetivo de ampliar el estudio a otros modelos de ruido internacionales, se ha estudiado el modelo desarrollado en el Imagine Project. En este modelo se muestra la emisión de ruido en función de la velocidad del mismo modo que sucede con en el modelo NMPB ROUTES, con la salvedad de que este estándar evalúa los niveles en potencia sonora por frecuencias directamente.

Teniendo en cuenta que este modelo proporciona los niveles en términos de potencia sonora y en el estudio realizado se obtienen los valores en niveles de presión, se han traducido los valores del Imagine Project a niveles de presión sonora a 7,5 metros de distancia tomando una serie de consideraciones que permiten realizar la conversión en función de la distancia de medición.

Generalmente un único vehículo se considera como una fuente puntual omnidireccional, suponiendo la emisión de las ondas esféricas en todo el espacio y por ello la superficie de emisión de la fuente será $S = 4\pi r^2$. Teniendo en cuenta que la presión, la potencia y la distancia r dependen del tiempo, la ecuación de la intensidad sonora I de la que parten los modelos de predicción puramente teóricos queda de la siguiente forma:

$$p^2(t) = \frac{w(t)\rho c}{2\pi r^2} \quad (21)$$

Al pasar a forma logarítmica, obtenemos el siguiente resultado para el nivel de potencia y presión sonoras:

$$L_w = 10 \log \frac{w}{w_0} = 10 \log \frac{p^2 S}{\rho c w_0} \left[\frac{p_0}{p_0} \right]^2 \quad (22)$$

Aplicando las propiedades del logaritmo, se obtendrá la expresión:

$$L_w = 20 \log \frac{P}{P_0} + 10 \log S + 10 \log \frac{P_0^2}{\rho c w_0} \quad (23)$$

Se sustituyen los valores de referencia:

$$P_0 = 2 * 10^{-5} \text{ Pa} \quad \rho = 1.293 \text{ g/l} \quad w_0 = 10^{-12} \text{ W} \quad c = 334 \text{ m/s}$$

De este modo la expresión queda en función del tiempo:

$$L_p(t) = L_{Awi}(t) - 20 \log d(t) - 8 \quad (24)$$

Una vez extrapolados los resultados del Imagine Project se han comparado los niveles de ruido de rodadura frente al vehículo eléctrico para así validar el ajuste de los valores de emisión de la fuente con los aportados por este estándar.

Analizando en primer lugar los valores obtenidos como resultado del análisis de este modelo frente a las mediciones experimentales sobre el vehículo eléctrico, se encuentran las siguientes diferencias:

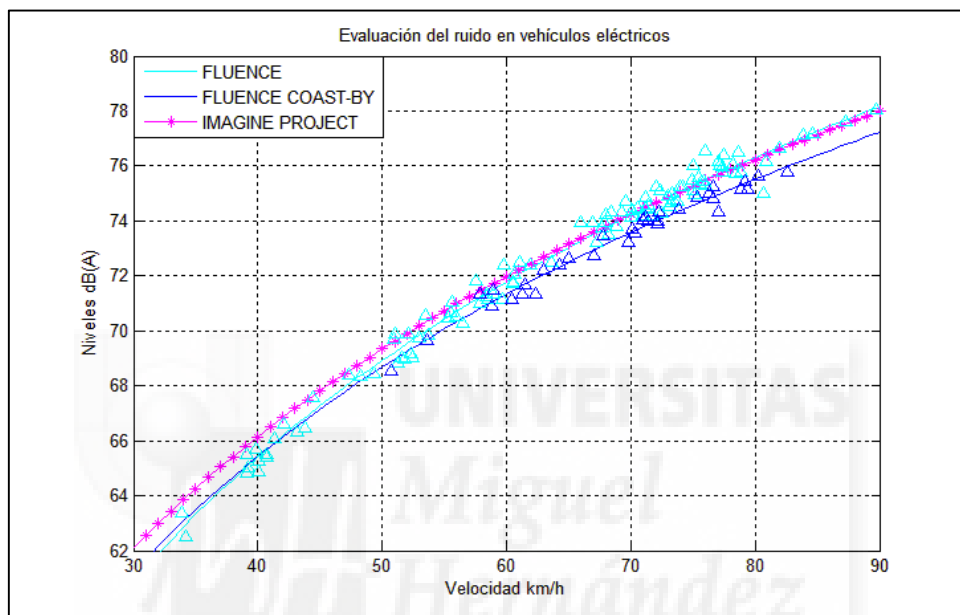


Figura 38. Comparación del comportamiento del vehículo eléctrico frente a los niveles extraídos del Imagine Project

En el gráfico se observa como los niveles para velocidades por encima de los 50 km/h se ajustan en gran medida a los valores del vehículo eléctrico estudiado, así como a los niveles del vehículo térmico circulando en modo Coast-By. En este caso podría aplicarse el modelo fuente propuesto por el Imagine Project como un modelo aplicable a la generación de ruido por vehículos eléctricos de igual forma que se ha aplicado en este trabajo el NMPB-ROUTES en sucesivos apartados.

La razón por la cual se ha decidido dedicar el estudio de la incursión del vehículo eléctrico en los mapas de ruido sobre el Modelo de Predicción Francés, ha sido por la aceptación de su validez dentro del territorio español sin ningún otro motivo preferente. Independientemente del modelo aplicado, los resultados pueden extenderse a cualquier otro estándar siempre y cuando exista una similitud de resultados entre los valores de rodadura de los modelos.

Salvando las diferencias en la obtención matemática de los niveles y de las condiciones de velocidad de referencia en cada uno de los modelos estudiados (70 km/h Imagine Project y 90 km/h para NMPB-ROUTES), los niveles de estos dos estándares son similares en cuanto a niveles equivalentes, pero se encuentran unas pequeñas diferencias en el caso de ser estudiados por frecuencias manteniendo los valores más elevados en la banda de 1000 Hz.

Estas diferencias en la distribución espectral puede deberse a la inclusión de las variaciones generadas por neumáticos especiales como los utilizados en los países nórdicos para zonas de nieve por parte del Imagine Project, los cuales en este caso generarían una distribución de ruido diferente pese a la aplicación de las correcciones correspondientes.

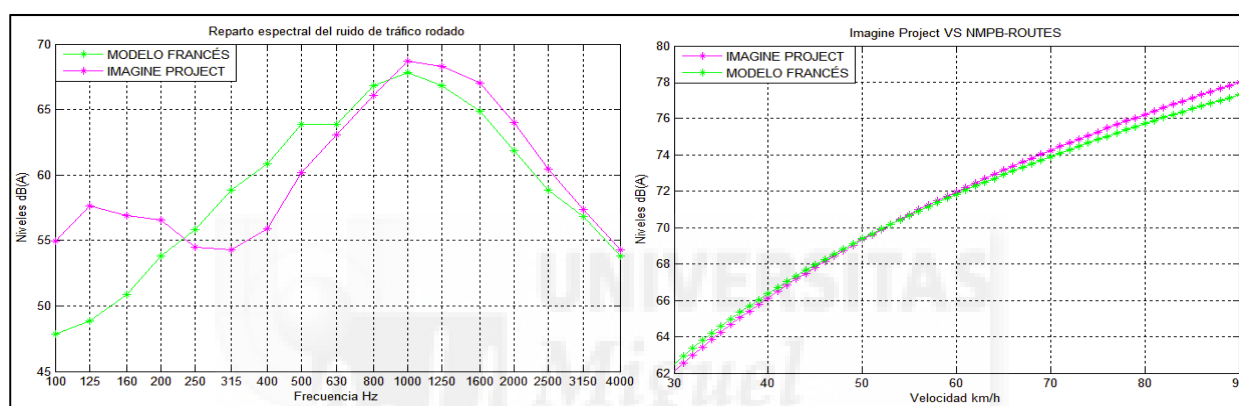


Figura 39. Comparación de espectros entre el modelo de predicción NMPB ROUTES 2008 y los niveles extraídos del Imagine Project

Independientemente de las diferencias mostradas y como conclusión, puede considerarse que en ambos trabajos se aplican niveles similares para la generación de ruido de rodadura y por tanto puede considerarse que para estos dos modelos puede aplicarse el ruido de rodadura como el ruido que generarían los vehículos eléctricos.

4.5. Conclusiones

A lo largo de este apartado se han expuesto los resultados obtenidos en la campaña de mediciones experimentales llevada a cabo dentro de esta tesis doctoral, en la cual se han obtenido diferentes conclusiones.

La primera, y más significativa dentro de este trabajo, es la validación de la hipótesis inicial del trabajo en la cual se considera el comportamiento acústico de un vehículo eléctrico es similar al mostrado por el ruido de rodadura de un vehículo convencional en función de la velocidad de circulación.

Al tener en cuenta la diversidad de materiales y tipología de neumáticos, se han obtenido datos de variabilidad del ruido generado por los neumáticos próximos a $\pm 1,5$ dB(A), coincidiendo esta variación con la considerada por diferentes estándares de predicción de ruido basados en la metodología de ensayo empleada en este trabajo y expuesta en la ISO 11819 " Método para medir la influencia de las superficies de la carretera en el ruido del tráfico" [41].

Los resultados de las mediciones experimentales se han comparado con los datos extraídos de la formulación de 2 modelos estándares de predicción sonora. Mediante el análisis de los resultados se ha demostrado que la asimilación del vehículo eléctrico a la rodadura puede emplearse en cualquier modelo de predicción, siempre y cuando los modelos se basen en el mismo procedimiento de medición para la confección de sus ábacos de emisión.





5. MODELO DE PREDICCIÓN FRANCÉS NMPB-ROUTES

A lo largo del presente capítulo se desarrollarán las bases del modelo implementado para la evaluación teórica de la repercusión acústica del vehículo eléctrico en los mapas de ruido, partiendo del método de predicción de ruido NMPB ROUTES.

El actual Modelo Francés de predicción de ruido de tráfico rodado, Méthode de Prévission du Bruit des ROUTES – NMPB, fue actualizado por última vez en 2008[26]. Este método ha sido desarrollado por diferentes institutos franceses del Ministère de l'Équipement (CSTB, SETRA, LCPC, LRPC) y representa una mejora de la antigua “Guide du Bruit” de 1980 [35].

El Método Oficial Francés de predicción de ruido de tráfico es el escogido para la confección de mapas de ruido por 11 países distintos de Francia que no poseen un modelo propio para la elaboración de mapas de ruido, como es el caso de España, obteniéndose a partir de la norma Francesa en la que se basa el método, la S31-133.2007 “Bruit des infrastructures de transport terrestre, Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques,” [97], se publicó por primera vez en 2001 basándose en el NMPB-ROUTES-1996,

El Modelo Francés proporciona un método predicción de ruido de tráfico para la recepción de niveles a larga distancia, considerando como variables iniciales para el cálculo: la velocidad del tráfico, tanto de vehículos ligeros como de pesado así como sus respectivos caudales en vehículos por hora.

El modelo de propagación empleado dentro del método tiene en cuenta las consideraciones expuestas en la ISO 9613, variando la dispersión del ruido en función de las condiciones ambientales y del terreno en el que se propaga, así como de los obstáculos que el sonido encuentra a su paso entre el emisor y el receptor. La propagación sonora en el medio varía en función de las condiciones atmosféricas pudiéndose clasificar en 2 según su definición:

- A. Condiciones atmosféricas homogéneas: Conjunto de condiciones atmosféricas que producen una atmósfera homogénea desde el punto de vista de la propagación del sonido. En este caso, la energía acústica se propaga en línea recta.

- B. Condiciones atmosféricas favorables: Conjunto de condiciones atmosféricas que producen una disminución de la energía acústica al suelo y conducen a que el receptor reciba un nivel sonoro superior al obtenido en condiciones homogéneas.

Las diferencias de los efectos atmosféricos son apreciables en distancias entre la fuente y el receptor superiores a 100 metros, debido a que en este trabajo las distancias estudiadas serán menores a esta restricción, no se profundizará en la diferenciación entre condiciones.

La variación del nivel de sonido a gran distancia se debe al fenómeno de refracción de las ondas acústicas en la baja atmósfera, donde se genera un fenómeno de refracción de las ondas acústicas especialmente sensible en el plano vertical debido a la variación de la velocidad de sonido en la zona de propagación. Los principales factores que afectan a la velocidad del sonido en función de las condiciones atmosféricas serían los siguientes [45] [6] [7]:

- Factores térmicos: Los cambios térmicos entre el suelo y la capa baja de la atmósfera producen a una variación de la temperatura del aire en función de la altura por encima del suelo provocando una variación de la velocidad del sonido.
- Factores aerodinámicos: Dado el estado de rugosidad de la superficie del suelo, la velocidad del viento es siempre más elevada a una cierta altura del nivel del suelo. En una situación dada, la velocidad del sonido en presencia del viento corresponde a la suma algebraica de la velocidad del sonido en la ausencia de éste y de la proyección de la dirección del vector viento de propagación considerado, esta velocidad varía en función de la altura por encima del suelo.

5.1. Base del modelo implementado

El método de predicción francés está compuesto por 2 submodelos, modelo fuente y modelo de propagación, e independientemente de los submodelos que compongan el conjunto total, éste sigue las siguientes etapas para realizar el cálculo de los niveles de ruido:

- 1) Descomposición de las fuentes de ruido en fuentes puntuales de sonido.
- 2) Determinación del nivel de potencia acústica en cada punto.
- 3) Búsqueda el camino de propagación entre la fuente puntual y el receptor, existiendo diferentes caminos: directo, reflejado y difractado.

4) En cada camino de propagación:

- a. Cálculo de las atenuaciones en condiciones favorables.
- b. Cálculo de las atenuaciones en condiciones homogéneas.
- c. Cálculo el nivel a largo plazo a partir del nivel favorable, del nivel homogéneo y de la aparición de las condiciones favorables.

5) Cálculo de las atenuaciones debidas a las condiciones de contorno del modelo

6) Acumulación del nivel sonoro a largo plazo de cada trayectoria, para poder calcular el nivel sonoro total en un punto receptor.

5.2. Descripción del modelo fuente original

En este apartado se analizan las variables con las que el Modelo Francés cuantifica los niveles sonoros de la fuente de ruido, siendo el punto de partida del modelo. Los niveles de emisión se cuantifican a partir del ruido generado por una fuente lineal (en este caso la vía) a una distancia de referencia de 7,5 m.

El nivel de potencia acústica L_{Awi} en dB(A) de una fuente elemental i dada, se obtendrá a partir de la siguiente expresión:

$$L_{Awi} = 10 * \log_{10} \left((E_{vl} + 10 * \log_{10} Q_{vl}) + (E_{vp} + 10 * \log_{10} Q_{vp}) \right) + 10 * \log_{10} l_i + R(j) \quad (25)$$

Donde:

E_{vl} y E_{vp} Son los niveles de emisión de ruido por hora, diferenciados en vehículos ligeros y pesados, respectivamente.

Q_{vl} y Q_{vp} Son el flujo de vehículos por hora de ligeros y pesados respectivamente.

l_i Es la longitud en metros del segmento de la fuente lineal modelado mediante una fuente puntual i .

$$l_i = \frac{1}{2} (S_{i-1}S_i + S_iS_{i+1}) \quad (26)$$

$R(j)$ Es el valor del espectro de tráfico rodado normalizado a 0 dB con ponderación A.

Este último parámetro, $R(j)$, tiene una especial importancia debido a la actualización sufrida por el modelo en 2008. Éste desglosa los niveles globales equivalentes distribuyéndolos por frecuencia dependiendo del tipo del suelo que constituya la vía, diferenciando entre vías drenantes y vías no drenantes. Cabe destacar de este reparto espectral que no coincide con el espectro normalizado de ruido de tráfico expuesto en UNE-EN 1793-3: “Road traffic noise reduction devices. Test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum” [93].

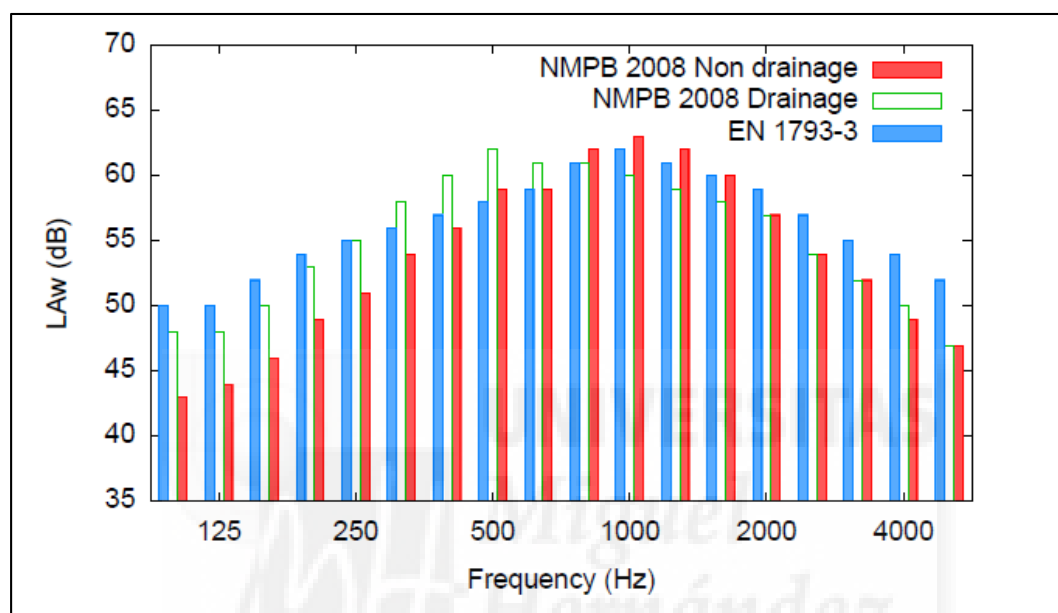


Figura 40. Comparación de los diferentes espectros de tráfico rodado considerados por el NMPB-ROUTES 2008

Una vez expuesta la expresión general de modelo fuente y tras aclarar este primer factor referente a las condiciones de la superficie de la vía, se pasará a centrar la atención en los valores de emisión. Estos son cuantificados según la Guide du Bruit para dos tipos de vehículos, en diferentes tipos de circulación y en función de la pendiente de la carretera, siendo la diferenciación por tipo de vehículo la siguiente:

- Ligeros: Vehículos con un tonelaje por debajo de 3,5 toneladas a plena carga, en el que se englobarían pequeños vehículos industriales tales como furgones y camiones de pequeño tonelaje.
- Pesados: Vehículos con un tonelaje por encima de 3,5 toneladas a plena carga.

En cuanto a la diversificación en función del tipo de circulación, ésta se basa en la aceleración u orden de marcha en el momento de la medición:

- Fluida o continua: el número de vehículos es constante en el tiempo y espacio, sin aceleraciones durante la circulación.
- Acelerada: los vehículos se encuentran acelerando durante la circulación.
- Desacelerada: los vehículos se encuentran decelerando durante la circulación.

Del mismo modo, la pendiente de la vía es un parámetro a contemplar ya que genera una mayor demanda de potencia en los vehículos durante las subidas, y por consiguiente un aumento del ruido motor:

- Horizontal: rampa con inclinación inferior al 2%.
- Ascendente: rampa con inclinación superior al 2% en dirección ascendente.
- Descendente: rampa con inclinación superior al 2% en dirección descendente.

Antes de definir los niveles de emisión del modelo se va a determinar la última variable de la expresión anterior, el parámetro l_i , que se define como la longitud en metros de la porción de línea de fuente representada por la fuente puntual i .

La porción de línea de fuente en la que se divide una vía para el dimensionado del foco de emisión tiene unas limitaciones de espacio, esta longitud de esta nunca deberá superar los 20 metros ni ser menor a la mitad de la distancia de recepción.

En una primera aproximación del valor mínimo de l_i se ha creído conveniente definir este valor como 3,75m, por ser la mitad longitud de la distancia de medición de la metodología Pass-By a partir de la que se caracterizan los niveles de emisión de ruido de tráfico en el modelo.

Por otro lado y con la intención de contrastar la validez del margen inferior inicial marcado, se ha hecho referencia al Decreto 104/2006, de 14 de julio del Consell, de Planificación y Gestión en materia de Contaminación Acústica [74], en él se marcan las pautas para realizar mediciones de ruido ambiental. Dicho decreto limita la distancia mínima de medición en 10m, por tanto el l_i mínimo que debe tenerse en cuenta es de 5m para ajustar la limitación del modelo. Por lo tanto el rango de l_i será $5m < l_i < 20m$.

5.2.1. Valores de emisión sonora en vehículos

Tal y como se ha mostrado en el apartado anterior, el modelo necesita tener como variable de entrada los niveles de ruido generados por hora para un caudal de vehículos. El ruido emitido por la fuente se plantea mediante ecuaciones formuladas en base a mediciones sobre vehículos usando la metodología expuestas en la ISO 11819-1, evaluando el nivel de emisión de sonora L_{max} .

Desglosando el estudio de las fuentes empleadas por el modelo e iniciando el análisis por el ruido de rodadura, éste dependerá de la velocidad, pero a su vez variará en función del tipo de superficie por la que se circule el vehículo. Dicha diferenciación del tipo de superficie se clasifica en la Guide du Bruit [70] en función de su composición:

- a) Categoría **R1** bajo ruido (asfalto, en concreto de 0/6 y 0/10, siendo asfalto poroso 0/10),
- b) Categoría **R2** ruido intermedio (mezcla fría, asfalto denso 0/10)
- c) Categoría **R3** alto ruido (hormigón de cemento, tratamiento superficial 6/10 y 10/14, y asfalto concreto 0/14).

Los valores de $L_{rodadura}$ expuestos en la Guide du Bruit se muestran en las tablas 9 y 10, para las diferentes categorías de suelo a una distancia a la fuente de 7,5 m en base a los ensayos normalizados los ensayos Coast-By.

