

Influencia de los Parámetros de Conducción en el Ruido Emitido por un Automóvil en el Tráfico Urbano

J.A. Calvo Ramos(1), J.L. San Román García, C. Álvarez Caldas, A. Quesada

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad Carlos III de Madrid
jacalvo@ing.uc3m.es

El ruido de tráfico es una de las principales fuentes de contaminación acústica en las grandes ciudades. Uno de los retos tecnológicos actuales es lograr un ambiente acústico sostenible en una sociedad en constante crecimiento. La legislación limita el nivel sonoro que puede emitir un determinado vehículo a un valor máximo, de acuerdo con un protocolo de ensayo establecido en la Directiva 70/157/EEC.

Los niveles admisibles por la Directiva en sus sucesivas modificaciones se han ido reduciendo de forma gradual, sin embargo, esta reducción no ha afectado al sonoro global. Una razón es que el ensayo establecido por la Directiva no es representativo de las condiciones reales de tráfico urbano.

En este trabajo se ha instrumentado una muestra representativa de vehículos, con objeto de medir las variables relacionadas con la conducción que pueden influir con los niveles de emisión sonora. Mediante un GPS, se ha registrado la posición (longitud y latitud), velocidad, aceleración longitudinal y el tiempo de circulación. A través del CAN BUS del vehículo se ha registrado el régimen de giro del motor, la carga, la posición del acelerador y la marcha engranada. Por último, mediante una serie de micrófonos se ha medido el ruido generado por el motor y el debido a la rodadura.

Se ha diseñado un circuito representativo de la circulación en una gran ciudad como Madrid. Se ha seleccionado una muestra de conductores con diferentes niveles de experiencia y de diferentes sexos para que circularan por el circuito con los diferentes vehículos. Se han registrado los parámetros indicados anteriormente durante la circulación por el circuito a diferentes horas y días de la semana con objeto de obtener una muestra de datos estadísticamente representativa.

Se han establecido correlaciones entre el nivel de ruido equivalente con los parámetros de conducción, tipo de vehículo y conductor. Todo ello ha permitido establecer el nivel de ruido promedio producido por un vehículo en condiciones reales de circulación y la posibilidad de identificar formas de conducir que generan mayores niveles de emisiones sonoras y su relación con parámetros relativos al vehículo.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido es uno de los agentes contaminantes que afecta a un mayor porcentaje de población. Se estima que el 20 % de la población europea sufre niveles de ruido considerados inaceptables, y que otro 45 % vive en áreas donde el ruido causa una molestia severa [1]. Casi la mitad del ruido en zonas urbanas (un 47 %) proviene del tráfico rodado [2]. Uno de los retos tecnológicos actuales es lograr un ambiente acústico sostenible en las grandes ciudades sometidas a un crecimiento continuo.

La legislación actual limita el nivel sonoro que puede emitir un determinado vehículo a un valor máximo, de acuerdo con un protocolo de ensayo establecido en la Directiva 70/157/EEC [3] y que depende de la categoría del mismo. Este nivel máximo de homologación ha ido reduciéndose con el paso del tiempo, pero a pesar de los esfuerzos realizados para reducir las emisiones sonoras de los automóviles, los niveles de ruido globales no ha disminuido en igual medida. Una razón es debida al crecimiento de la flota de vehículos que hace que aunque la fuente sonora tenga menos nivel, existen más fuentes contaminando que contribuyen al nivel global. Otra razón importante es que el método para determinar el nivel sonoro emitido por un vehículo en el ensayo de homologación establecido en la Directiva es poco representativo de las condiciones reales de circulación de un vehículo en condiciones de tráfico urbano.

Para determinar el nivel de emisión sonora de un vehículo de forma que reproduzca las condiciones reales de circulación urbana, es necesario establecer los parámetros de conducción principales que pueden influir en el ruido emitido. El objetivo es muy ambicioso si se considera que, el conductor, su estilo de conducción, el tipo de tráfico, el tamaño y el tipo de vehículo, las condiciones del tráfico, etc, son factores que pueden influir de manera decisiva en las emisiones sonoras. En primer lugar, es necesario establecer los parámetros que pueden tener más influencia en las emisiones sonoras [4]. A continuación se ha seleccionado una muestra representativa de vehículos y conductores con el fin de extraer los valores estadísticos que representan el comportamiento de un conductor promedio [5]. Finalmente, se ha seleccionado un circuito urbano que representa una condición de conducción promedio de tráfico en una gran ciudad.

Todos los conductores han realizado el tipo de conducción que utilizan normalmente, en sus desplazamientos urbanos. Un conductor experto se ha comprometido a conducir de manera agresiva con el fin de comparar sus parámetros de conducción y las emisiones de ruido con los anteriores. Esto permitirá identificar el comportamiento de conducción que tiene más influencia en las emisiones sonoras y qué parámetros del vehículo son capaces de detectar este modo de conducción.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

En este apartado, se van a describir los criterios utilizados para seleccionar los vehículos, conductores y el circuito utilizados en el estudio.