	LV	HGV
R1	$49.4+21\log(v/90)$	$59.1+20\log(v/80)$
R2	$53.4+20.1\log(v/90)$	$62.1+20\log(v/80)$
R3	$55.9+21.4\log(v/90)$	$63.1+20\log(v/80)$

Tabla 9. Valores de $L_{rodadura}$ en función de la superficie de rodadura. [79]

Los valores extraídos de las expresiones de la tabla anterior deben ser corregidos dependiendo de la antigüedad de la carretera estudiada aumentando los valores de las vías a partir de los 2 años de su pavimentación. En la tabla 10 se muestran los valores que tomara dicha corrección manteniéndose a partir de los 10 años antigüedad:

	LV	HGV
R1	0.5(a-2)	0.3(a-2)
R2	0.25(a-2)	0.15(a-2)
R3	0.2(a-2)	0.12(a-2)

Tabla 10. Corrección del $L_{rodadura}$ dependiendo de la antigüedad de la superficie

Para la otra fuente principal de ruido de un vehículo, el ruido motor L_{motor} , los niveles se extraen mediante las expresiones mostradas en las tablas 11, 12 y 13 en función de la velocidad de circulación y las condiciones de aceleración:

V-km/h	20 a 30	30 a 110	110 a 130
L_{motor}	$36.7-10\log(v/90)$	$42.4+2\log(v/90)$	$40.7+21.3\log(v/90)$

Tabla 11. Valores de L_{motor} para un vehículo a velocidad constante

V-km/h	5 a 20	20 a 100	100 a 130
L_{motor}	51.3	$46.1-10\log(v/90)$	$44.3+28.6\log(v/90)$

Tabla 12. Valores L_{motor} para un vehículo acelerado

V-km/h	5 a 10	10 a 25	25 a 80	80 a 110	110 a 130
L_{motor}	$31.6-10\log(v/90)$	$49.4+8.7\log(v/90)$	$42.1-4.5\log(v/90)$	$42.4+2\log(v/90)$	$40.7+21.3\log(v/90)$

Tabla 13. Valores L_{motor} para un vehículo desacelerado

Una vez obtenidos los valores diferenciados por su procedencia, se puede alcanzar el nivel de emisión L_{max} mediante la suma logarítmica de los niveles de las fuentes:

$$L_{Amax} = 10 * \log(10^{(0.1*L_{rodadura})} + 10^{(0.1*L_{motor})}) \quad (27)$$

Los valores de emisión descritos en las expresiones anteriores, se corresponden a los valores de referencia del modelo fuente asociado al Modelo Francés en niveles de presión sonora instantánea a una distancia de 7.5 metros. Llegado a este punto, el modelo necesita obtener como variable de inicial los valores de potencia sonora de los vehículos por hora, por tanto debe llegarse a los valores de emisión en potencia.

Para ello el primer paso para conseguir los niveles de entrada en potencia por hora será obtener los niveles de potencia acústica a partir de la presión, para esto se tendrán en cuenta las mismas condiciones empleadas en el anterior apartado 4.4.3 para el paso de los niveles de presión a potencia mediante la ecuación 24.

A partir de esta expresión y de las distancias de referencia del ensayo Pass-By, se obtiene la expresión con la que obtener el nivel de potencia a partir de los niveles de presión para un único vehículo circulando frente al receptor.

$$L_w = L_p + 25.6 \quad (28)$$

Tras la obtención del nivel de potencia máximo para un vehículo circulando por una vía, debe realizarse la transposición media del ruido que generará éste en 1 hora por metro lineal. El modelo considera la potencia por metro lineal como:

$$L_{w/m} = W \frac{Q}{1000V} \quad (29)$$

Siendo el nivel de presión sonora por metro, $L_{w/m}$, el descrito según:

$$L_{w/m} = L_w + 10 \log(Q) - 10 \log(V) - 30 \quad (30)$$

Si aplicamos esta última ecuación al paso de un solo vehículo se obtienen los niveles generados por vehículo hora:

$$E_V = L_w - 10 \log(V) - 30 \quad (31)$$

Llegado a este punto, ya estaría completada la expresión mediante la cual se aplican las variables de entrada al modelo fuente para poder abarcar la calificación de vías mediante el Modelo Francés.

$$L_{Awi} = 10 * \log_{10} \left((E_{vl} + (10 * \log_{10} Q_{vl})) + (E_{vp} + (10 * \log_{10} Q_{vp})) \right) + 10 * \log_{10} l_i + R(j) \quad (32)$$

5.3. Descripción del modelo de propagación

Una vez expuesto el modelo fuente, deben estudiarse las consideraciones a tener en cuenta para cuantificar la atenuación acústica debida a la propagación. Para una fuente de ruido S de potencia L_{Awi} , el nivel de ruido continuo equivalente en un punto de recepción R en determinadas condiciones atmosféricas se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$L_{Ai} = L_{Awi} - A_i \quad (33)$$

Donde:

L_{Awi} Es el nivel de potencia acústica en dB(A) de la fuente S_i en tercios de octava.

A_i Es la atenuación total a lo largo de la trayectoria de propagación en condiciones favorables y desglosadas según los siguientes parámetros:

$$A_i = A_{div} + A_{atm} + A_{sol} + A_{dif} \quad (34)$$

Donde:

A_{div} Atenuación debida a la divergencia geométrica.

A_{atm} Atenuación debida a la absorción atmosférica.

A_{sol} Atenuación por efecto del suelo.

A_{dif} Atenuación debida a la difracción.

Cabe destacar que solo las atenuaciones del efecto suelo (A_{sol}) y la difracción (A_{dif}) se ven afectadas por las condiciones atmosféricas comentadas anteriormente para la propagación de ruido en largas distancias que no se tendrán en cuenta en la modelización.

A partir de este punto se centrará la atención en la exposición de las diferentes atenuaciones empleadas dentro del modelo de propagación basado en la ISO 9613, siendo necesario mencionar que el NMPB-ROUTES considera una distancia entre la fuente y el receptor menor de 250 m para asumir validos sus resultados.

- Divergencia geométrica

Esta atenuación establece el nivel de sonido reducido debido a la distancia de propagación. Para una fuente cilíndrica de sonido en campo libre, la atenuación en dB es igual a:

$$A_{div} = 10 * \log(4\pi d^2) \approx 20 * \log(d) + 11 \quad (35)$$

- Absorción atmosférica

La fricción e intercambio de energía vibratoria y rotacional en las moléculas en el aire provocan la atenuación debida a la absorción atmosférica, A_{atm} , que durante la propagación a través de una distancia d en dB será:

$$A_{atm} = \frac{\alpha * d}{1000} \quad (36)$$

Siendo α el coeficiente de atenuación atmosférica por frecuencias en dB/km, este coeficiente depende directamente de las condiciones meteorológicas, según con las condiciones de la ISO 9613.

Frecuencia (Hz)	100	125	160	200	250	315
A(dB/km)	0.25	0.38	0.57	0.82	1.13	1.51
Frecuencia (Hz)	400	500	630	800	1000	1250
A(dB/km)	1.92	2.36	2.84	3.38	4.08	5.05
Frecuencia (Hz)	1600	2000	2500	3150	4000	5000
A (dB/km)	6.51	8.75	12.2	17.7	26.4	39.9

Tabla 14. Coeficientes de absorción atmosférica (a 15°C y 70% de H.R.) para cada banda de tercio de octava

- Efecto suelo

La atenuación debida al suelo se compone de dos efectos: uno negativo, debido al sonido reflejado desde el suelo hacia el receptor, y otro positivo, causado por la absorción sonora asociada a esa reflexión. El valor de la atenuación obtenida en cada banda de tercio de octava (NMPB-ROUTES-2008) depende del tipo de suelo, así como de la distancia fuente-receptor ligada a las condiciones atmosféricas existentes en la zona y respecto a la altura del mismo sobre el terreno. En general, la atenuación conseguida es tanto mayor cuanto menor sea el ángulo de incidencia de las ondas sonoras respecto a la horizontal.

Cabe destacar que la atenuación debida al efecto del suelo es uno de los cambios más significativos provocados en la actualización del modelo en 2008. Antes de esta actualización, el modelo de predicción trabajaba en bandas de octava y haciendo referencia a la ISO 9613 de forma explícita. Tras la actualización, el modelo pasó a trabajar en bandas de tercio de octava provocando así que se generase una adaptación de las expresiones mediante las que se obtienen los valores de A_{sol} . En el desarrollo expuesto en este trabajo

se expondrán los métodos de obtención tanto del modelo actual como de su predecesor con la finalidad de observar las diferencias.

Las propiedades de absorción acústica del suelo están esencialmente ligadas a su porosidad, los suelos compactos se comportarían dentro del modelo como planos reflectantes mientras que los suelos porosos como absorbentes. Estas propiedades se representan por un coeficiente G adimensional con valores que oscilan entre 0 y 1, adoptando los siguientes valores de forma estimada:

Tipos de suelo	Coefficiente factor de suelo
Césped, prado, vegetación	1
Tierra sin compactar	0.7
Suelos arenosos compactos	0.3
Superficies asfaltadas	0

Tabla 15. Valores de G en función del tipo de superficie [80]

A partir de estos parámetros pueden obtenerse las atenuaciones debidas a la influencia de la superficie, en el caso de la aplicación de la ISO 9613 atenderemos a las siguientes expresiones que compondrán el espectro en bandas de octava.

Frecuencia central nominal (Hz)	A_s (dB)	A_s (dB)
125	$-1.5 + G * a'(z)$	$-3 * q * (1 - G)$
250	$-1.5 + G * b'(z)$	$-3 * q * (1 - G)$
500	$-1.5 + G * c'(z)$	$-3 * q * (1 - G)$
1000	$-1.5 + G * d'(z)$	$-3 * q * (1 - G)$
2000	$-1.5 + (1-G)$	$-3 * q * (1 - G)$
4000	$-1.5 + (1-G)$	$-3 * q * (1 - G)$

Tabla 16. Expresiones del efecto suelo en condiciones favorables NMPB-ROUTES 96

En estas expresiones aparecen términos que no han sido desglosados, debido a que el desarrollo de la ISO 9613 en bandas de octavas no será empleado en el modelo implementado. Los valores mostradas en la tabla anterior $a'(z)$, $b'(z)$, $c'(z)$ y $d'(z)$ así como q dependen de la posición relativa entre fuente y receptor.

En el caso de la aplicación de la actualización del modelo, NMPB ROUTES 2008, la atenuación de ruido debida a los efectos provocados por la superficie, en cada frecuencia asumiría más factores que en el caso anterior.

Dependiendo de la composición de la superficie entre el receptor y la fuente la atenuación varía por el efecto de las reflexiones generadas en el terreno en función del parámetro adimensional G. En el caso de que la superficie sea reflectante, G=0 para superficies pavimentadas según la tabla 15, el valor para esta atenuación será directamente de -3, por contra si este valor G es distinto de 0, ha de realizarse un estudio por frecuencias para cada tercio de octava según las siguientes expresiones:

$$A_{sol,i} = -10 * \log_{10} \left[4 * \frac{k^2}{d_p^2} \left(Z_r^2 - \sqrt{\frac{2 * C_f}{k}} * Z_s + \frac{C_f}{k} \right) * \left(Z_r^2 - \sqrt{\frac{2 * C_f}{k}} * Z_r + \frac{C_f}{k} \right) \right] \quad (37)$$

Donde:

$$k = \frac{2\pi f_c}{c} \quad C_f = d_p \frac{1 + 3wd_p e^{-\sqrt{wd_p}}}{1 + wd_p} \quad (38)$$

f_c Es la frecuencia central, en Hz, de la banda de tercio de octava considerada.

c Es la velocidad, en m/s, del sonido en el aire.

w Es un parámetro adimensional que depende al igual que los demás parámetros de las condiciones ambientales y las posiciones relativas, la expresión con la que se rige es la siguiente:

$$w = 0.0185 \frac{f_c^{2.5} G_{tray}^{2.6}}{f_c^{2.5} G_{tray}^{2.6} + 1.3 * 10^3 * f_c^{0.75} * G_{tray}^{1.3} + 1.16 * 10^6} \quad (39)$$

- Atenuación por difracción.

Dicha última atenuación busca evaluar el descenso de los niveles de ruido a lo largo del camino que sigue una onda mientras viaja entre el receptor y la fuente, siendo este tipo de atenuación una composición de las diferentes condiciones de reducción sonora que se pueden dar en la trayectoria del sonido.

$$A_{dif} = \Delta_{dif(S,R)} + \Delta_{sol(S,O)} + \Delta_{sol(O,R)} \quad (40)$$

Donde:

$\Delta_{dif(S,R)}$ Es la atenuación debida a la difracción entre la fuente S y el receptor R.

$\Delta_{so(S,O)}$ Es la atenuación debida al efecto del suelo en el lado de la fuente, ponderado por la difracción en el lado de la fuente.

$\Delta_{sol(O,R)}$ Es la atenuación debida al efecto del suelo en el lado del receptor, ponderado por la difracción en el lado del receptor.

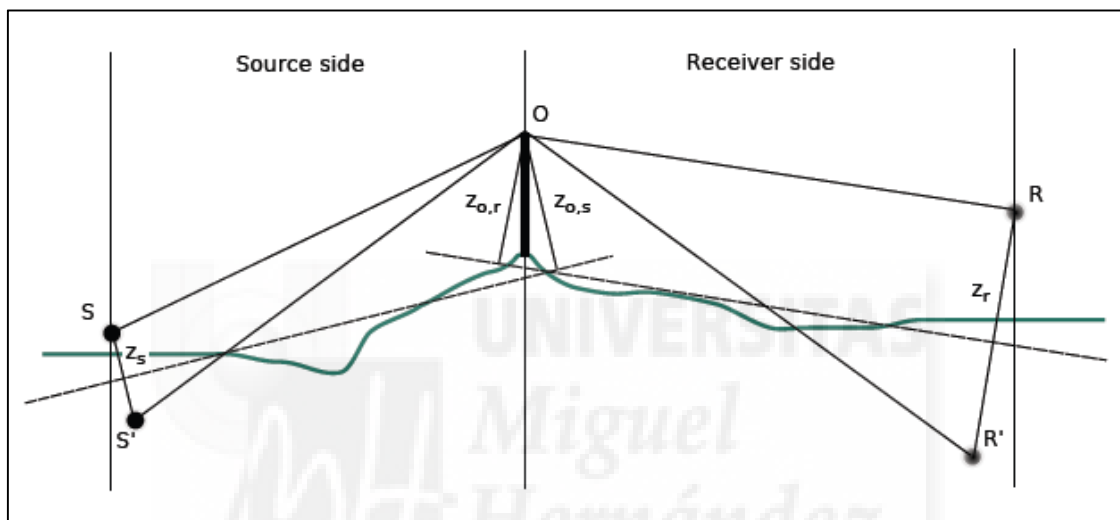


Figura 41. Esquema de las diferentes posiciones consideradas para la aplicación de la atenuación por difracción entre fuente y receptor para firmes discontinuos

Siendo estos valores evaluados mediante las siguientes expresiones en cada caso:

$$\Delta_{dif} = 10 * \log \left(3 + \left(\frac{40}{\lambda} \right) C'' \delta \right) \rightarrow \text{si } \left(\frac{40}{\lambda} \right) C'' \delta \geq -2 \quad (41)$$

$$\Delta_{dif} = 0 \text{ dB} \rightarrow \text{si } \left(\frac{40}{\lambda} \right) C'' \delta < -2 \quad (42)$$

Donde:

λ Es la longitud de onda de la frecuencia central de la banda de octava considerada.

δ Es la diferencia de camino entre el trayecto difractado y el trayecto directo.

C'' Es el coeficiente que considera las difracciones múltiples.

$$\Delta_{sol(S,O)} = -20 * \log \left(1 + \left(10^{\frac{A_{sol(S,O)}}{20}} - 1 \right) \right) * 10^{\frac{-(\Delta_{dif(S',R)} - \Delta_{dif(S,R)})}{20}} \quad (43)$$

Donde:

$\Delta_{sol(S,O)}$ Es la atenuación debida al efecto suelo entre la fuente S y el punto de difracción O, calculado en condiciones favorables u homogéneas, según el caso.

$$\Delta_{sol(O,R)} = -20 * \log \left(1 + \left(10^{\frac{A_{sol(O,R)}}{20}} - 1 \right) \right) * 10^{\frac{-(\Delta_{dif(S',R)} - \Delta_{dif(S,R)})}{20}} \quad (44)$$

$\Delta_{sol(O,R)}$ Es la atenuación debida al efecto suelo entre el punto de difracción O y el receptor R, calculado en condiciones favorables u homogéneas, según el caso.

Ateniendo a todos los valores y las condiciones expuestas, se ha llegado a la implementación del modelo de predicción de ruido en el cual implementaremos en esta tesis doctoral una nueva variable para la evaluación de la repercusión del vehículo eléctrico dentro del tráfico.

5.4. Datos actualizados en el Modelo Francés 2008

A lo largo de la revisión del modelo de predicción en ocasiones se han mencionado puntos en los cuales se ha sufrido una actualización, una vez se ha descrito la composición del actual Modelo Francés resumiremos modificaciones sufridas respecto del modelo de 1996.

La última actualización del Modelo Francés (NMPB-ROUTES 2008) implementa una serie de novedades sobre el modelo original, siendo la modificación más importantes respecto a la fuente la reducción de la altura, pasando de ser 0.5 a 0.05m [9].

En el modelo de propagación, la principal modificación es la sustitución de las expresiones de la atenuación a causa del suelo basadas en la ISO 9613, por la adaptación de estas al ancho de banda de tercios de octava.

Además de las características diferenciadas sobre la atenuación por el efecto del suelo, el NMPB-ROUTES-2008 añade un término de atenuación para cortes de taludes con diferencias entre las alturas relativas entre fuentes y receptores, pudiendo variar la propagación del sonido como producto de las reflexiones generadas en su superficie.

Por otra parte se considera una mayor diversidad de firmes de carreteras, existiendo dos espectros en la NMPB-ROUTES-2008: uno por el asfalto drenante y otro por el asfalto no drenante variando así el reparto espectral a la hora de evaluar una vía de tráfico.

A continuación se muestra una tabla resumen con las diferencias entre los dos modelos:

	NMPB ROUTES 1996	NMPB ROUTES 2008
Altura de fuente	0.5m	0.05m
Espectro de frecuencia	Bandas de octava	Bandas de 1/3 de octava
Tipología de superficie	1 tipo de superficie	2 superficies; Drenante y No Drenante.

Tabla 17. Datos actualizados entre las últimas versiones del NMPB ROUTES





6. IMPLEMENTACIÓN DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO EN EL MODELO NMPB-ROUTES

Tras la exposición del modelo de predicción original que se ha empleado como base para el análisis de la repercusión del vehículo eléctrico en mapas acústicos, se va a proceder a implementar una nueva variable que caracterice la emisión de los vehículos eléctricos.

Una vez comprobado que el modelo implementado se ajusta a la realidad mediante mediciones experimentales [22] en diferentes ambientes y circunstancias, se ha insertado la nueva variable que introduce el flujo de vehículos eléctricos en una vía de tráfico rodado.

Las condiciones de contorno implementadas para este primer estudio de la repercusión del vehículo eléctrico en los modelos de predicción han sido las más sencillas posibles, con la intención de seguir trabajando sobre modelo sumando complejidad, estudiando diferentes situaciones y condiciones de tráfico como trabajos futuros.

Esta condición inicial de simulación ha sido el paso de un flujo de vehículos perpendicular a un receptor, en ausencia de barreras u otros elementos que pudiesen generar reflexiones en un ambiente urbano, cruces o elementos de retención que varíen la circulación constante del tráfico.

Como ya se ha descrito en el apartado 5.2 de este trabajo, el modelo de cálculo Francés original realiza su síntesis de acuerdo a diferentes etapas donde el objetivo es obtener el nivel sonoro total en un punto de recepción.

El primer paso para obtener el nivel de ruido equivalente, L_{Aeq} , es el cálculo del nivel de potencia acústica L_{Awi} de una fuente puntual i para una banda de tercio de octava, siendo éste el punto de partida del modelo y donde se ha actuado para implementar el ruido generado por los vehículos eléctricos. A la expresión 25 se le han añadido los términos referentes a los niveles de presión generados por los vehículos eléctricos a partir de sus valores L_{Amax} y el caudal por hora a circular.

$$E_{ve} + 10 * \log_{10} Q_{ve} \quad (45)$$

La variable E_{ve} , cuantifica la potencia aportada por los vehículos eléctricos por hora a partir de los niveles máximos L_{Amax} , contemplando únicamente la aportación de la rodadura planteada por el NMPB ROUTES original con sus correspondientes correcciones.

$$E_{ve} = L_{Amax} - 10 \log(V) - 24.4 \quad (46)$$

6.1. Aplicación de un caudal de vehículos eléctricos en medidas experimentales

Sobre las medidas estudiadas durante la comprobación del ajuste del modelo original, se ha aplicado un caudal de vehículos eléctricos proporcional al caudal total de vehículos barajando 2 hipótesis:

1. Un vehículo eléctrico se comporta como un vehículo en condiciones Coast-By.
2. Un vehículo eléctrico no genera ningún tipo de ruido.

Para la primera de las condiciones y tema central de esta tesis doctoral, se ha aplicado progresivamente un aumento del porcentaje de vehículos eléctricos sobre los caudales de vehículos registrados en las mediciones experimentales con las que se ha validado del modelo implementado. Esta inclusión ha sido gradual, restando el número de vehículos eléctricos al flujo de vehículos térmicos evitando que la suma total de vehículos exceda al caudal de tráfico original.

$$Q_{li} = Q_l - Q_e \quad Q_e = N\% \cdot Q_l \quad (47)$$

Una vez expuesto el modo de proceder para la simulación de la aparición de las nuevas fuentes de ruido, simularemos una de las mediciones según las siguientes condiciones:

- ❖ 1500 Vehículos ligeros y 120 Pesados a una velocidad constante de 80 km/h.

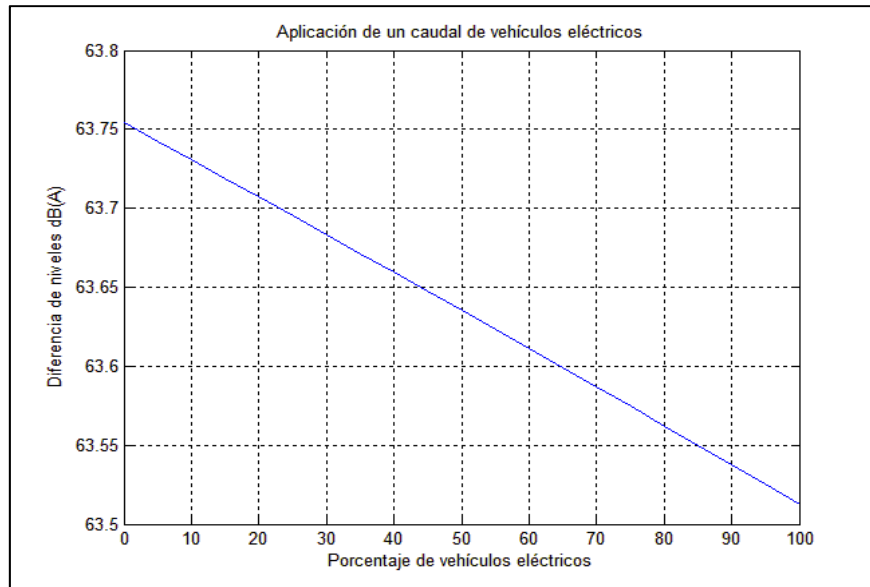


Figura 42. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos en carretera

Como se puede comprobar en la figura anterior, los niveles, a medida que van variando los caudales, descienden de manera lineal hasta llegar al 100% de eléctricos. El descenso en este caso no es significativo, 0,25dB, debido a que existe un porcentaje relativamente alto de vehículos pesados. En el caso de eliminar los vehículos pesados de la simulación el descenso de los niveles sería más apreciable, 0,4dB.

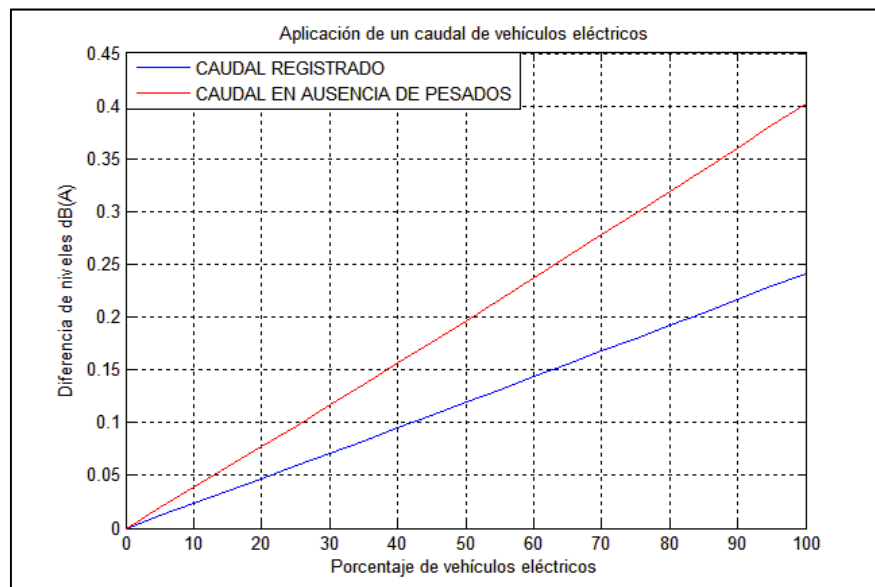


Figura 43. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos circulando en carretera

Si bien estos resultados eran de esperar dada la contribución de la rodadura a altas velocidades, será en bajas velocidades donde la aparición de este nuevo tipo de vehículos deberá provocar un descenso de los niveles de ruido.

Por ello se ha estudiado el ruido generado a velocidades urbanas bajo el mismo procedimiento, evaluando medidas realizadas en el mapa acústico de Elche y buscando que los puntos se situasen en lugares donde la saturación de la vía fuese elevada para que los descensos se observasen con mayor claridad.

❖ 1260 Vehículos ligeros y 150 Pesados a una velocidad constante de 30 km/h

En este caso los descensos son más acusados aunque tal y como sucede en el apartado anterior la presencia de pesados en la simulación altera la apreciación del descenso.

Teniendo en cuenta únicamente los eléctricos como el caudal total en circulación y en ausencia de pesados, la diferencia máxima que se obtiene para una velocidad de 30 km/h es de 2 dB para las condiciones de circulación descritas a velocidad constante asumiendo un ruido de fondo medio de 45dB y una distancia de recepción de 10 metros.

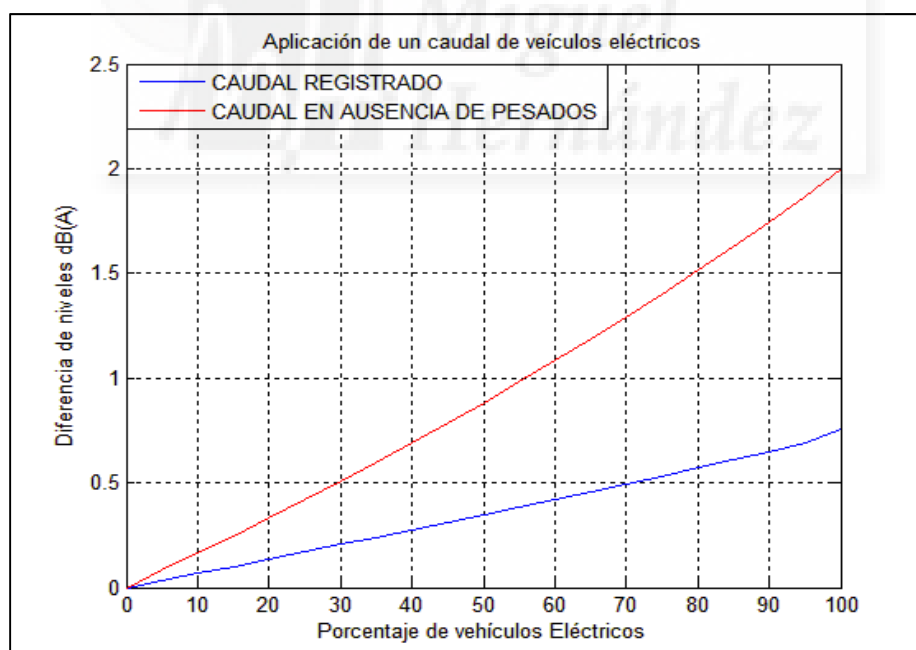


Figura 44. Descenso de niveles por la aplicación de vehículos eléctricos circulando en ciudad

Una vez estudiadas las consideraciones que el modelo tiene en cuenta, puede llegarse a algunas conclusiones sobre la disminución que el vehículo eléctrico puede generar en los mapas de ruido.

Por un lado para altas velocidades la disminución de los niveles al introducir los vehículos eléctricos en el tráfico podría considerarse despreciable, pudiéndose contemplar la posibilidad de no diferenciar entre tipos de vehículos por ser un valor menor a 0,5 dB para velocidades por encima de 80km/h. En cambio para bajas velocidades, la ausencia del ruido generado por los motores favorece al descenso de los niveles de ruido observándose una reducción de 2 dB para una velocidad urbana media de 30km/h.

Cabe destacar que estos resultados son sensibles al ruido de fondo del punto de recepción, reduciéndose el beneficio del uso del vehículo eléctrico a medida que el ruido de fondo aumenta. Los resultados mostrados a lo largo de esta tesis doctoral se han basado en un ruido de fondo de 45dB, aumentando la precisión de los resultados respecto del modelo NMPB ROUTES, ya que éste no asume el ruido de fondo para la predicción sonora como dato inicial.

El Modelo Francés considera 3 tipos de condiciones de circulación tal y como se ha comentado anteriormente (Constante, Acelerado y Decelerado), pero en los mapas acústicos se emplea la condición “Constante” a no ser que se estén estudiando casos puntuales como rotondas o viales de aceleración. Esta condición de constancia en el tráfico de una carretera ciertamente es algo que puede considerarse sin mayores problemas para un mapa de ruido, en cambio en zonas urbanas es algo que para los mapas acústicos se estima como válido, no siendo algo que se ajuste a la realidad ya que en ciudad se suceden los cambios de orden de marcha.

En la irregularidad del tráfico será donde el vehículo eléctrico presentará mayores beneficios, en este trabajo se planteará como trabajo futuro la adaptación del modelo para la evaluar de cambios de orden de marcha en situaciones concretas como semáforos o cruces de vías a partir de tiempos de circulación.

Tras el estudio llevado a cabo, una de las conclusiones extraída sería la reducción generada por el vehículo eléctrico según el orden de marcha frente a los mapas de ruido. En el caso de cambiar el punto de vista y desde la perspectiva del ciudadano, la sensación de silencio

si será más apreciable debido a que en ciudad la mayoría de los recorridos son a baja velocidad, con constantes paradas y arracadas. Por ello, el estudio se ha ampliado a condiciones de alta densidad y saturación de tráfico aunque estas no sean las que muestran los mapas de ruido.

La segunda hipótesis planteada al inicio de este apartado, es la posibilidad de omitir el ruido generado por las tecnologías eléctricas. La inexistencia de ruido por parte de estos vehículos es algo relativo, ya que dicho ruido proviene únicamente de la rodadura siendo silenciosos estos vehículos en función de la velocidad.

Tal y como se ha comentado, el ruido a velocidades altas es cercano al convencional de cualquier vehículo, por tanto habría que estudiar a partir de qué punto la presencia del vehículo eléctrico generaría un ruido despreciable en los mapas de ruido.

Para obtener este margen de velocidades a partir del cual la aparición del ruido no generará en los mapas de ruido una aportación considerable, evaluando la diferencia que se obtiene en el caso de sustituir el total del parque móvil por vehículos eléctricos obteniendo los siguientes resultados para un ruido de fondo en torno a 45dB:

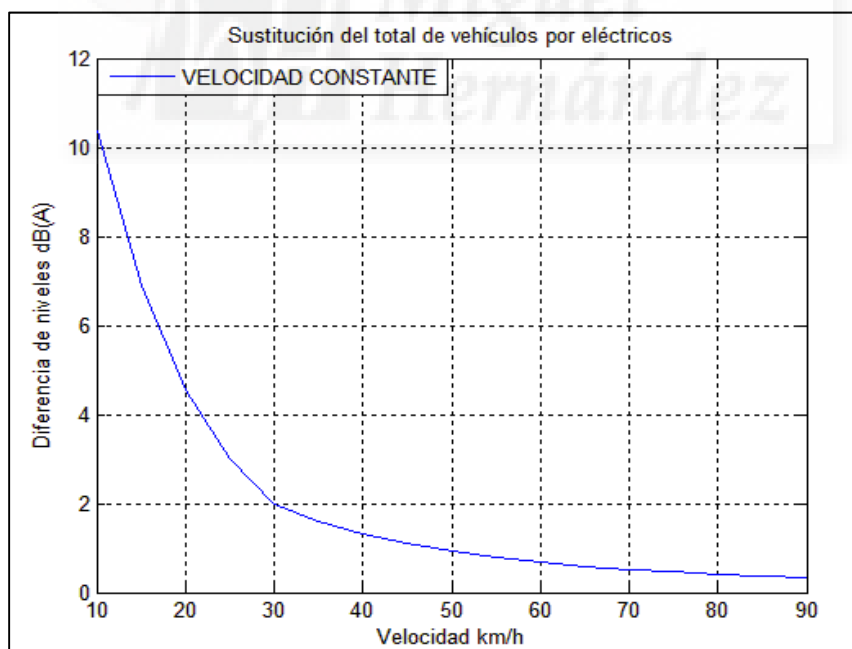


Figura 45. Diferencia de niveles por la sustitución del total de vehículos por vehículos eléctricos

Si bien a baja velocidad la diferencia puede ser notable, a partir 50 km/h la reducción de los niveles es de 1 dB, esta reducción podría despreciarse en los mapas de ruido solo en zonas extraurbanas ya que la contribución aportada por los vehículos eléctricos puede asumirse dentro de la propia desviación del modelo.

6.2. Condiciones de aceleración en mapas de ruido

Como se ha demostrado en el apartado anterior, la aparición de un caudal de vehículos eléctricos ayuda a reducir los niveles de ruido para una circulación constante, considerándose esta situación en la mayoría de escenarios estudiados en los mapas de ruido. En otros casos pueden aparecer caudales de vehículos acelerados que acusarán más la repercusión acústica del vehículo eléctrico, por ello se va a estudiar la reducción de niveles de los vehículos eléctricos en este modo de circulación.

Para ello en primer lugar han de tenerse en cuenta las expresiones que el modelo aplica a las condiciones de aceleración, al igual que para la condición “Constante” se expresan los niveles en función de la velocidad a la que circula el vehículo.

V-km/h	5 a 20	20 a 100	100 a 130
L_{motor}	51.3	46.1-10log(v/90)	44.3+28.6log(v/90)

Tabla 18. Valores de L_{motor} para un vehículo en condiciones “Start&Stop”

De estos datos llama la atención que para velocidades por debajo de 20 km/h los niveles no depende de la velocidad, debido a la consideración de la condición “Start & Stop” [79] durante este rango de velocidades.

Esta condición establece que en los 20 primeros metros tras la arrancada del vehículo éste emite un valor constante en cuanto al ruido motor debido a la mayor aceleración, siendo en el punto donde el vehículo eléctrico acentuará sus atributos de baja sonoridad debido a la ausencia del ruido motor.

Si bien es verdad que en ciudad el límite de velocidad está en 50 km/h salvo en zonas específicas donde estos límites se reducen, la velocidad media aproximada en circulación ronda a los 30 km/h para conductores con una actitud relajada.

En este trabajo de investigación se ha fijado una velocidad urbana de referencia para desarrollar el estudio de 30 km/h en base al trabajo desarrollado por J.M Calvo [13]. En él se estudia el incremento de ruido debido a los estilos de conducción, comparándose los niveles obtenidos por un conductor profesional conduciendo de forma agresiva frente a los niveles obtenidos por 20 conductores con experiencia de conducción variable y una circulación estándar a lo largo de un recorrido urbano.

La velocidad media obtenida por los conductores “estándares” es aproximadamente de 29,4 km/h y una desviación típica de 15,2 en un recorrido de 8.500 metros en los cuales se encontraban con 25 semáforos y 4 rotondas. A partir de aquí se centrará el estudio en las velocidades cercanas a 30 km/h asumiendo ésta como la velocidad urbana media.

Si recordamos los resultados mostrados en la figura 44, se observaba que la reducción de ruido en los mapas acústicos para la velocidad de 30 km/h es de 2dB en condiciones de ausencia de pesados.

Actuando con el mismo procedimiento de análisis y simulación que en los apartados anteriores pero con condiciones de aceleración, los resultados serían los siguientes:

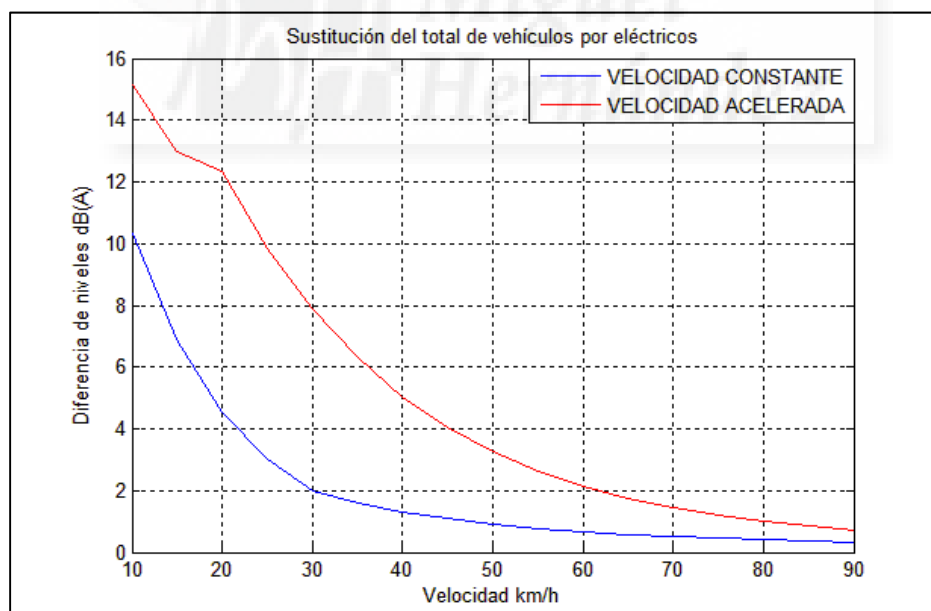


Figura 46. Diferencia de niveles máxima en función del tipo circulación

Al aplicar el vehículo eléctrico frente a un caudal de vehículos acelerados, las diferencias aumentan respecto al caso mostrado anteriormente, llegando a reducirse los niveles en 8dB a 30km/h siempre y cuando no aparezcan vehículos pesados donde en este caso la diferencia sería mayor.

Independientemente de la reducción frente a la circulación acelerada y asumiendo que las condiciones de aceleración no se representan en los mapas de ruido, puede considerarse que la reducción sonora de los vehículos eléctricos de forma administrativa sobre los mapas acústicos sería de 2dB, dependiendo siempre los resultados del ruido de fondo que pueda existir en la zona bajo estudio.

6.3. Modelos de alta densidad y aplicación a casos reales

Antes de comenzar con el análisis basado en las condiciones de circulación, es necesario tener en cuenta algunos parámetros que son fundamentales para la caracterización de una vía.

Como punto de partida de este apartado hay que conocer las condiciones que distinguen la circulación continua y de la circulación discontinua debido a que el flujo de una vía depende en gran medida de las características de ésta. Se entiende por circulación discontinua, a la circulación que habría en el caso de existir elementos de regulación a lo largo de la vía como podrían ser semáforos, rotondas, etc. que obliguen a detenerse a los vehículos durante la circulación.

Una vez definido el tipo de tráfico a estudiar, han de tenerse en cuenta 2 factores concretos, y en este caso unos de los más importantes, la intensidad de circulación horaria equivalente Q veh/h y la intensidad de circulación Q_{15} (veh/15min). Esta última define el número de vehículos que circulan por una vía durante un periodo de 15 minutos, extrayéndose a partir de éste el Factor de Hora Punta [91].

$$FHP = \frac{Q}{4Q_{15max}} \quad (48)$$

A partir de las condiciones geométricas medias de un vehículo, y tomando un espaciamiento lógico entre estas condiciones de saturación, es posible obtener el caudal máximo que una vía es capaz de asumir. En este trabajo se ha considerado para la simulación de una vía de longitud infinita en la que los vehículos tienen una longitud media de 4,5m y un espaciamiento entre ellos de 1,5m, con lo que suman un total de 6 metros por individuo.

A esta longitud se le añadirá de forma adicional el espaciamiento necesario para garantizar la seguridad debido al tiempo de reacción del conductor el cual ronda los 0,66s, obteniéndose un espaciamiento en función de la velocidad:

$$S_s = 6 + \left(\frac{v}{3.6}\right) \cdot t_{percepción} \quad (49)$$

Mediante la síntesis de estos datos es posible obtener el número de vehículos que atraviesan un punto por hora, siendo los siguientes valores los caudales máximos asociados a las velocidades urbanas para un único carril de circulación:

VELOCIDAD	10	15	20	25	30	35	40	45	50
CAUDAL MAX	1274	1709	2061	2352	2596	2804	2983	3140	3277

Tabla 19. Máximo caudal de tráfico para una vía en función de la velocidad

Ha de destacarse que estos caudales están sobredimensionados debido a las condiciones ideales del sistema, en el caso de querer aplicarse a una vía debería contemplarse adicional la existencia de elementos de control de tráfico y los cambios de dirección de los propios vehículos reduciéndose así el caudal máximo asumible por una vía.

A continuación se aplicará el modelo de predicción sonora propuesto a diferentes puntos de la localidad de Elche en diferentes condiciones de circulación, extrayendo los caudales de tráfico de datos reales de los aforos de tráfico tomados por el Ayuntamiento de Elche. Como inconveniente de los datos facilitados se encuentra la inexistencia de una diferenciación entre vehículos ligeros y pesados, por ello se han simulado diferentes porcentajes de vehículos pesados dentro del caudal de una misma vía.

El Modelo Francés de predicción de tráfico rodado marca restricciones en cuanto al caudal de vehículos pesados asumido por una vía, diferenciando el porcentaje máximo de estos vehículos en función del entorno, separando entre vías urbanas o extraurbanas.

Tipo de vía	Vehículos ligeros (veh/día)	Porcentaje de pesados
Vía extraurbana	De 17.000 hasta 217.000	5-20% periodo Día 5-35% Periodo Noche
Vía urbana	De 2.500 hasta 25.000	0-5% (sin diferenciar periodos)

Tabla 20. Porcentajes de vehículos pesados circulando por una vía según NMPB ROUTES

Teniendo en cuenta estos porcentajes de vehículos pesados en el caudal de tráfico, se ha realizado el estudio del efecto de la reducción de los niveles generados por el vehículo eléctrico en relación con el caudal de tráfico simulado. Fruto de este estudio se ha observado que en función del volumen de vehículos que circulen frente al punto de recepción las reducciones tienden a tomar valores similares independientemente del caudal, igualándose a medida que aumentamos la velocidad.

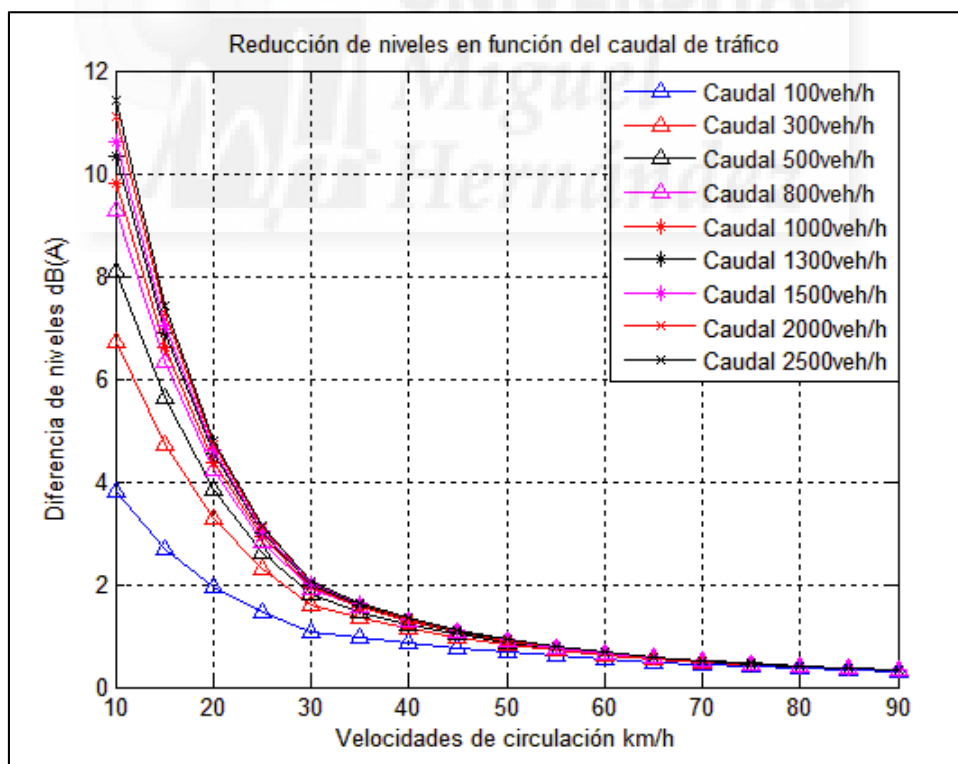


Figura 47. Reducción de niveles en función del caudal de tráfico

Los valores de la figura anterior muestran las reducciones máximas que generaría la sustitución del total de vehículos por la variante eléctrica para diferentes caudales, observando que las mayores diferencias aparecen a velocidades bajas como era de esperar.

Por otra parte, la reducción de los niveles es menor a medida que la discontinuidad del tráfico aumenta debido al incremento del espacio entre vehículos, descendiendo la reducción en menor proporción por debajo de 500veh/h donde la fuente de ruido comienza a dejar de ser puramente lineal pasando a ser una fuente intermedia entre lineal y puntual en función de la velocidad.

A medida que se aumenta la velocidad del tráfico, los descensos tienden a igualarse con independencia del caudal. Esto se debe a la reducción del tiempo entre el paso de los vehículos de forma individual frente al punto de recepción retomándose las propiedades lineales de la fuente.

Estos resultados pueden extenderse a las condiciones de aceleración donde las diferencias de niveles frente al vehículo eléctrico son mayores. Aunque de igual modo que el caso anterior, a medida que la velocidad aumenta los descensos tiende a igualarse respecto al caudal estudiado.

Retomando el estudio sobre los casos reales estudiados, la primera condición asumida para este apartado ha sido la selección de los puntos a simular entre las espiras fijas instaladas en la ciudad, buscando para ello puntos con un caudal hora punta superior al 6% de la IMD de la vía, asegurando así una mayor congestión del tráfico.

En la simulación realizada se diferencian las condiciones de tráfico acelerado y constante con la finalidad de comparar resultados, cabe destacar que ante la imposibilidad de obtener datos sobre los porcentajes de vehículos pesados que atraviesan cada espira se han considerado 2 porcentajes para la evaluación del ruido: 0% y 5% tras consultar los datos de 2011 del Ministerio de Fomento referente a la saturación de las principales vías de acceso de la ciudad de Elche[68], donde se observa que el porcentaje de pesado no excede de un 7% en ninguna de sus vías, siendo la autovía A7 el único punto cercano al núcleo urbano donde este porcentaje llega a al 15%.

Para el primer caso dentro de la simulación se ha escogido la calle Diagonal Palacio, la cual es una de las principales arterias del centro de la ciudad y próxima a los puntos turísticos más importantes de la ciudad.

Esta vía se compone de 3 carriles, de los cuales uno de ellos está destinado exclusivamente a “Carril Bus”. En ella se encuentra 1 semáforo reteniendo la circulación, el cual provoca un tráfico con tendencia acelerada que no se contemplaría directamente en los mapas de ruido.



Figura 48. Esquema de la composición de la vía estudiada

Independientemente de las condiciones de aceleración, el estudio se realiza de forma completa asociando diferentes velocidades y caudales de vehículos evaluando los niveles que pueden existir en función de las condiciones de circulación.

Según los datos aportados por la sala de tráfico de la ciudad de Elche. Esta vía registra de media unos 16000 vehículos diarios de lunes a viernes, con caudales de tráfico en horas punta superiores al 6% mencionado anteriormente. Particularmente para la simulación se ha seleccionado un día concreto en el que la IMD fue de 19290 vehículos, tomando un caudal de entrada en el modelo de 1314 veh/h registrados el viernes 26 de octubre en el intervalo horario de 19:00 a 20:00, siendo la IMD para este día de 19290 vehículos.

Con estas premisas se han simulado 2 condiciones para los modos de circulación constante y acelerado, generando aportaciones del caudal de vehículos eléctricos en saltos de 5%, reduciendo el caudal de vehículos convencionales manteniendo la constancia del caudal de tráfico total estimando los siguientes porcentajes de pesados:

1. 0% Vehículos Pesados
2. 5% Vehículos Pesados.

Para tener en cuenta las condiciones acústicas actuales, en la siguiente figura se muestra un extracto del mapa de ruido de la ciudad de Elche donde se aprecian unos valores existentes en ese punto a 10 metros del eje de la vía entre de 65-70 dB.

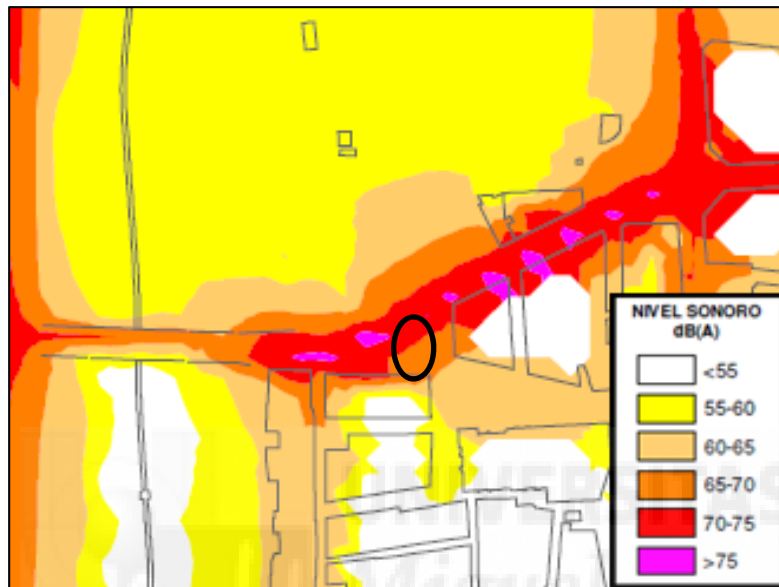


Figura 49. Extracto del mapa acústico de la ciudad de Elche

Las condiciones de este punto son peculiares a la hora de evaluarlas directamente sobre un mapa de ruido ya que existe un semáforo, como hemos comentado, éste varía las condiciones de aceleración de los vehículos generando una alteración respecto a la realidad al considerarse la condición de velocidad constante para el tráfico.

Si se estudiase la contribución al aumento de ruido debido al efecto de retención del semáforo existente, se comprobaría que en el punto ubicado frente al semáforo mientras se encuentra cerrado (en rojo) los niveles se equipararían a los del ruido de fondo de la zona produciéndose un fuerte incremento de manera casi instantánea en el momento que el semáforo pasará a estar abierto [49] [88] [29].

Por tanto, la presencia de un semáforo implica un incremento temporal en el nivel de ruido generado por el tráfico rodado como consecuencia de la puesta en marcha de la circulación durante el ciclo de estos elementos de retención. Estos valores de aceleración serán planteados en sucesivos apartados estudiando en este punto las consideraciones usadas en los mapas de ruido.

Con anterioridad al inicio del análisis, ha de estimarse la progresión del ruido producido por un caudal de vehículos en función de su velocidad, en el caso de que estos circulen a una velocidad constante mostrarían una progresión de ruido diferente a la que se presentaría si se estudiaran en condiciones de aceleración.

Esta progresión para los modos de circulación constante y acelerada se muestra en la figura 50:

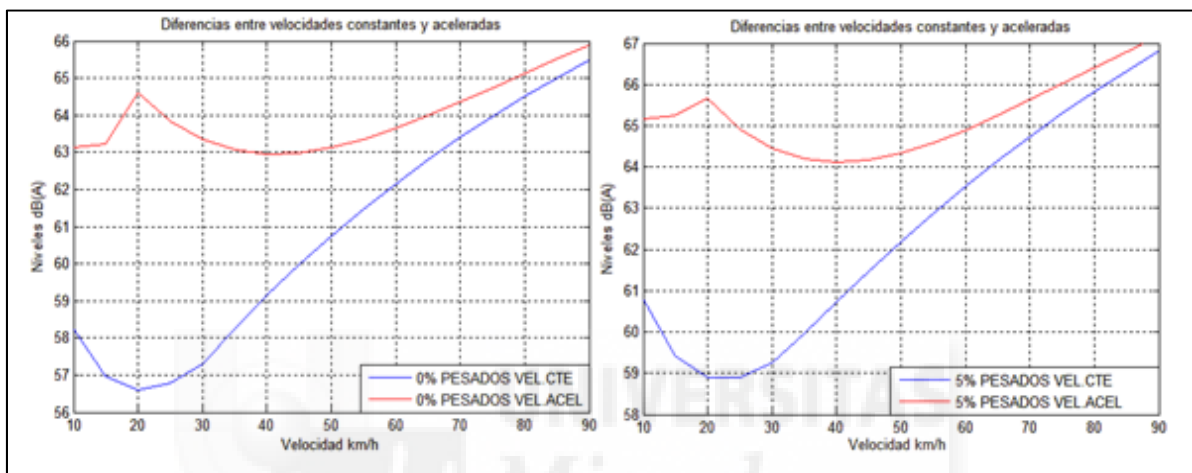


Figura 50. Diferencia de comportamientos según las condiciones de circulación

Dependiendo de las condiciones de circulación, la progresión del ruido en función de la velocidad varía como se puede apreciar en la figura anterior. Independientemente de existencia de vehículos pesados, a partir de cierta velocidad la diferencia entre las condiciones de aceleración y velocidad constante tiende a igualarse debido a la mayor contribución del ruido de rodadura frente al ruido motor.

Puesto que estas simulaciones se realizan sobre entornos urbanos, se tienen en cuenta únicamente las velocidades por debajo de 50 km/h. En el caso de evaluar las velocidades de circulación más bajas, < 25km/h, los niveles se estudiarían según el modelo original a partir de la condición de "Start&Stop".

Esta condición establece que por norma general los vehículos no suelen circular a velocidades constantes por debajo de los 25 km/h bajo condiciones normales de circulación fluida, y se encontrarían acelerando a un régimen elevado por debajo de esta velocidad durante los primeros 20 metros de circulación tras la arrancada del vehículo.

Al reproducir las condiciones de circulación de la vía comentada anteriormente, 1324 veh/h, la incursión de un caudal de vehículos eléctricos genera en función de la velocidad, del flujo de tráfico y del porcentaje de estos, la siguiente distribución de reducción de niveles para un ruido de fondo de 45dB:

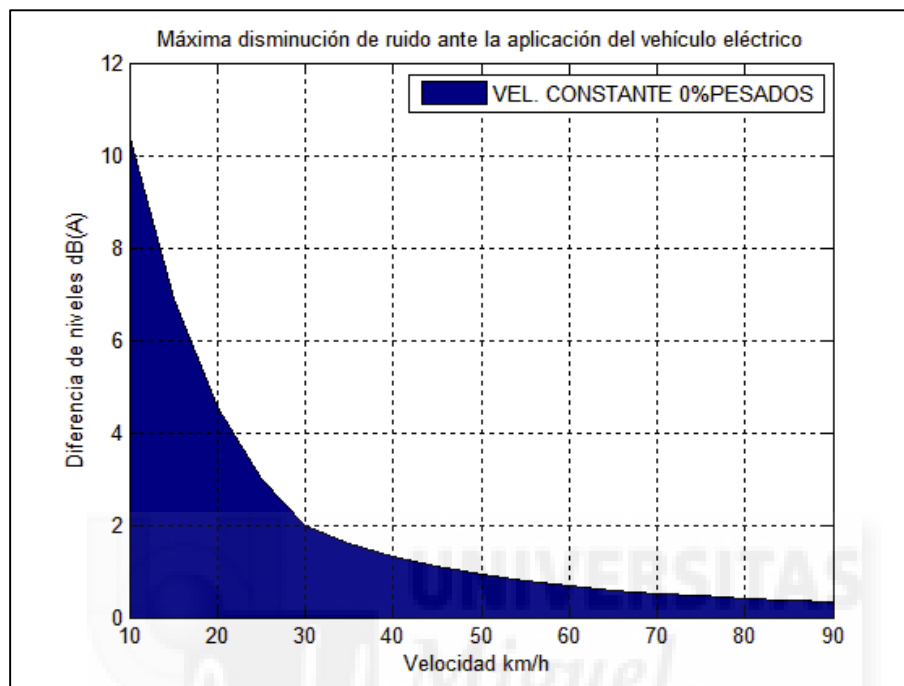


Figura 51. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico en ausencia de pesados

Mediante la figura 51 es posible evaluar la máxima diferencia de niveles que podría generarse al sustituir el total de vehículos térmicos por eléctricos, comprobándose las reducciones generadas en los mapas de ruido en función de la velocidad de circulación. En este caso, para la máxima velocidad urbana permitida en la actualidad, 50km/h, los niveles descienden 1 dB, siempre y cuando el caudal de vehículos pesados sea despreciable.

De forma adicional al estudio sobre la vía de la ciudad de Elche en la que se está centrando el estudio, se han evaluado otros puntos de la ciudad con caudales menores comprobando las hipótesis de comportamiento mostradas en la figura 47. Los puntos evaluados en este caso fueron las espiras situadas en la calle Antonio Pascual Quiles en su correspondencia con la calle Pedro Juan Perpiñán y la Avenida de Alicante con su correspondencia con la calle Pio Baroja siendo sus caudales en hora punta de 371 y 828 respectivamente, comprobándose que los descensos se mantienen en el mismo rango que el mostrado en la figura 51.

Retomando el estudio sobre la calle Diagonal Palacio mostrado anteriormente pero asumiendo en este caso la aplicación máxima de vehículos pesados que estima el modelo original, 5%, los descensos de niveles acusados por la variante de propulsión eléctrica se verían ensombrecidos debido a la mayor aportación de estos vehículos. La disminución de los niveles para la velocidad estudiada 50km/h se vería reducida de 1 a 0,6dB.

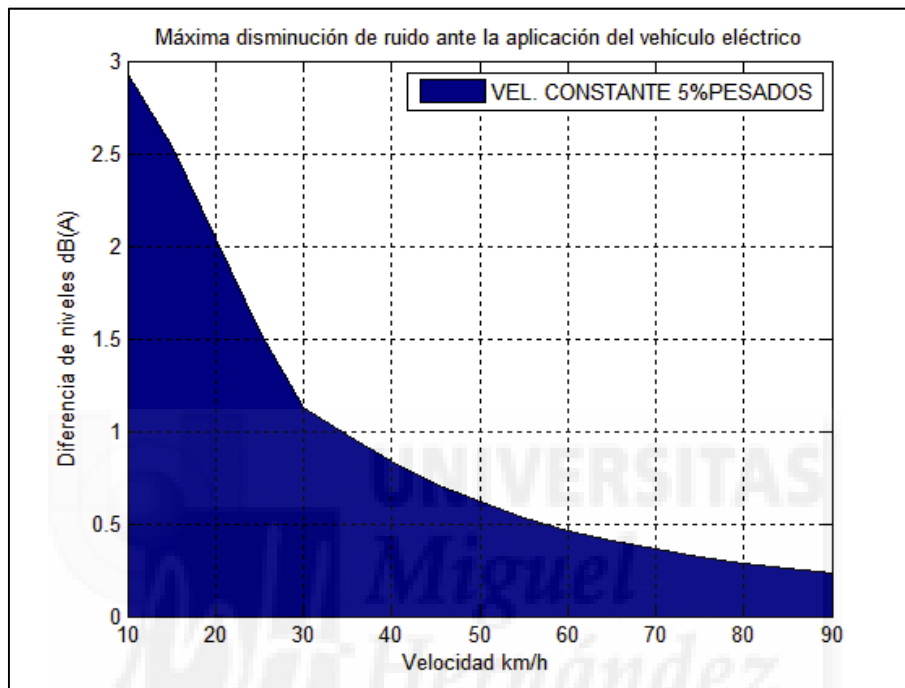


Figura 52. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico con un 5% de pesados en circulación

En el caso de asumir la velocidad media de circulación en ciudad que se ha citado anteriormente, 30km/h, se observaría que el descenso ante la aparición de un caudal de vehículos pesados se ve reducido en un 40% pasando de 2 dB ante la ausencia de pesados a 1,2dB, reduciéndose así la diferencia de niveles siendo este porcentaje mayor para velocidades inferiores sin tener en cuenta las condiciones de “Start&Stop”.

En el caso de necesitar un estudio más al detalle del ruido de esta vía, se debería asociar el nivel de ruido a la saturación del tráfico, que en este caso al existir 2 carriles de circulación los porcentajes de saturación en condiciones ideales serán los que se muestran a continuación para un caudal de 1314veh/h:

VELOCIDAD	10	15	20	25	30	35	40	45	50
% SATURACIÓN	51,6	38,4	31,9	27,9	25,3	23,4	22,0	20,9	20,1

Tabla 21. Porcentaje de saturación de la vía estudiada

Los datos expuestos en la tabla anterior sobre la saturación de la vía no pueden considerarse reales, debido a la existencia de un semáforo como medida de retención de tráfico. Por ello, para poder evaluar la capacidad de un carril en función de las paradas del tráfico provocadas por un elemento de retención, han de tenerse en cuenta los ciclos del mismo para evaluar el espacio de tiempo en circulación.

$$C_{cv} = \frac{C}{N} \cdot \frac{T}{V} \quad (50)$$

Donde:

C_{cv} : Capacidad por hora en fase abierta o verde.

C : Capacidad del carril en ausencia de elementos de retención.

N : Numero de carriles.

T : Duración total del ciclo.

V : Duración de la fase abierta o verde.

En este caso el semáforo estudiado tendría un ciclo abierto de 65 segundos mientras que en ciclo cerrado permanecería 33 segundos aumentando la condensación del tráfico hasta los siguientes índices:

VELOCIDAD	10	15	20	25	30	35	40	45	50
% SATURACIÓN	77,8	58,0	48,1	42,1	38,2	35,3	33,2	31,6	30,2

Tabla 22. Porcentaje de saturación de la vía estudiada asumiendo un semáforo como elemento de retención

A partir de estos datos es posible extraer 3 valores para modelizar la circulación: el primero de ellos será el tiempo en que los vehículos circulan libremente de forma constante, el segundo sería el valor que evalúe la cantidad de ocasiones en que se producen las condiciones “Start&Stop” y por último el tiempo en que el vehículo se mantiene parado frente al semáforo. Para estudiar los resultados reales debe realizarse una suma de valores durante el transcurso de estas 3 situaciones, aunque finalmente estos niveles no se

representen en los mapas de ruido.

Siguiendo con el estudio de situaciones reflejadas en los mapas de ruido, la evaluación de la inserción de la propulsión eléctrica en un caudal acelerado presenta una disminución de niveles más apreciable debido al aumento de los niveles en los vehículos de propulsión térmica.

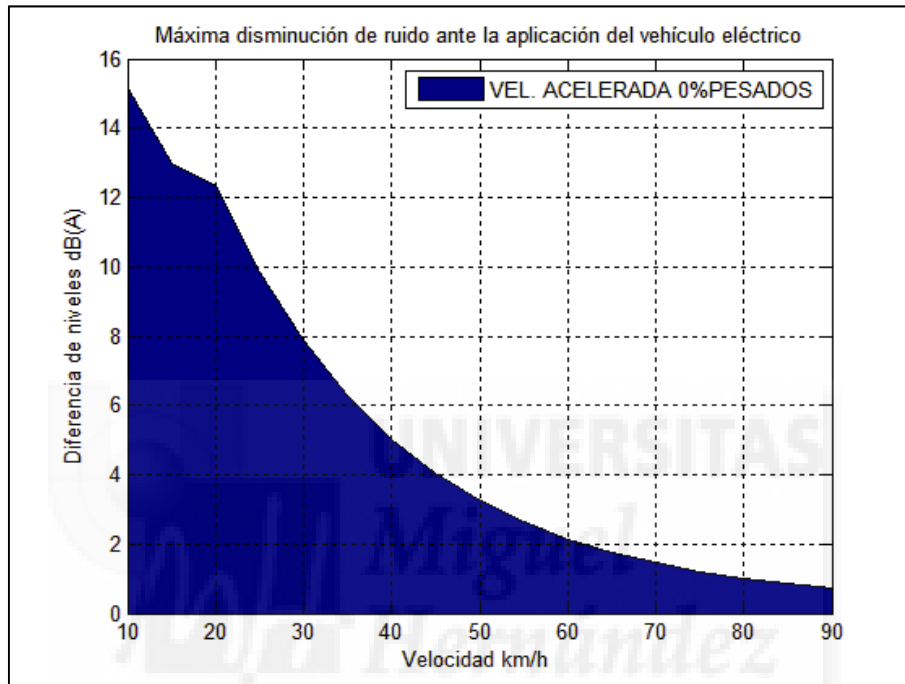


Figura 53. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico en ausencia de pesados en situación de aceleración

Las diferencias en el caso de estudiar el tráfico acelerado aumentan, como es de esperar, respecto al caso anterior debido al mayor contraste de ruido motor de los modos de propulsión aplicados. Durante la aceleración es donde los vehículos eléctricos registran una mayor diferencia de niveles, provocando una mejora de las condiciones ambientales de hasta 12 dB a 20km/h.

Una vez presentados los datos de este estudio, es posible concluir que la aportación de los vehículos eléctricos dentro de los mapas de ruido se verá reflejada en una reducción máxima en función de la velocidad de 3dB para la mínima velocidad constante según el modelo, 25km/h.

La repercusión de estos vehículos es más acusada en el caso de estudiarse para condiciones de aceleración. Bajo estas condiciones los descensos se incrementan hasta los 15 dB (10km/h) en el momento de la arrancada de los vehículos, sin tener en cuenta vehículos pesados en el tráfico lo cual aumentaría esta diferencia.

6.4. Mejora de las condiciones de exposición sonora en la población.

La información aportada por un mapa de ruido sobre la situación acústica de una zona en concreto es útil para la toma de decisiones por parte de la administración ante la elaboración de planteamientos urbanísticos y otras acciones, las cuales pretenden proteger acústicamente a los ciudadanos mediante el porcentaje de población afectada [89] [1].

Por ello, la Directiva 2002/49/EC establece en su anexo IV la necesidad de establecer una estimación del número de personas expuestas al ruido en rangos de 5dB(A) a partir de la recepción en fachada de las edificaciones, existiendo diferentes metodologías que dependiendo del tipo de edificación de la zona bajo estudio pueden variar en cuanto a su fiabilidad y exactitud al observar los puntos más cercanos a fachada.

Para la evaluación de estos parámetros frente a la incursión de los vehículos eléctricos se ha creído conveniente realizar el estudio sobre un sector de la ciudad de Elche, extrayendo y modelizado esta zona a partir del mapa de ruido, sustituyendo los vehículos convencionales por eléctricos para evaluar la repercusión generada por la reducción de niveles sobre el número de habitantes afectados.

La zona elegida ha sido el barrio de Altavix el cual está compuesto por un total de 875 bloques de viviendas de diferentes alturas, en su mayoría superiores a la altura de evaluación de los mapas de ruido, repartidos sobre una superficie total de 450.000m².

La modelización del mapa de ruido de la zona se ha llevado a cabo mediante el software comercial Predictor, con él se ha realizado el análisis de una malla de cálculo de 20300 puntos colocados con una densidad de 5 metros de distancia entre ellos en forma de cuadrícula.

El análisis realizado puede desarrollarse mediante diferentes metodologías variando la exactitud de los métodos dependiendo de las características de la zona bajo estudio y la disponibilidad de información catastral de sobre la misma, en este estudio se ha podido trabajar con la información catastral del Ayuntamiento de Elche, así como del censo de población de la zona, 12.232 habitantes.

Para llevar a cabo este análisis pueden considerarse 3 métodos diferentes los cuales se comentan a continuación:

1. Estimación END [25]. Asigna a todas las viviendas del edificio el nivel de la fachada más expuesta evaluando el ruido a 4 metros de altura.
2. Mapa de ruido estratégico [34]. Asigna a cada fachada de cada vivienda el nivel de ruido del punto del “Grid” más próximo a 4 metros de altura.
3. Mapa de ruido de fachadas. Representa el verdadero nivel de recepción sobre la fachada de cada vivienda distribuyendo receptores de acuerdo con el método alemán VBEB [96].

En este caso y haciendo referencia a diferentes autores como Arana o Licitra [2] [58] los cuales han concluido que el cálculo más ajustado a la realidad es el llevado a cabo por el método VBEB, se ha procedido a desarrollar este método para la evaluar la repercusión de los vehículos eléctricos sobre los ciudadanos según la información extraída de los mapas de ruido.

Los niveles de ruido generados por el tráfico rodado registrado por la Oficina de Tráfico de la ciudad de Elche a una velocidad media de 30km/h [13], produce una huella generalizada de los valores en el rango definido entre 60 y 70 dB para calles estrechas disminuyéndose esta franja en el caso de ampliarse las distancias a fachada y siempre dependiendo del tráfico de la vía. En el caso de las vías con mayores caudales de tráfico, los valores sobrepasan los marcados por la legislación siendo estas vías las más problemáticas de cara a la contaminación acústica percibida por la población.

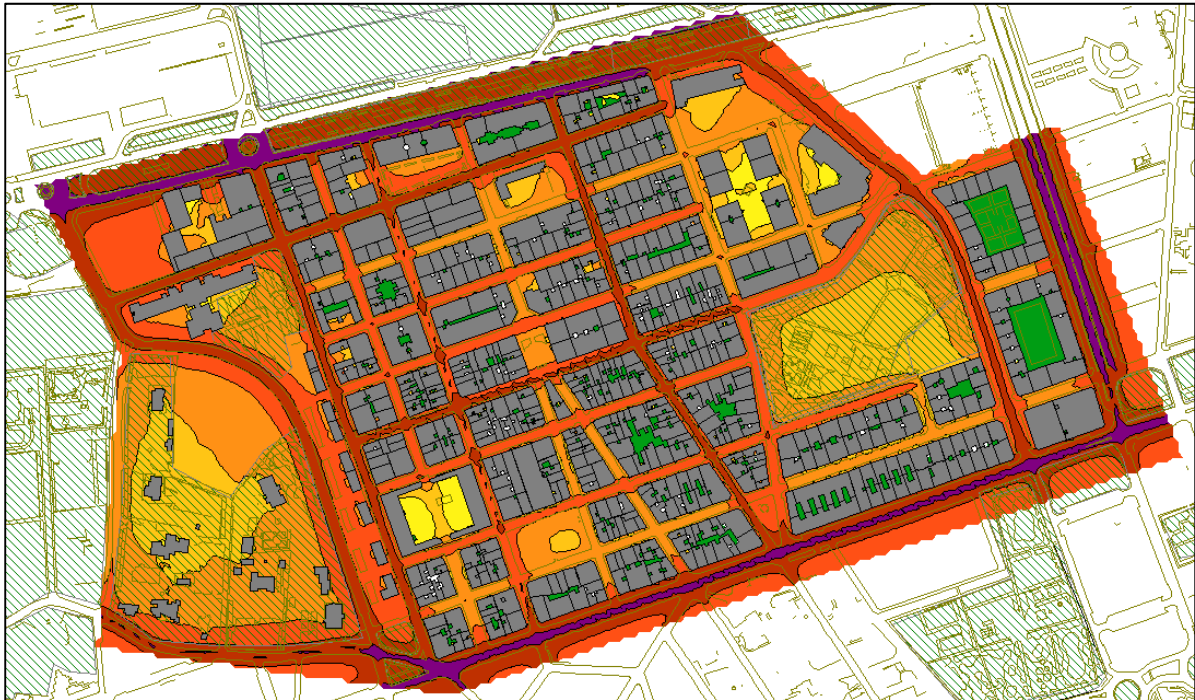


Figura 54. Mapa de Ruido L_{DEN} aplicando vehículos eléctricos

Para llevar a cabo la evaluación de la exposición de los ciudadanos se ha empleado el método de cálculo alemán VBEB, el cual de forma aproximada asigna habitantes a las edificaciones, en función de los metros cuadrados mínimos considerados por persona y edificación [21] en el caso de no poder acceder a los datos censales de la administración.

Para este procedimiento el método de cálculo establece los habitantes por vivienda a partir de la superficie de suelo ocupada por la edificación y el número estancias en vertical:

$$EZ_{building} = \frac{G_{building} \cdot GZ_{building}^{0.8}}{WE} \quad (51)$$

Donde:

$EZ_{building}$ Corresponde al número de habitantes.

$G_{building}$ Área de la edificación.

$GZ_{building}$ Total de alturas del edificio.

WE Asignación de metros cuadrados por habitante.

Este método, a diferencia de los otros nombrados anteriormente, evalúa la exposición de las viviendas mediante la asignación de uno varios puntos de recepción en sus fachadas. Independientemente de las posiciones del receptores asignados por la malla de cálculo, el método fija un receptor adicional en la fachada de cada edificación a 4 metros de altura, aumentando así la resolución de los resultados ya que en el caso de aproximar los valores a un punto de la malla de cálculo las distancias a fachada son variables.

Al realizar esta operación, el método evalúa la recepción directa a la altura de cálculo de los mapa de ruido según la Directiva 2002/49/EC, y extrapolando así los valores de ruido para toda la edificación. Cabe destacar que la aproximación de los niveles de exposición de los habitantes por vivienda se puede aumentar la precisión, en el caso de conocer los datos de población así como colocando un receptor en cada planta del edificio aumentando así el volumen de cálculo.

En este caso la colocación de receptores por viviendas ha generado un total de 5600 receptores, los cuales podrían multiplicarse en el caso de evaluar la recepción por alturas alargando de forma excesiva los tiempos de cálculo como se ha comentado. Al simular estos puntos de recepción para una velocidad de circulación de 30km/h sin tener en cuenta todavía los vehículos eléctricos y conociendo los datos censales, los resultados han sido los siguientes:

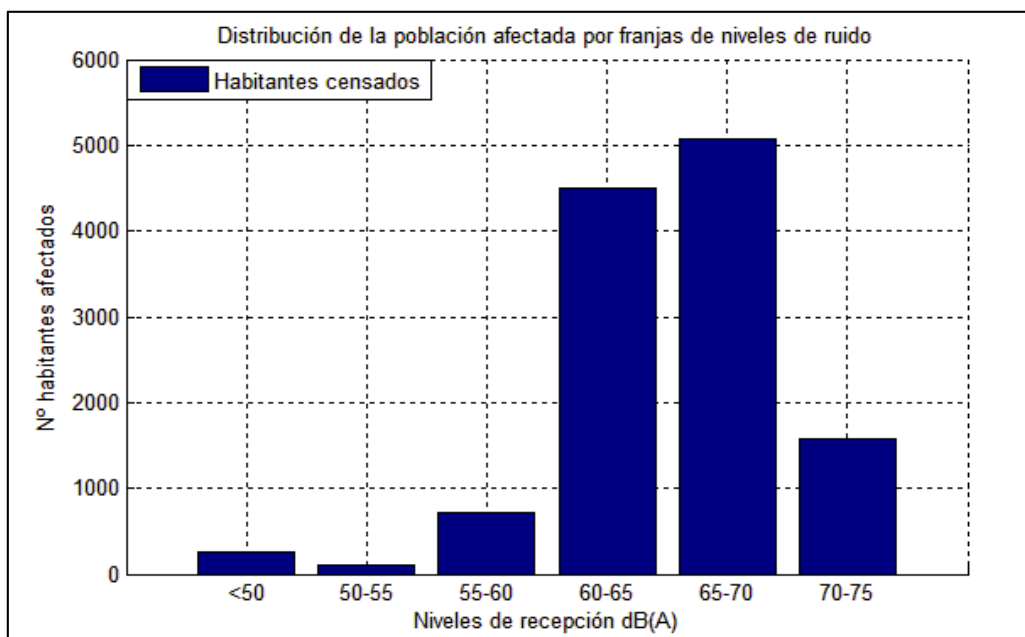


Figura 55. Distribución de habitantes afectados por franjas de recepción

Al evaluar los resultados obtenidos para el caso en que únicamente circula un tráfico compuesto por vehículos térmicos independientemente de su categoría, se observa que un 54% de los habitantes se encuentran afectados por valores superiores a los que el Real Decreto 1367/2007 [75] establece como máximos para una zona residencial de estas características, 65dB(A).

El límite de los 65dB(A) es la barrera a la que deberían llegar los niveles al aplicarse medidas reductoras para las zonas acústicamente saturadas tras ser localizadas con los mapas de ruido como herramienta de detección, o en el caso del uso de modelos de predicción el planteamiento urbanístico no debería permitir que aparezcan valores por encima de este límite.

Tal y como se ha comentado en apartados anteriores, para la velocidad urbana a la que se ha realizado el estudio los valores deberán reducirse, en el mejor de los casos, en entorno a 2dB(A) lo cual generará una variación en los valores de la tabla anterior redistribuyéndose la población afectada entre los márgenes de inmisión.

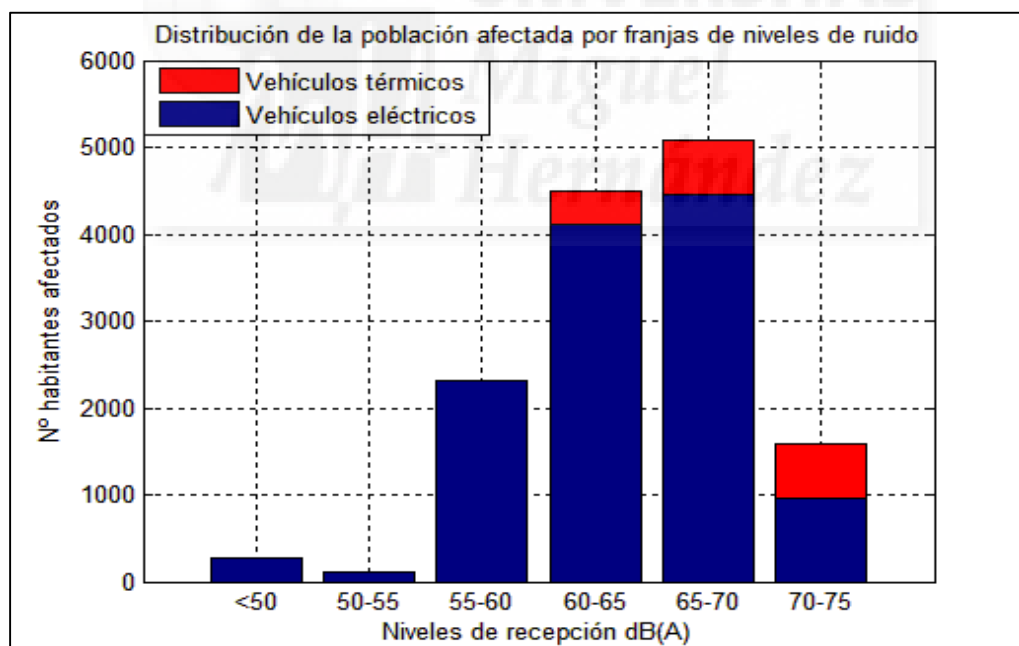


Figura 56. Distribución de habitantes afectados dependiendo del tipo de tráfico

La sustitución del total de vehículos ligeros generaría el descenso de habitantes afectados mostrado en la figura 56, en ella se comparan los valores actuales con los que se obtendrían al aplicar los vehículos eléctricos.

En este caso los habitantes que sobrepasarían los valores máximos exigidos serían un 44% de la población, este dato muestra que un 10% de la población mejoraría su situación acústica. Independientemente de la mejora de dicho porcentaje, la evaluación de los resultados se ha de desarrollar analizando los resultados de intervalo a intervalo.

En el caso de evaluar la franja de niveles entre 70 y 75dB(A) es posible observar para un flujo de vehículos térmicos el número de habitantes afectados por estos niveles es próximo a 1575 habitantes los cuales se reducen al sustituir los vehículos hasta los 952 habitantes afectados.

El siguiente escalón de niveles 65-70 sería la franja límite marcada por la normativa y a su vez donde se concentran el mayor número de habitantes. El cambio de las condiciones acústicas de cara a la reducción de los niveles debe generar que el número total de habitantes que sobrepasan los límites descienda y por tanto la zona reduzca su índice de afección acústica.

Al introducir los vehículos eléctricos se generaría un descenso de los habitantes afectados por valores superiores a 65 dB(A) de 5073 a 4459 habitantes. Este descenso de niveles no solo debe considerarse respecto al valor como una resta, sino que el resultado debe evaluarse desde dos puntos de vista diferentes.

En lugar primer y observando únicamente la diferencia de habitantes, se experimenta un descenso de 614 que entrarían dentro del rango de niveles validos por la legislación. Por otro lado y como segunda lectura a tener en cuenta, el descenso de los niveles provocará que habitantes que ya cumplían los márgenes legislativos mejoren su situación acústica viéndose reflejados los resultados en el siguiente escalón, 60-65dB

Una vez rebajado el límite a partir del cual los habitantes se encuentran recibiendo los niveles que la legislación marca como aceptables, se observa como resultado al introducir los vehículos eléctricos un descenso de los habitantes que cumplen esta condición debido al cambio de franja por parte de gran cantidad de habitantes.

Todas las reducciones y cambios de franja por parte de la afectación de la población se acumulan en la franja de 55-60 dB(A) al aplicar los vehículos eléctricos. En este caso las diferencias entre el número de habitantes afectados sufre la mayor variación pasando de 710 a 2322 al aplicar los nuevos vehículos.

Tras este estudio de la repercusión de los vehículos eléctricos aplicados a una zona concreta del mapa acústico de Elche, se ha demostrado que la repercusión de estos vehículos genera el aumento de un 10% de los habitantes que experimentan niveles de ruido dentro de los límites marcados por el Real Decreto 1367/2007, así como la mejora ambiental de las condiciones de los habitantes que ya cumplían los márgenes de ruido con anterioridad.

6.5. Conclusiones

Una vez estudiadas las características del ruido generado por los vehículos eléctricos dentro de los mapas de ruido, se extraen diferentes conclusiones en función de las condiciones de circulación.

En el caso de evaluar la repercusión de estos vehículos para velocidades extraurbanas, los niveles generados por un flujo de tráfico de vehículos eléctricos dentro de los mapas de ruido se verían reducidos en un máximo de 1 dB a 50km/h reduciéndose esta cifra a medida que la velocidad aumenta. Por ello es posible considerar despreciable la repercusión de estos vehículos para vías extraurbanas donde la reducción de los niveles podría asumirse por la propia desviación del modelo de predicción, $\pm 1,5$ dB.

Por otro lado para velocidades urbanas donde la velocidad media de circulación se ha considerado de 30km/h, se observa que los niveles pueden descender de forma más considerable hasta máximo de 2 dB(A) dependiendo de las condiciones de ruido de fondo y la existencia de vehículos pesados dentro del flujo vehicular.

A partir del estudio realizado sobre la repercusión del descenso de niveles por la aplicación de la propulsión eléctrica en una zona del mapa acústico de Elche, se comprueba que el porcentaje de habitantes que mejoran la calidad acústica de sus viviendas se ha visto incrementado de forma considerable, un 10%, en el caso en que únicamente circulen vehículos eléctricos.

Ha de tenerse en cuenta que estos datos son en todo momento evaluados según las condiciones ideales de los mapas de ruido donde la aceleración no está considerada y por tanto las condiciones de saturación de vías, retenciones o semáforos no son evaluadas.

En el caso de considerar la aceleración del tráfico los descensos aumentan hasta 8dB, obteniéndose así una mejora mayor a la mostrada anteriormente. Estos efectos sobre la reducción de niveles se experimentarán de forma puntual por los receptores ante el paso de un vehículo, dicha situación se estudiará más detenidamente en el siguiente apartado.





7. PROBLEMÁTICA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Como se ha comentado a lo largo de esta tesis doctoral, la aparición en el parque automovilístico de un modo de propulsión eléctrico debería generar un descenso de los niveles de ruido ambiental pudiendo estudiarse desde diferentes puntos de vista o ámbitos de aplicación.

En el caso del estudio del descenso de la contaminación ambiental mediante el uso de mapas de ruido, se ha comprobado que en función del porcentaje de vehículos eléctricos existentes en el flujo de tráfico los descensos son significativos al aplicar esta nueva forma de propulsión. En cambio, si se busca la asociación del ruido a la percepción de los peatones, o de los habitantes de las viviendas próximas a las vías, estos percibirán una mayor sensación relativa de silencio ante la presencia de los vehículos eléctricos debido a la ausencia del ruido motor de forma instantánea.

La impresión de silencio generada en este caso será relativa, dependiendo de la predisposición del peatón a asociar el ruido del vehículo que circula en ese momento ante él. A priori esta sensación de silencio puede considerarse una ventaja frente a la calidad de vida en entornos urbanos, pero dicha ausencia de ruido en los vehículos puede provocar situaciones de peligro para los peatones.

Diferentes estudios exponen que la percepción de la aproximación de un vehículo eléctrico se complica debido a la inexistencia de ruido motor y por ello las condiciones de seguridad del tráfico se ven afectadas, comprometiendo así los beneficios ambientales que podría generar esta tecnología [72] [39] [46] [47].

La detectabilidad de la aproximación del vehículo eléctrico es una de las cuestiones que más está dando de qué hablar, plantándose el problema de aumentar la detectabilidad. La solución adoptada por numerosos grupos de trabajo es la instalación de sistemas de reproducción sonora, que emitan señales audibles por los peatones sin empeorar las condiciones acústicas del entorno.

El problema que surge al plantear la colocación de elementos de emisión sonora en los vehículos (a los cuales llamaremos “speakers” por ser un término ampliamente empleado en la bibliografía), es la cuantificación de los niveles de ruido que han de emitir estos speakers de forma adicional al ruido del propio vehículo para que la detectabilidad se equipare con la de los vehículos convencionales.

Estos niveles han sido estudiados por diferentes organismos internacionales plasmándose a partir de la norma SAE Standard J2889-1, “Measurement of minimum noise emitted By road vehicles”, [83] en ella se expone el procedimiento de ensayo para establecer los valores mínimos que un vehículo ha de emitir.

Teniendo en cuenta que mediante este procedimiento se busca cuantificar la contribución acústica mínima de un vehículo, se evalúan los valores obtenidos a velocidades puramente urbanas, hasta 30km/, para un único vehículo circulando frente a 2 micrófonos colocados perpendiculares en ambos lados de la vía.

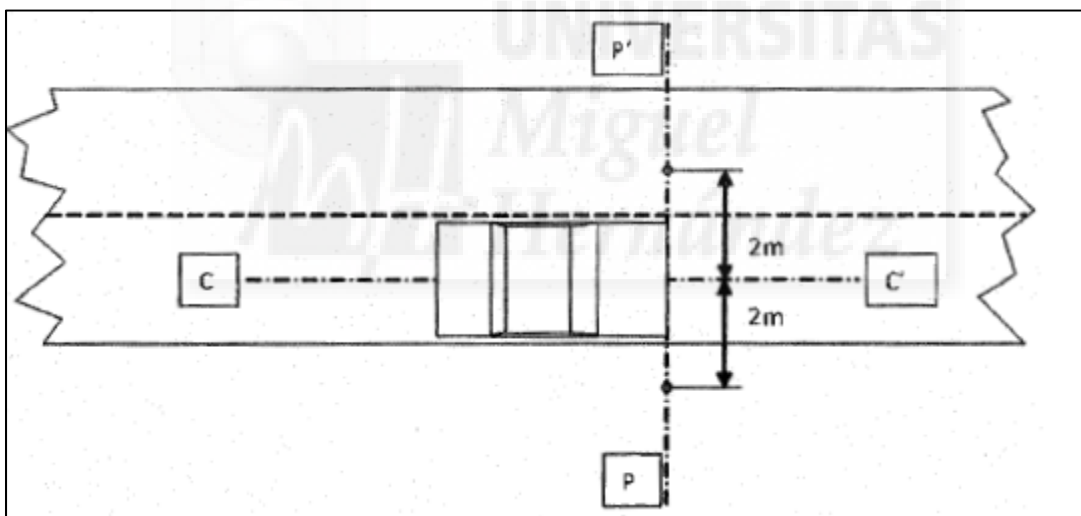


Figura 57. Esquematización de los ensayos descritos en la norma SAE Standard J2889-1

Estos ensayos simulan la posición del peatón al disponerse a cruzar una calle, registrando datos en una posición cercana a la real. Para el desarrollo de estos ensayos varios autores han sustituido los micrófonos por cabezas biaurales en los puntos de recepción, obteniendo así una aproximación de la respuesta humana ante el paso de un vehículo.

Dicha aproximación de la respuesta humana puede emplearse para diseñar las señales digitales a reproducir por los speakers mencionados anteriormente, comparando la respuesta en sujetos reales mediante ensayos de laboratorio.

El proyecto europeo eVADER [30], en el cual se ha tenido la oportunidad de participar en esta tesis doctoral, es uno de los proyectos más importantes a nivel europeo relacionado con la detección acústica de la presencia de los vehículos eléctricos. El objetivo planteado por el grupo de investigación es la generación de una señal digital audible que no empeore los niveles de ruido medioambientales y a su vez aporte seguridad al peatón incrementando la percepción acústica de estos vehículos.

eVADER centra su atención en el comportamiento de los peatones a la hora de cruzar una vía urbana, el cual sigue unos patrones de seguridad de forma inconsciente que en función del peatón y sus condiciones fisiológicas (edad, medicación, distracciones, etc...) pueden variar.

Los principales factores que intervienen en los accidentes con implicación de peatones (también puede hacerse extensible a ciclistas) suelen asociarse a las siguientes causas [81]:

- Exceso de confianza a la hora de cruzar la vía.
- Mala interpretación de la situación del tráfico.
- Falta de atención al tráfico debida a diferentes factores. (Música, conversaciones telefónicas...)
- Mala estimación de las propias capacidades del peatón.

Estos factores favorecen al aumento del tiempo de reacción del peatón, y por tanto, proporcionalmente se incrementará el riesgo de accidente. Si a estos factores se añade la menor perceptibilidad acústica de los vehículos eléctricos se genera el descenso del margen de seguridad del peatón ante el cruce de una vía.

Asumiendo las características y niveles de ruido existentes en las calles según mediciones llevadas a cabo en diferentes ciudades europeas dentro del propio proyecto eVADER, se están diseñando señales de ruido que aumenten la detectabilidad acústica de vehículo eléctrico equiparando el ruido generado al de un vehículo de propulsión térmica, asumiendo como restricción que esta “señal de aviso” o “Warning Sound” no aumente los niveles de ruido ambiental existentes.

7.1. Antecedentes

El proyecto eVADER está siendo llevado a cabo por un grupo de investigación compuesto por diferentes grupos y centros de investigación, los cuales se encuentran realizando un trabajo conjunto distribuido en diferentes tareas desde que comenzó el proyecto a finales del año 2011 y con una fecha de finalización del proyecto para octubre de 2014.

La parte en la que se puede englobar el trabajo llevado a cabo en este trabajo de investigación, es la parte experimental del proyecto, en la que se cuantifican los niveles globales de emisión de vehículos, así como en la predicción de los resultados de la aplicación de estas señales ante los resultados en los mapas de ruido.

La parte experimental del proyecto eVADER busca cuantificar los niveles que un peatón recibe en el momento que se dispone a cruzar una vía en diferentes situaciones según la SAE Standard J2889-1.

Para dicho propósito, se han realizado mediciones sobre 3 vehículos, 2 de ellos de propulsión eléctrica y un tercero de propulsión térmica con la intención de evaluar los niveles de recepción a 2 y 4 metros del vehículo a velocidades puramente urbanas, 10, 20 y 30 km/h. Las condiciones de circulación en cuanto a distancia al peatón y trayectoria del vehículo han sido variadas en 7 posiciones diferentes recreando situaciones cotidianas desde el punto de vista del receptor.

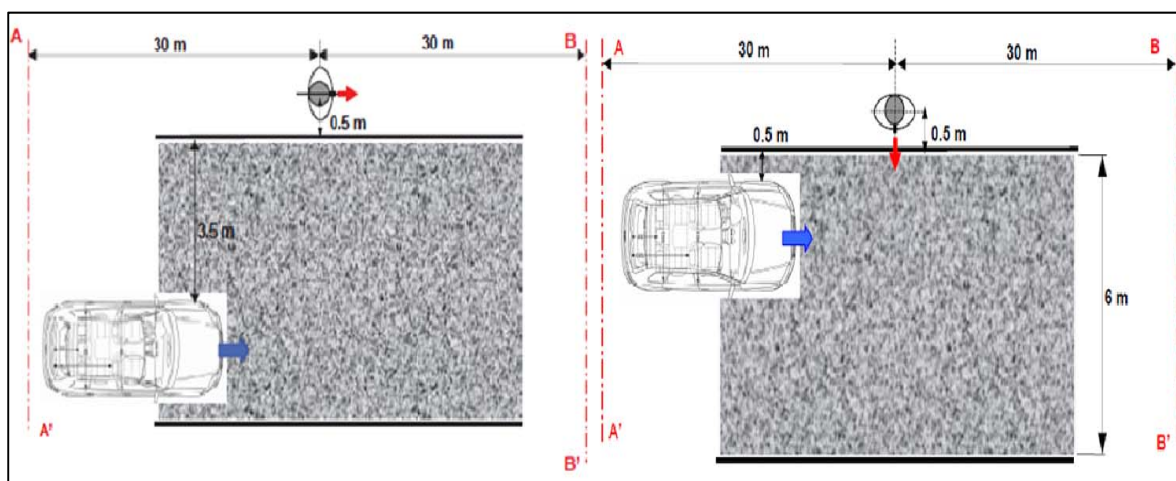


Figura 58. Esquemas simulados y evaluados a partir de las mediciones del proyecto eVADER.

Fuera de este proyecto europeo, se han desarrollado estudios analizando la detectabilidad del vehículo eléctrico o híbrido funcionando en su modo eléctrico, de forma que se pueda aumentar la seguridad de los peatones. Dichos estudios comenzaron a elaborarse en 2008 de forma exhaustiva ante la mayor apreciación de vehículos híbridos en las calles. En Estados Unidos la NHTSA estudió las posibles circunstancias por las que se generan accidentes relacionados con vehículos híbridos frente a peatones o ciclistas, evaluando la repercusión de la “ausencia” de ruido ante el descenso de la percepción y otros posibles motivos de accidente [39].

Por otro lado, dentro de la misma asociación americana L. Rosenblum [82] realizó un estudio sobre la identificación de los vehículos “silenciosos” para velocidades urbanas, comprobando la percepción de estos en velocidades urbanas, concluyendo que es necesaria la aplicación del “Warning Sound” en velocidades por debajo de los 20 km/h debido a la generación insuficiente de ruido rodadura para la percepción del peatón.

Una vez demostrada la necesidad de incrementar los niveles de ruido, han de conocerse los valores mínimos que un vehículo emite para incrementar los niveles de las tecnologías híbridas o eléctricas hasta estos niveles. Para esta misión, el proyecto eVADER parte del estudio realizado en Japón sobre la localización y estudio de la emisión sonora, concretando que la detección de la aproximación del vehículo depende en gran medida del ruido de fondo del entorno. [46].

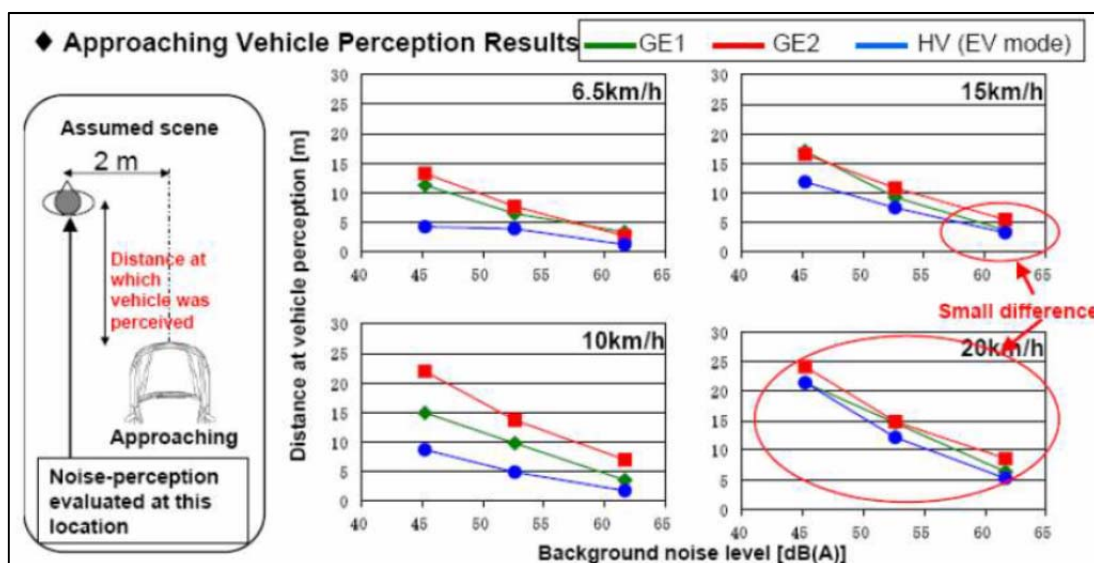


Figura 59. Niveles de percepción acústica en función del ruido de fondo

En la figura 59 puede apreciarse como el ruido de fondo afecta en la variación de la distancia de detección del vehículo, aumentando el riesgo de atropello del peatón a medida aumenta el ruido de fondo. Los resultados expuestos muestran las diferencias entre varios vehículos de propulsión térmica y un vehículo híbrido circulando en su modo eléctrico en diferentes escenarios [46].

Estos antecedentes han proporcionado al proyecto eVADER una base sobre la que diseñar sonidos de alerta que aumenten la detección de los vehículos eléctricos. Las señales diseñadas en este proyecto han sido desarrolladas por la Universidad Insa-Lyon, siendo un total de 9 “tracks” de diferentes características tonales los cuales aumentan el nivel equivalente del vehículo eléctrico en un máximo de 2 dB a 20 km/h.

Los test realizados para validar estas señales de audio a reproducir en los speakers fueron evaluados sobre multitud de sujetos obteniendo una respuesta equivalente ante la aproximación de los vehículos. Uno de los datos más relevantes que se extrae del estudio sobre la respuesta de los sujetos es que el tiempo de detección de la aproximación no se ve influido por las condiciones fisiológicas de los sujetos (suponiéndose sujetos sin ninguna deficiencia), siendo un factor variable dependiendo de la señal aplicada aproximando la respuesta de un sujeto cualquiera dentro del rango de detección definido entre 1.7 y 4.3 segundos para un vehículo eléctrico empleando un sonido de alerta, el cual sin estos ascendería a 4,6 segundos. Por otro lado y comparando estos resultados con los tiempos de detección de un vehículo térmico, el espacio de tiempo necesario para la detección acústica de un vehículo Diésel rondaría los 1.8 segundos en función de la cilindrada del mismo según los datos obtenidos por la universidad INSA-LYON.

7.2. Aplicación del Modelo Francés para la detección de un vehículo eléctrico

Una de las aportaciones de esta tesis doctoral al proyecto eVADER ha sido la cuantificación de los niveles de ruido que recibe un peatón a medida que un vehículo se aproxima al mismo de forma simulada a partir de la formulación del Modelo Francés modificado.

Para ello ha sido necesario adaptar el modelo de predicción original, asumiendo las condiciones iniciales del modelo y sustituyendo un caudal de vehículos circulando a lo largo de una vía por un único vehículo como fuente puntual dentro de la ecuación 32.

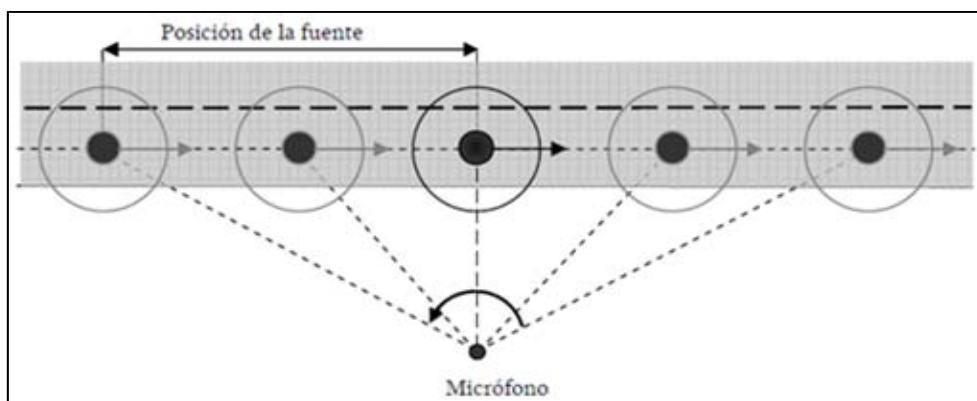


Figura 60. Esquema del paso de la fuente ante el receptor

Al realizar la adaptación del modelo de predicción implementado, se ha procedido a evaluar los resultados que se obtienen al simular el paso de 1 vehículo según los casos estudiados por el proyecto eVADER.

Una observación que ha de comentarse sobre esta simulación, es la consideración de la directividad sonora del vehículo. En este caso no se ha tenido en cuenta al suponer que para los niveles de ruido registrados, puesto que la repercusión de este parámetro no tendría efectos relevantes. El estudio de la directividad sonora del vehículo eléctrico para velocidades de hasta 30km/h será planteado dentro del apartado trabajos futuros.

Los ensayos a simular fueron realizados dentro del proyecto eVADER por diferentes colaboradores en escenarios totalmente controlados, usando un maniquí acústico con la finalidad de simular la recepción de un peatón real en las inmediaciones de la vía.

En primer lugar se compararán los resultados de la simulación del paso de un único vehículo frente a un receptor según las condiciones de ensayo del trabajo experimental expuesto en el apartado 4.4.2. Teniendo en cuenta que los valores iniciales de la simulación parten de los niveles de emisión sonora del propio Modelo Francés, se ha asumido la desviación que éste asume para la composición de ábacos de emisión, $\pm 1,5$ dB.

Una vez definida la desviación asumida para la validación de los resultados y analizando las medidas expuestas en apartados anteriores, se ha comprobado si la simulación para un único vehículo cumpliría con la desviación preestablecida para la distancia de medición de 7,5 metros empleada en los procedimientos Coast-by obteniendo los siguientes resultados:

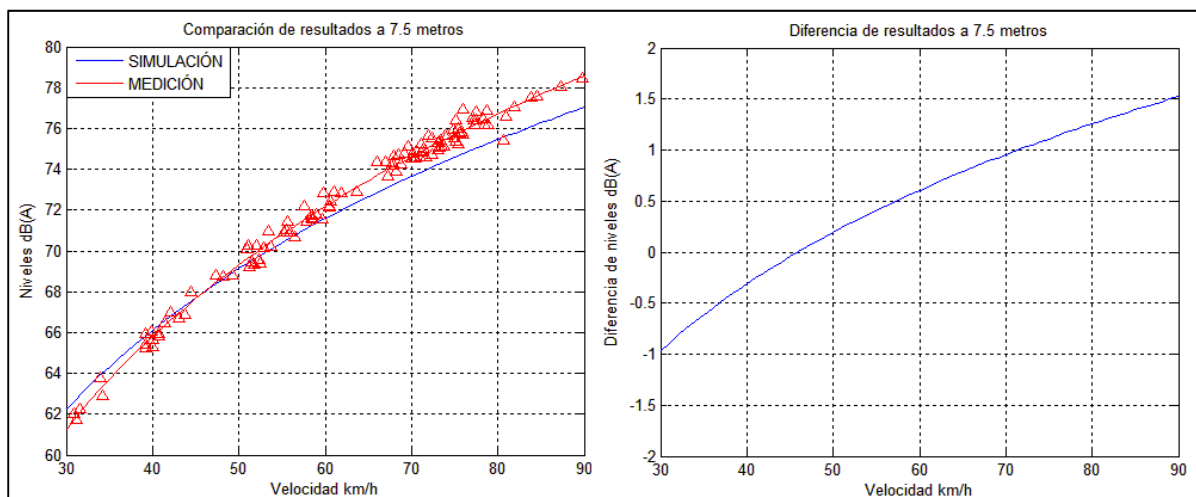


Figura 61. Simulación de los ensayos Coast-By a 7,5m

Como se ha comentado en apartados anteriores, los valores se ajustan al margen de error de 1,5dB siendo válidos los resultados para las velocidades medidas en las mediciones realizadas en la Universidad Miguel Hernández, desviándose los valores de la recta de regresión en velocidades por debajo de 20 Km/h donde no se realizaron mediciones.

Considerando que el modelo fue ideado para distancias mayores de 7,5 metros [79], se ha asumido que el error para distancias superiores se mantendrá en este valor. Por el contra para distancias más cortas de estos 7,5 metros, la condición de fuente puntual deja de ser una condición fiable y por ellos se ha evaluado este error para una distancia de 3,75 metros de distancia sobre mediciones realizadas de forma simultánea a las mostradas anteriormente en los ensayos realizados sobre el vehículo eléctrico.

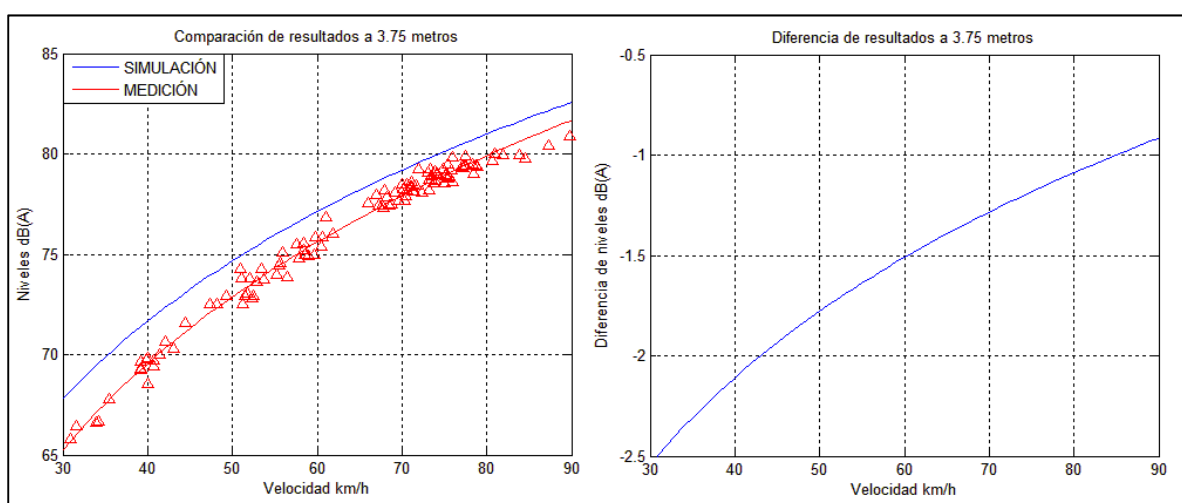


Figura 62. Simulación de los ensayos Coast-By estudiados a 3,75m

A medida que el receptor se aproxima a la fuente, los valores obtenidos en la simulación se separan más de los valores reales obteniéndose una diferencia superior a los 1,5 dB de desviación asumida anteriormente, por ello para la localización del vehículo se tendrán en cuenta las distancias superiores a 7,5 metros de la fuente para validar los datos.

7.3. Condiciones de la simulación según SAE J2889-1

La simulación elaborada evalúa la aproximación de un vehículo al punto medio de una pista de 60 metros de longitud colocando al receptor en diferentes posiciones respecto a la perpendicular de la vía a una altura de 1,5 metros. Las velocidades estudiadas en estos ensayos han sido 10, 20 y 30km/h, observando los valores obtenidos para el tiempo de reacción mencionado anteriormente y extraído del proyecto eVADER.

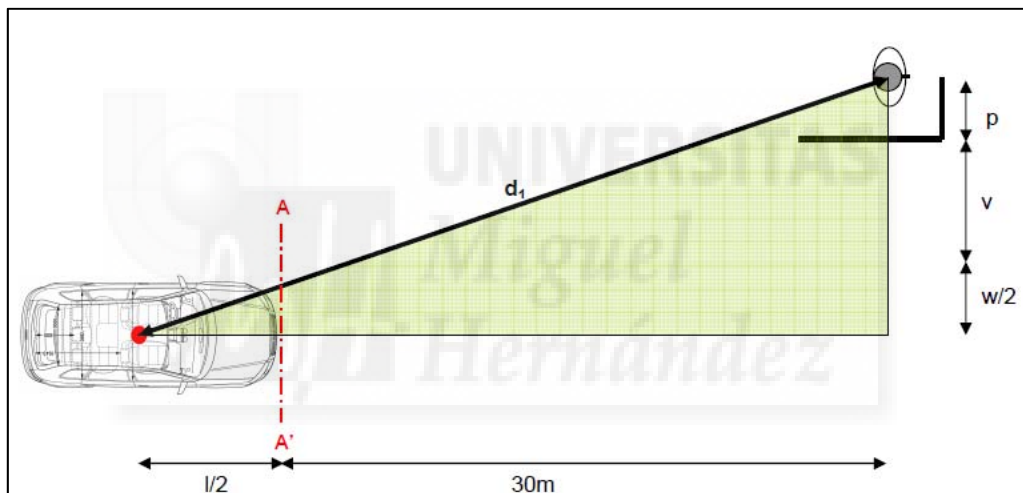


Figura 63. Esquema de la posición del receptor para la simulación

Siendo:

l Longitud del vehículo.

w Ancho del vehículo.

V Espacio entre la acera y el vehículo.

P distancia del peatón al borde de la acera.

En este proceso de simulación se han tenido en cuenta únicamente las mediciones del proyecto eVADER realizadas sobre vehículos eléctricos, debido a las diferencias entre las condiciones de circulación a baja velocidad de los vehículos térmicos en estos ensayos respecto a las condiciones del Modelo Francés. La circulación del vehículo térmico en estos ensayos se realizó a velocidad constante circulando con la 2ª marcha para las 3 velocidades siendo esta condición diferente de las empleadas en los ensayos Pass-By del que parte el Modelo Francés.

Tal y como se ha comentado en los antecedentes de este apartado, el ruido de fondo es un factor determinante para percibir la aproximación de un vehículo hacia la posición del peatón, así que para poder simular las condiciones de medición se ha considerado como valor de fondo el nivel más bajo registrado en cada uno de los ensayos del proyecto eVADER, este valor se sitúa entre 42-48 dB dependiendo de la medición.

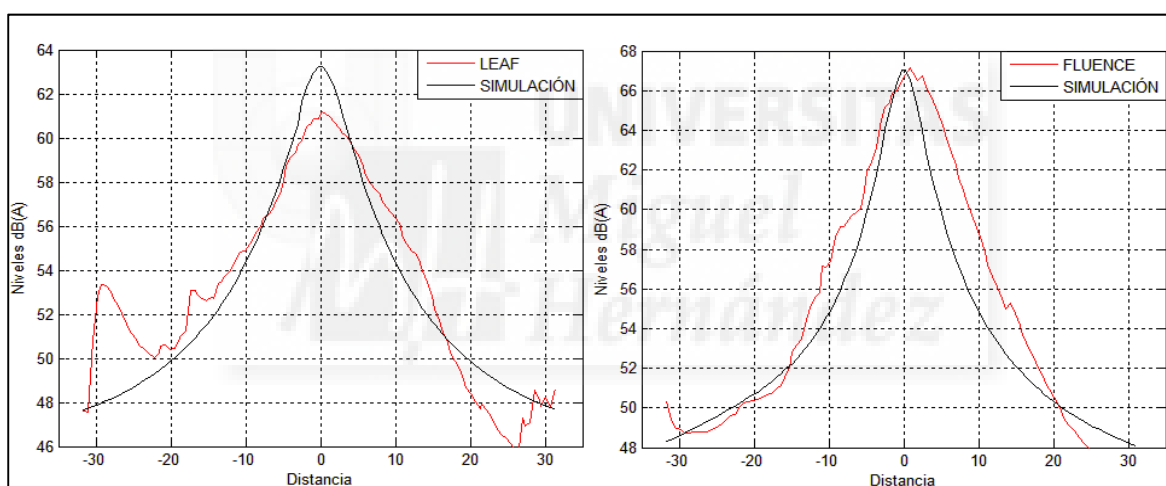


Figura 64. Resultado gráfico de la simulación a 20 km/h

El caso expuesto en la figura 64 la diferencia de niveles entre la simulación y los niveles medidos entran dentro del margen considerado de $\pm 1,5$ dB, validando así la simulación para identificar la aproximación de un vehículo a oídos de un peatón.

El ejemplo mostrado en la figura anterior de un vehículo eléctrico circulando perpendicular a la posición del peatón, variará en el caso de aplicarle el incremento de niveles que generarán los speakers con el warning sound. La diferencia respecto al caso anterior variará entre 0 y 2 dB para una velocidad de 20km/h dependiendo de los niveles de ruido de fondo siendo mayor para el caso de circular el vehículo a 10 km/h ya que los niveles aplicados por los speaker serán constantes, aunque en un futuro se plantea la posibilidad de

que los niveles generados por los warning sounds sean adaptativos al ruido de fondo.

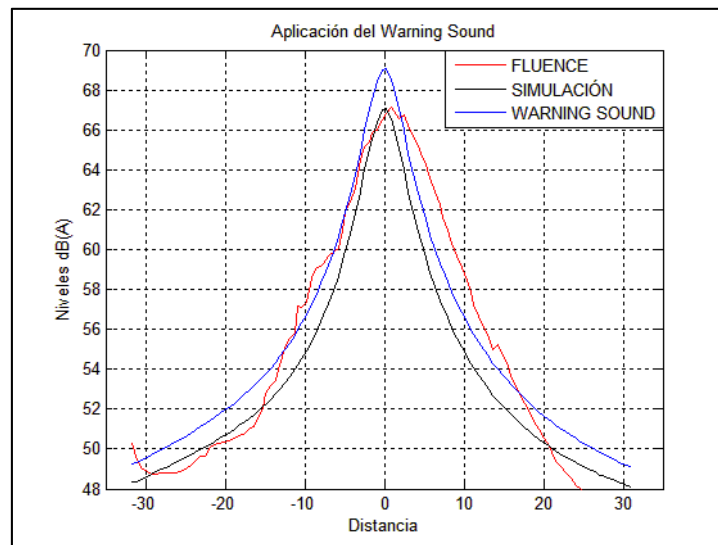


Figura 65. Resultado de la aplicación de los warning sounds en la simulación

El incremento de los niveles generados por los warning sounds provoca que el sujeto identifique la aproximación del vehículo de forma anticipada, provocando una detección más temprana del vehículo en movimiento. Esto se traduce en una ganancia de espacio de seguridad frente a la llegada de un vehículo reduciendo las posibilidades de que se generen situaciones de riesgo de atropello.

Al simular los diferentes escenarios y condiciones llevadas a cabo en el proyecto eVADER y contemplando un tiempo de reacción medio de 3 segundos para la detección del vehículo ante la aproximación según los datos aportados por Insa-Lyon, se ha extraído el umbral de percepción a partir del cual los niveles del vehículo son detectados y se han extrapolado a los mismos ensayos pero eliminando el warning sound.

Dicho umbral se sitúa en 8 dB por encima de los niveles de fondo en el momento del ensayo, el cual rondaban los 45 dB. Este dato de 8 dB de diferencia se ha basado en los valores extraídos del estudio de la detección de estos vehículos llevada a cabo por Rosenblum [82], donde se estudió de mediante los mismos ensayos la detección de vehículos híbridos circulando en modo eléctrico.



Figura 66. Instantánea de los ensayos experimentales del proyecto eVADER

La ganancia de distancia de seguridad al aplicar los warning sounds beneficia al peatón aumentando el tiempo de detección respecto a la llegada del vehículo, ampliando el margen para realizar maniobras a la hora de evitar un posible accidente. Si se quisiera evaluar la distancia de frenado del vehículo que puede ganarse al aumentar el tiempo de detección, debería tenerse en cuenta la siguiente expresión:

$$D_{Stop} = v \cdot t_r + \frac{v^2}{2 \cdot 9.81 \cdot C_f} \quad (52)$$

Donde:

v Es la velocidad del vehículo.

t_r Es el tiempo de reacción del conductor

C_f Coeficiente de fricción de la vía el cual varía normalmente en torno a 0,65 dependiendo de las condiciones bajo estudio.

Al evaluar los resultados para el caso estudiado, se ha observado que las distancias de frenado estimadas son menores al espacio entre el vehículo y el peatón una vez éste identifica su presencia. El aumento de la distancia de seguridad al emplear un warning sound con un tiempo de detección medio de 3 segundos sería un 14% dependiendo de la velocidad y el ruido de fondo.

Ha de puntualizarse que las mediciones se llevaron a cabo en ambientes controlados con niveles de fondo bajos, entre 42 y 48dB, posiblemente inferiores a los que se pueden encontrar en nuestras ciudades. En este apartado, el proyecto eVADER está planteando la adaptación de la emisión de los warning sound con el ruido de fondo aumentando sus niveles, debido al descenso de la efectividad de estas señales al aumentar el ruido ambiental.

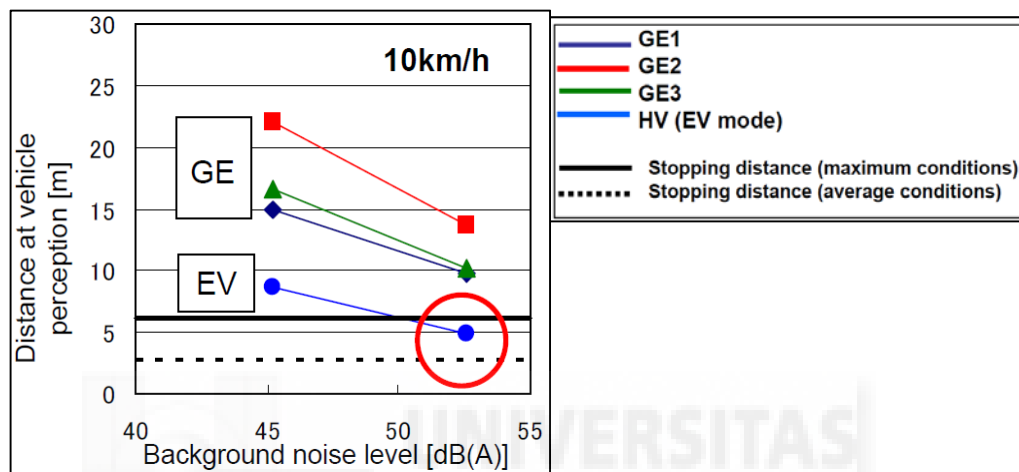


Figura 67. Umbral de seguridad en función de la detectabilidad del vehículo y el ruido de fondo [46]

Volviendo de nuevo a temas relacionados con la contaminación acústica y tras demostrar la necesidad de aplicar mecanismos de generación de ruido en los vehículos eléctricos, surge la cuestión de si estos vehículos han de estar emitiendo estos sonidos artificiales siempre que circulen.

Tal y como se ha mencionado en apartados anteriores el ruido de rodadura tiende a ser predominante para velocidades a partir de los 35 km/h, siendo éste un posible punto de desconexión de los sonidos de alerta. Con el fin de validar este punto de desconexión y asumiendo la restricción de no empeorar las condiciones acústicas en a los mapas de ruido, se ha elaborado el estudio de la repercusión del sonido de alerta para el caso evaluado en el apartado 6.3 de este trabajo.

La simulación se ha desarrollado comparando el paso de un caudal de vehículos ligeros frente a un caudal de vehículos eléctricos en diferentes condiciones de funcionamiento, empleando los sonidos de alerta en las condiciones impuestas por el Modelo Francés para flujos de tráfico superiores a 800 veh/h, con un caudal de tráfico constante y una distancia de la fuente de 10 metros.

En la siguiente figura se presenta una comparativa de los resultados generados por los vehículos eléctricos con la desconexión del sonido de alerta a 35 y 50 km/h respectivamente. Independientemente de la señal extra aplicada a los vehículos eléctricos, los niveles no rebasarían los provocados por los vehículos de propulsión térmica. Aún con esta afirmación y con la intención de contribuir a la seguridad del peatón e intentando contrarrestar los posibles ruidos de fondo que enmascaren el ruido del tráfico, se está barajando la posibilidad de desconectar los niveles a 50 km/h abarcando así la máxima velocidad considerada como urbana.

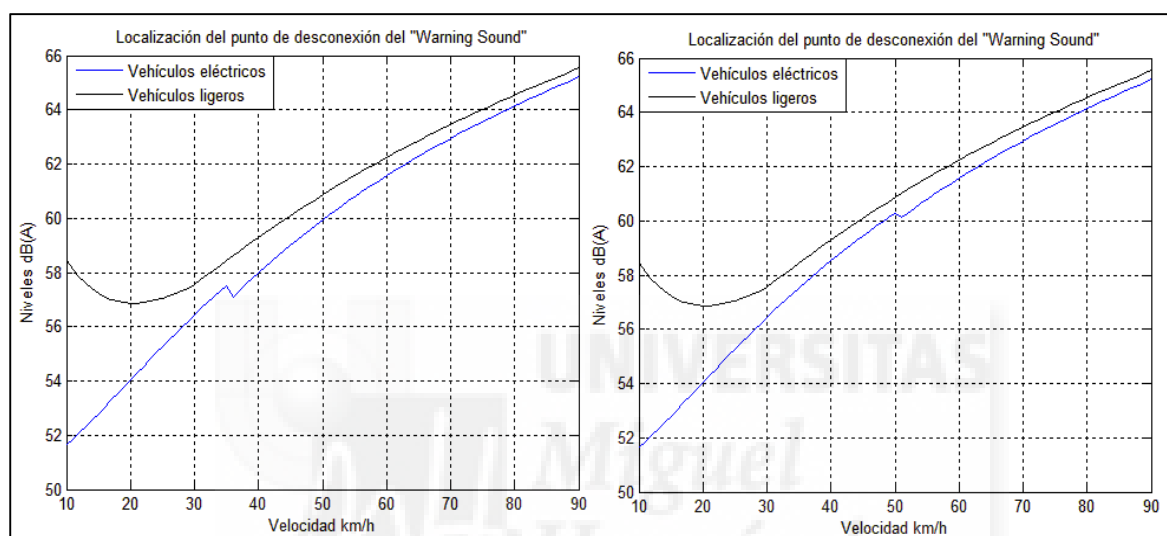


Figura 68. Simulación de la desconexión de los warning sound a 35 y 50 km/h

El desnivel que se aprecia en la gráfica anterior muestra el punto de desconexión de los sonidos de alerta, a partir de este punto los niveles de emisión sonora únicamente representan la rodadura.

7.4. Contribución de los sonidos de alerta en los mapas de ruido

Una vez evaluado el punto de desconexión de los warning sounds y el incremento que estos provocan sobre el ruido general del nuevo modo de propulsión, se ha estudiado la repercusión que este incremento de ruido puede ocasionar en los mapas de ruido.

Con el objetivo de evaluar las diferencias con los resultados obtenidos anteriormente sobre los mapas de ruido, se ha llevado a cabo el mismo procedimiento de análisis seguido en apartados anteriores aplicando los sonidos de aviso del proyecto eVADER.

Si recordamos los resultados de la simulación evaluada en el apartado 6.3, estos mostraban una reducción de los niveles generados por los vehículos eléctricos máxima de 1dB para valores por encima de los 50km/h obteniéndose niveles que podrían estar dentro de los límites de los valores propios generados por el propio vehículo.

Por el contrario para velocidades urbanas los niveles de ruido experimentan un descenso más acusado al aparecer estos vehículos, siendo en este el punto donde se espera que la aplicación de los sonidos de alerta no provoque un empeoramiento de las condiciones acústicas, al aumentar los niveles de ruido del vehículo eléctrico mediante la aplicación de una señal extra con una potencia de 80dB.

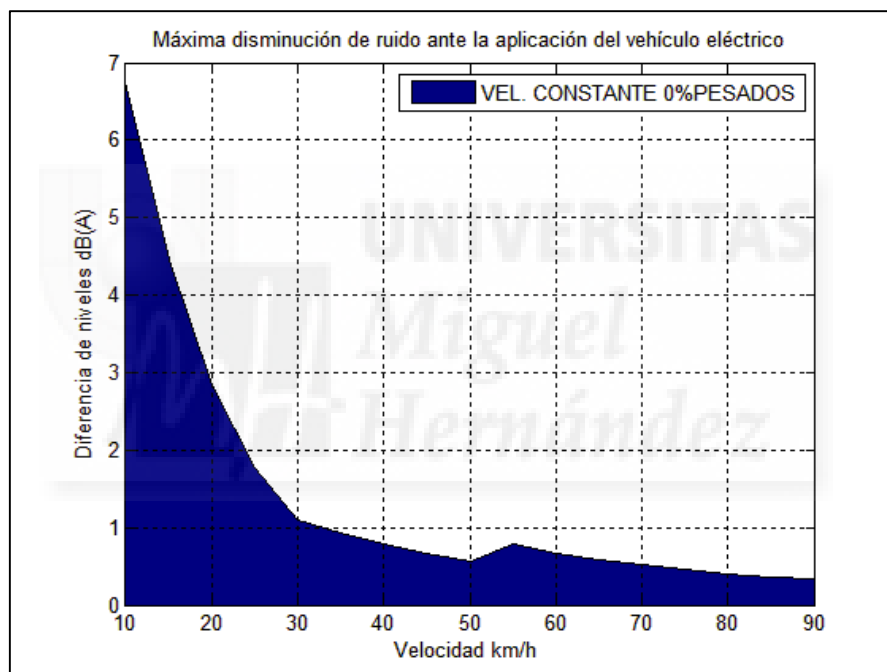


Figura 69. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico aplicando los warning sounds en ausencia de pesados

En la figura 69 se muestran los resultados tras aplicar un sonido de aviso genérico, sin propiedades específicas en cuanto a frecuencias, reduciendo las diferencias encontradas en apartados anteriores pero sin rebasar la actual situación de ruido independientemente de la velocidad a la que se desee circular y sin aplicar un caudal de tráfico de pesados.

Por otro lado si se tiene en cuenta que en la anterior simulación no se han tenido en cuenta los vehículos pesados como parte del flujo de vehículos en la vía, es posible asumir que la consideración de este tipo de vehículos más ruidoso por definición provocará que la diferencia de niveles sea menor. Al aplicar un caudal de un 5% de vehículos pesados, se

obtiene una diferencia de niveles a partir del porcentaje de vehículos eléctricos inferior, llegando a valores menores a 0,5dB a partir de los 50km/h.

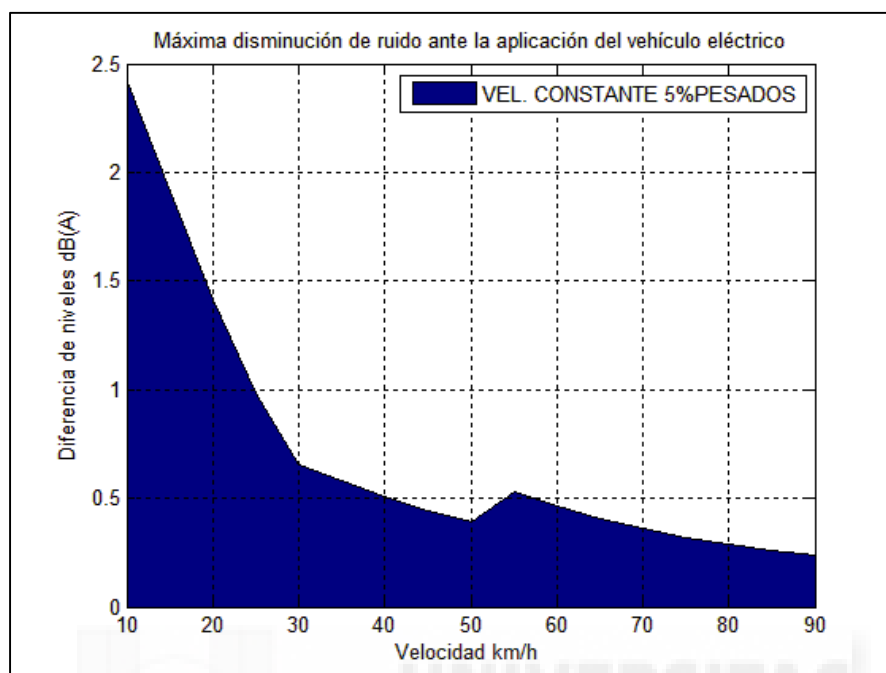


Figura 70. Descensos máximos por la aplicación del vehículo eléctrico aplicando los warning sounds con un 5% de pesados en circulación

Al finalizar esta parte del trabajo se ha comprobado que la reproducción de los warning sounds generados en el proyecto eVADER no produce un empeoramiento de la situación actual de los mapas de ruido, y a su vez dependiendo del ruido de fondo puede aumentar el tiempo de detección ante la aproximación de un vehículo por parte de los peatones.

7.5. Conclusiones

Una vez vista la necesidad de aumentar la percepción acústica de los vehículos eléctricos por parte de los peatones, se ha evaluado la repercusión del incremento de ruido aplicado a estos vehículos propuesta por el proyecto europeo eVADER.

Sin contemplar la excitación tonal de las diferentes señales diseñadas en este proyecto, la máxima aportación en el nivel equivalente sería de 2 dB(A) a 20 km/h, según los datos aportados por Insa-Lyon, los cuales extrapolados a las diferentes velocidades de circulación provocan unos niveles que en ningún caso superan a los actuales.

Para velocidades urbanas, esta herramienta de seguridad para los peatones funcionaría de manera eficiente, aumentando la distancia de percepción un 14% siempre y cuando los niveles de fondo sean inferiores a 50dB sin empeorar la situación acústica en los mapas de ruido.





8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente tesis doctoral aportan conclusiones del futuro comportamiento acústico de los vehículos eléctricos frente a los mapas de ruido.

Tras la fase experimental desarrollada sobre vehículos tanto eléctricos como térmicos destinada a evaluar y caracterizar los niveles generados por estos, se ha validado que el ruido generado por un vehículo eléctrico proviene únicamente del ruido generado por la componente de la rodadura de cara a su aplicación en mapas de ruido.

Al comparar estas mediciones con los valores extraídos de dos estándares europeos, se comprueba que la incursión de los vehículos eléctricos en los mapas de ruido puede ser generada asumiendo únicamente el ruido de rodadura según los ábacos de predicciones de estos modelos.

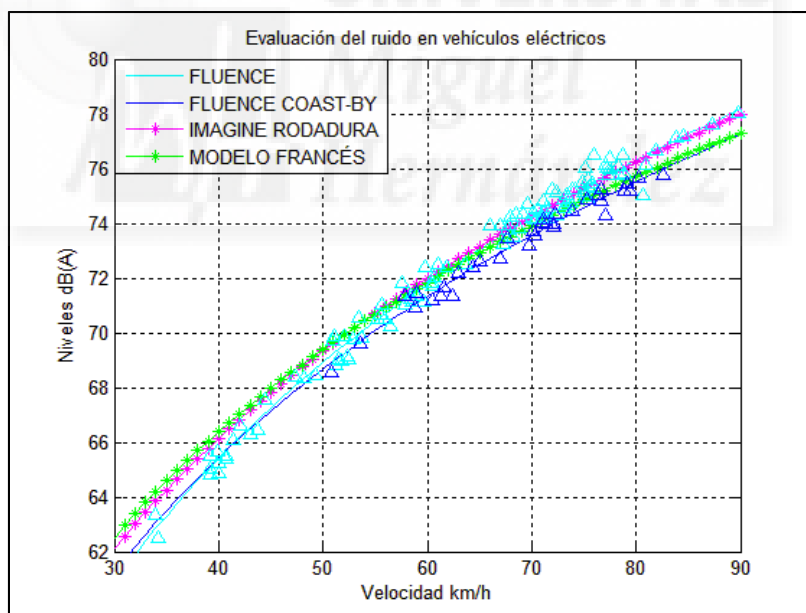


Figura 71. Niveles del vehículo eléctrico frente a los estándares internacionales estudiados

Tras la aplicación de los vehículos eléctricos en los mapas de ruido, se ha evaluado la repercusión de la aparición de estos vehículos silenciosos. Los descensos generados por esta nueva variable para una velocidad constante de 30km/h serían de un máximo de 2 dB, lo que traducido a un sector del mapa acústico del municipio de Elche, mejoraría en un 10% la población que recibiría los valores máximos permitidos por la legislación.

Del mismo modo para situaciones especiales donde el tráfico circule de forma “acelerada” los descensos pueden ser considerados muy positivos, observando las mejoras más significativas de forma instantánea e individual ante el paso de éstos vehículos frente a los peatones.

Esta reducción de los niveles de forma instantánea podría generar unas condiciones de peligro para a los peatones. Este problema pretende paliarse mediante la instalación de sistemas que reproduzcan señales adicionales sobre los vehículos eléctricos, mejorando la percepción y detectabilidad de la aproximación del vehículo al peatón.

En el caso de aplicar las señales sonoras diseñadas por la Universidad Insa-Lyon dentro del proyecto europeo eVADER, los niveles de ruido aumentarían un máximo de 2dB a 20km/h. Los efectos de dicho incremento se han comprobado bajo una adaptación del modelo NMPB ROUTES, sin empeorar la situación acústica actual frente a los mapas de ruido.

Tras estas conclusiones y con todo lo expuesto a lo largo del documento, el objetivo planteado al inicio de este trabajo ha sido alcanzado y justificado obteniendo como fruto unos resultados de gran interés científico y social.

8.2. Trabajos Futuros

El trabajo expuesto en este documento abre nuevas líneas de investigación que serán desarrolladas dentro de Laboratorio de Acústica y Vibraciones de la Universidad Miguel Hernández de Elche.

Como líneas futuras de carácter experimental se ha barajado la posibilidad de estudiar a baja velocidad los niveles de ruido generados por los vehículos eléctricos, reproduciendo los ensayos realizados por el proyecto eVADER. La finalidad de esta reproducción de los ensayos sería afianzar la caracterización del ruido del vehículo en velocidades puramente urbanas, ya que los ensayos desarrollados en la Universidad Miguel Hernández de Elche solo abarcaron velocidades por encima de los 30 km/h a una distancia de 7,5 metros.

Una vez reproducidos los ensayos y con la intención de reforzar las hipótesis tomadas para la simulación al evaluar el paso de un vehículo frente a un peatón, se estudiará la posibilidad de emplear el método desarrollado por Peral [66] para analizar la directividad sonora del vehículo a baja velocidad. A raíz de este trabajo será posible comprobar si es

correcto despreciar dicho parámetro en las condiciones empleadas en la simulación del paso de un vehículo eléctrico en velocidades bajas, estudiando si la huella acústica del vehículo variará al eliminar la componente de ruido generada por el motor.

En cuanto a las posibles ampliaciones del trabajo sobre mapas de ruido, pueden abrirse diversas líneas de investigación empezando por la adaptación del estudio al modelo de predicción común en la Unión Europea (CNOSSOS-EU), con el objetivo de trabajar con una herramienta de estudio lo más actualizada posible.

Por otro lado y teniendo en cuenta la evolución de la técnica respecto a la propulsión eléctrica, empiezan a existir vehículos industriales con propulsión eléctrica y por tanto debería plantearse la ejecución del estudio para este tipo de vehículos. La aplicación de la propulsión eléctrica en estos vehículos generará un descenso de los niveles en un abanico más amplio de velocidades que el generado en vehículos ligeros.

Por otro lado y asumiendo que en los mapas de ruido únicamente se evalúan niveles de ruido globales independiente de la fuente que provenga, se planteará abrir una rama de investigación que evalúe el confort acústico dentro de los mapas de ruido. Dicho parámetro no se refleja en los mapas por su alta relatividad, pudiendo ser un valor añadido a la información extraída en diferentes condiciones de tráfico como atascos, zonas acústicamente protegidas, etc... así como a la hora de usar los futuros “warning sounds” en los vehículos eléctricos.

Por último y contemplando que en la irregularidad del tráfico es donde el vehículo eléctrico presentará mayores beneficios, se plantea como trabajo futuro la adaptación del modelo para la evaluación de cambios de orden de marcha en situaciones concretas como semáforos o cruces de vías a partir de tiempos de circulación.



9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARANA, M. GARCIA, A. A social survey on the effects of environmental noise on the residents of Pamplona, Spain. *Applied Acoustics* 53(1998) 245-253.
- [2] ARANA, M; PEREZ, D; NAGORE, I; SAN MARTIN Using Noise Mapping to Evaluate the Percentage of People Affected by Noise. *Acta united with Acustica* Vol 95 (2009) 550-554.
- [3] AUSEJO, M.; RECUERO, M.; ASENSIO, C.; PAVÓN, I.; LÓPEZ, J.M. Study of precision, deviations and uncertainty in the design of a Strategic Noise Map. Case study: Macrocenter of the City of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Modeling and Assessment* (2010), Vol. 15:125-135.
- [4] AZZURRO, A.; ERCOLI, L.; NAMUZ, F. Una revisión de modelos predictivos de ruido urbano. *Tecniacústicas Madrid* 2000.
- [5] BARELDS ,R.; NOTA,R.; VAN MAERCKE D. Harmonoise WP 3 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, (2005).
- [6] BERANEK, L. *Acoustical Measurements*. Acoustical Society of America. Cambridge, USA. 1988.
- [7] BERANEK, L; VÉR, I. *Noise and Vibration Control Engineering*. John Wiley & Sons. New York, USA. 1993.
- [8] BERNHARD, R; WAYSON, E. “An introduction to tire pavement noise”. USA, 2005.
- [9] BESNARD, F.; BÉRENGIER,M.; DOISY, S.; FÜRST N.; HAMET, J.F.; LELONG, J.; PALLAS, M.A. The procedure for updating the vehicle noise emission values of the French “Guide du Bruit. Euronoise 2003. Naples.
- [10] BLOKLAND, G.; PEETERS B. Modeling the noise emission of road vehicles and results of recent experiments. *Internoise 2009*. Ottawa (Canada).
- [11] BUTTERWORTHS, *Transportation Noise Reference Book*. Edited by Paul Nelson,1987. London.
- [12] CALCULATION OF ROAD TRAFFIC NOISE (CRTN). Department of Transport and the Welsh Office. HMSO, 1988.

- [13] CALVO, J.A.; SAN ROMÁN, J.L.; ÁLVAREZ C.; QUESADA, A. Influencia de los Parámetros de Conducción en el Ruido Emitido por un Automóvil en el Tráfico Urbano. XIX CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA Castellón 2012.
- [14] CAMMARATA, G.; CAVALIERI, S.; FICHERA A. A Neural Network Architecture for Noise Prediction. *Neural Networks*, Vol. 8 No6. 963-973. 1995.
- [15] CAMPELLO, H; CAMPILLO, N; PERAL, R.; VELASCO, E. Localización de fuentes de ruido de un vehículo automóvil sobre un plano absorbente mediante intensidad acústica. IX CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA-CIBIM9, Las Palmas de Gran Canaria, España (2009).
- [16] CAMPILLO DAVÓ, N; PERAL ORTS, R.; VELASCO SÁNCHEZ, E. Global review of tyre-road noise assessment methodologies. *Internoise 2008*, Shanghai.
- [17] CAMPILLO, N. Modelización experimental del ruido de rodadura en ensayos de homologación de neumáticos. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche (2013).
- [18] CAMPILLO, N; PERAL, R.; VELASCO, E; CAMPELLO, H. An experimental procedure to obtain sound power level of tyre/road noise under Coast-By conditions. *Applied Acoustics* 74 (2013). p.p 718-727.
- [19] CÁRDENAS, J. Diseño y Desarrollo de una Herramienta Informática Simple para la Predicción de Ruido de Tráfico Vehicular en Vías Urbanas de la Ciudad de Valdivia-Chile. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid (2004).
- [20] DE COENSEL, B. Introducing the temporal aspect in environmental sound space research. PhD dissertation (ISBN 978-90-8578-133-2) Ghent University, Belgium 2007.
- [21] DECRETO 141/2012, de 30 de octubre, por el que se regulan las condiciones mínimas de habitabilidad de las viviendas y la cédula de habitabilidad.
- [22] DECRETO 19/2004 de la Generalitat Valenciana, por el que se establecen normas para el control del ruido producido por los vehículos a motor. DOGV 4694, 18/2/2004.
- [23] DIRECTIVA 2001/43/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 27 de junio de 2001 sobre los neumáticos de los vehículos de motor y de sus remolques así como de su montaje.

- [24] DIRECTIVA 2007/34/CE DE LA COMISIÓN de 14 de junio de 2007 por la que se modifica, a efectos de su adaptación al progreso técnico, la Directiva 70/157/CEE del Consejo, sobre el nivel sonoro admisible y el dispositivo de escape de los vehículos de motor.
- [25] DIRECTIVE 2002/49/CE of the European Parliament and Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise.
- [26] DUTILLEUX, G.; DEFRANCE, J.; ECOTIÈRE, D.; GAUVREAU, B.; BÉRENGIER, M.; BESNARD, F. DUC, E.L. NMPB-Routes-2008: The Revision of the French Method for Road Traffic Noise Prediction, Acta Acustica united with Acustica. 96 (2010) 452-462
- [27] Encuesta Europea de Salud en España 2009. Instituto Nacional de Estadística Noviembre 2010.
- [28] Estrategia integral para el impulso del vehículo eléctrico en España. Febrero 2010.
- [29] Estudio de Mercado sobre el Coche Eléctrico en España y Finlandia. Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Helsinki. Noviembre 2010.
- [30] eVADER: Electric Vehicle Alert for Detection and Emergency Response. Seventh Framework Programme. Specific safety issues of electric vehicles.
- [31] FAVRE, B. Noise emission of road vehicles: evaluation of some simple models. Journal of Sound and Vibration Cap (10). 1983.
- [32] FHWA Traffic Noise Prediction Model (FHWA-RD-77-108)
- [33] GILBERT, D. Noise from Road Traffic (Interrupted Flow). Journal of Sound and Vibration 51. pp 171-181. 1977
- [34] Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure. European Commission Working Group. Assessment of Exposure to Noise (WG-AEN). Position Papes. Version 2. 13th Jan. 2006.
- [35] Guide De Bruit Des Transports Terrestres. Prevision Des Niveaux Sonores. Ministere de l'environnement et du cadre de vie, Ministere des transports, November 1980.
- [36] HARRIS C. Manual de Medidas Acústicas y Control de Ruido, McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A. (ed.), 3ra edición, 1998.

- [37] IGLESIAS, C; DIAZ-BALTEIRO; L. Noise pollution mapping approach and accuracy on landscape scales. *Science of the Total Environment* 449 (2013) pp 115-125.
- [38] IMAGINE CONSORTIUM, *Imagine project*, (2008).
- [39] *Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles*. National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 811 204, Sept. 2009.
- [40] ISO 10844, *Acoustics – Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres*. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2011.
- [41] ISO 11819-1, *Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: “The Statistical Pass-By Method”*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997.
- [42] ISO 11819-2, *Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: “The Close Proximity Method”*. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2000.
- [43] ISO 13325, *Tyres – Coast-by methods for measurement of tyre-to-road sound emission*. International Organisation for Standardization, Geneva, Switzerland, 2003.
- [44] ISO 3744, *Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure – Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane*, International Organization for Standardization 1994.
- [45] ISO 9613-1:1996 “Acoustics-Attenuation of sound during propagation outdoors- Part 1: Calculation of atmospheric absorption”. Genève, Suiza. 1993
- [46] JASIC “A Study on Approach Audible System for Hybrid Vehicle and Electric Vehicles – Second
- [47] JASIC, “A Study on Approach Warning Systems for hybrid vehicle in motor mode.” Informal document N° GRB-49-10 (49th GRB, 16-18 February 2009), GRB, WP29, ECE, Geneva, Switzerland.
- [48] JASO 1981, *Test procedures for tire noise*. Japanese Automobile Standards Organization, C606-81.
- [49] JONES, R.R.K.; WATERS, D.M. Traffic noise annoyance near light controlled intersections. *Applied Acoustics* 14, 7-13. 1981

- [50] JRAIW, K. S. Applied Acoustics 21. A Computer Model to Assess and Predict Road Transport Noise in Built-up Areas. 147-162. 1987,
- [51] JRC European Commission, Workshop on Selection of common noise assessment methods in EU, (2009).
- [52] JRC, IHCP, Common Noise Assessment Methods in EU (CNOSOS-EU), Draft JRC Reference Report (2010) 1-131.
- [53] KEPHALOPOULOS, S.; PAVIOTTI, M. Advancement in the development of European common noise assessment methods: where are we? (2009).
- [54] KING, E.A; RICE, H.J. The development of a practical framework for strategic noise mapping. Applied Acoustics 70 (2009) p.p 1116-1127.
- [55] KRAGH, J.; PLOWSING, B.; STOREHEIER, S.; TARALDSEN, G.; JONASSON, H.; SAARINEN, A. Nord2000, Comprehensive Outdoor Sound Propagation Model. 2006.
- [56] LAWRENCE, A. Y BURGESS, M. Measurement of Traffic Noise Shielding Provided by Buildings. Applied Acoustics 13 pp 211-225, 1980.
- [57] LEY 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido
- [58] LICITRA, G; ASCARI, E; BRAMBILLA, G. Comparative analysis of methods to evaluate noise exposure and annoyance of people. 20th International Congress on acoustics, ICA 2010
- [59] Manual de procedimiento de inspección de las Estaciones I.T.V. La inspección técnica de vehículos. Revisión 5ª. Junio de 2006, Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.
- [60] Medio Ambiente en España 2006. Ministerio de Medio Ambiente.
- [61] Memoria sobre Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente en España 2011. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. 2012.
- [62] MIYARA, F. Modelización del ruido de tránsito automotor, modelos físicos determinísticos y estadísticos. Curso Universidad Austral de Chile. Valdivia. 1999.
- [63] NELSON, P. Transportation noise reference book. Butterworths-Heinemann, 1987.
- [64] NFS 31-119-2, Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – Procédure « Véhicules Maîtrisés ». National French Standard, AFNOR, Paris. 2001.

- [65] PEETERS, B; VAN.BLOKLAND, G. The noise emission model for European road traffic. Deliverable 11 of the IMAGINE project, IMA55TR-060821-MP10. January 11th. 2007.
- [66] PERAL, R. Directividad sonora horizontal de un vehículo automóvil circulando a alta velocidad. Tesis Doctoral. Universidad Miguel Hernández de Elche (2009).
- [67] PERAL, R.; VELASCO, E; CAMPILLO, N; CAMPELLO, H; GAJA, E. Análisis del comportamiento sonoro de los vehículos inspeccionados en las estaciones ITV's de la Comunidad Valenciana. Tecniacústica 2013, Valladolid.
- [68] Plano de saturación de la red carreteras de alicante del trafico 2011. Ministerio de Fomento.
- [69] Política futura de lucha contra el ruido. Libro Verde de la Comisión Europea. ES/11/96/03030100.P00. Bruselas, 1996.
- [70] Prévision du bruit Routier: Guide Méthodologique, Sétra, Bagneux, 2009
- [71] PRIEDE, T. Effects of operating parameters of sources of vehicles noise. Symposium on Noise in transportation. University of Southampton 1974.
- [72] Quieter Cars and the safety of blind pedestrians: phase 1. National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 811 304, April 2010.
- [73] RADWAN, M.M.; OLDHAM D.J. The Prediction of Noise from Urban Traffic Under Interrupted Flow Conditions. Applied Acoustics 21 1987.
- [74] REAL DECRETO 104/2006, de 14 de julio, DOGV nº5.305 del 14 de julio de 2006, del Consell, de planificación y gestión en materia de contaminación acústica.
- [75] REAL DECRETO 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas.
- [76] REAL DECRETO 294/2013, de 26 de abril, por el que se regula la concesión directa de subvenciones para la adquisición de vehículos eléctricos en 2013, en el marco de la Estrategia integral para el impulso del vehículo eléctrico en España 2010-2014.
- [77] REPORT." Informal document N° GRB-50-08 (50th GRB, 1-3 September 2009), GRB, WP29, ECE, Geneva, Switzerland.
- [78] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, Ausgabe. Bundesminister für Verkehr, Deutschland. 1990.

- [79] ROAD NOISE PREDICTION 1 - Calculating sound emissions from road traffic Sétra. Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements june 2009
- [80] ROAD NOISE PREDICTION 2 - Noise propagation computation method including meteorological effects (NMPB 2008). Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements june 2009
- [81] RODRIGUES, J.; DOMMES A.; CAVALLO V; VIENNE, F. "Etudier la traversée de rue en environnements virtuels : Informations auditives et sentiment de présence", 3e colloque francophone international du GERI COPIE, Salon de Provence, France, 2011.
- [82] ROSENBLUM, L. D. Testing the audibility of quiet cars. Presentation at the National Highway Transportation Safety Administration Public Forum on Quiet Cars, 23rd June 2008.
- [83] SAE Standard J2889-1: "Measurement of minimum noise emitted by road vehicles," ISSUED 2011-SEPT-21e-VADER
- [84] SANDBERG, U. Possibilities to replace outdoor Coast-by tyre/road noise measurements with laboratory drum measurements. SILENCE project. Milestone Report C.MS8.2005.
- [85] SANDBERG, U. The multi-coincident peak around 1000 Hz in tyre/road noise spectra. Proceedings of EURONOISE 2003. Naples, Italia.
- [86] SANDBERG, U. Tyre/road noise – Myths and realities. Proceedings of INTER-NOISE 2001. La Haya, Holanda.
- [87] SANDBERG, U.; EJSMONT, J.A. Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, Sweden, 2002.
- [88] SATO,T.; YANO,T.; BJÖRKMAN,M.; RYLANDER, R. Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level. Journal of sound and vibrations 223, 775-784. 1999.
- [89] SCHULTZ, T.J. Synthesis of social surveys on noise annoyance. Journal of Acosut.Coc.Am 64 (1978) 377-405.
- [90] SHILTON, S.; VAN LEEUWEN, H.; NOTA, R. Error propagation analysis of XPS 31-133 and CRTN to help develop a noise mapping data standard. 2007

- [91] Temario General de la ESTT- OEP 2011 Especialidad: Gestión del Tráfico y Movilidad
- [92] TORIJA, A.J; RUIZ, D.P; RAMOS, A. obtaining of factor to describing the anomalous sound events in Traffic noise measurements. In proceedings of the 19th International Congress on Acoustics 2007, Madrid, Spain.
- [93] UNE-EN 1793-3:1998 Road traffic noise reduction devices. test method for determining the acoustic performance. Part 3: Normalized traffic noise spectrum.
- [94] VAN DER HEIJDEN, L.A.M; VAN SON, R.J.J.H. A note on the neglect of the Doppler effect in the modeling of traffic flow as a line of stationary point sources. Journal of Sound and Vibration. Vol 85 (3), pp 442-444. 1982.
- [95] VAN MAERCKE, D. Harmonoise. Programming the Point-To-Point Propagation Model, (2004).
- [96] Vorläufige Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm (VBEB) :Preliminary calculation method for determining the exposure figures caused by environmental noise. Federal German Gazette of 20th April 2007; p.4, 2007.
- [97] XPS31-133 Bruit des infrastructures de transport terrestre, Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques,