2.1. Selección de la Muestra de Vehículos

Sólo se han utilizado vehículos de turismo. Este tipo de automóviles se clasifican en diferentes segmentos en función de su tamaño, lo cual tiene correspondencia con su nivel de potencia, refinamiento y por supuesto su precio.

Se ha analizado la flota de vehículos en España con objeto de seleccionar una muestra representativa de los vehículos que tienen mayor presencia en las vías urbanas [6]. Con este criterio se han seleccionado las siguientes categorías:

- Segmento B (automóviles compactos): Este segmento se corresponde con un 30% de la flota española en 2010.
- Segmento C (automóviles de tamaño medio): Este segmento se corresponde con un 29% de la flota española en 2010.
- Segmento D: este segmento se corresponde con un 15% de la flota española en 2010.

El resto de segmentos tienen un menor impacto en el tráfico urbano por lo que su contribución al nivel sonoro global se considera poco representativo comparado con los anteriores. Para cada uno de los segmentos se ha seleccionado un vehículo con motor de encendido por compresión y otro con motor de encendido provocado. Las marcas y modelos seleccionados así como las características de los mismos se resumen en la *Tabla 1*.

Muestra	Vehículo	Segmento	Motor	Cilindrada	Masa	Neumáticos
V1	Seat Ibiza	B	Diesel	1598 cm ³	1170 kg	185/60 R14
V2	Seat Ibiza	B	Gasolina	1390 cm ³	1049 kg	185/60 R15
V3	VW Golf	C	Diesel	1968 cm ³	1314 kg	205/55 R16
V4	Opel Astra	C	Gasolina	1598 cm ³	1373 kg	205/55 R16
V5	Audi A4	D	Diesel	1968 cm ³	1475 kg	215/55 R16
V6	Mercedes C180	D	Gasolina	1796 cm ³	1485 kg	225/40 R18

Tabla 1.- Características de los Vehículos Seleccionado

2.1. Selección del Circuito

Los criterios para seleccionar el circuito han sido los siguientes:

Representatividad: De acuerdo con el informe " Research for the Sustainable Mobility " [7], de la Comisión Europea de Energía y Transportes, más del 75% de la población de la Unión Europea vive en zonas urbanas y alrededor de una quinta parte de todos los recorridos son desplazamientos urbanos. El circuito elegido deberá ser representativo del recorrido promedio que cubre un conductor en sus desplazamientos diarios en vías urbanas. Se trata del 80% de los movimientos en una gran ciudad y por lo tanto tienen un alto impacto en la contaminación acústica. El mismo informe concluye que el promedio del recorrido de un conductor en vías urbanas se sitúa entre 8 y 12 km. Estos datos se han tenido en cuenta para la selección del circuito

Densidad de Tráfico: Los niveles de tráfico en el área seleccionada deberán ser elevados, pero sin llegar al colapso lo que se traduciría en velocidades de circulación poco representativas.

Emisiones de Nivel Sonoro: El área ha sido elegida de acuerdo con el "Mapa Estratégico de Ruido de la Ciudad de Madrid" [8], elaborado por el ayuntamiento de la Ciudad. Se ha tratado de asegurar que la población de la zona elegida sufre una alta emisión de ruido debido a los niveles de tráfico.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores, se ha seleccionado el distrito de "Carabanchel" para ubicar el circuito. Dentro del distrito y de acuerdo con los mapas de ruido disponibles, el circuito se ha definido siguiendo las líneas de mayores niveles de presión sonora equivalente. En la Figura 1 se representa el nivel de ruido continuo equivalente para el día en el área elegida. Las líneas rojas representan mayores niveles sonoros. La línea de trazos indica el circuito elegido.



Figura 1.- Circuito Seleccionado en el distrito de Carabanchel (Madrid)

El circuito seleccionado tiene un nivel de ruido continuo equivalente de día entre 70 y 75 dB (A) y una densidad de tráfico entre 20.000 y 40.000 vehículos por día. Incluye zonas limitadas, por lo general, a 50 km/h, pero algunas secciones están limitadas a 30 km/h (20% del recorrido). El 50% del circuito discurre por vías de dos carriles por cada sentido, y el otro 50% transcurre por vías de un carril por sentido. El circuito es circular y tiene una longitud de 8.500 metros. Cuenta con 25 semáforos y 3 rotondas.

Los ensayos han sido realizados de forma aleatoria por los diferentes conductores, que han circulado teniendo en cuenta las condiciones del tráfico existentes en cada momento. Las pruebas se han llevado a cabo a diferentes horas (mañana y tarde) y en distintos días de la semana.

2.2. Criterios de Selección de los conductores

Los ensayos se han realizado por veintiún conductores diferentes. La muestra ha sido seleccionada con el fin de cubrir los diferentes tipos de conductores en función de sus habilidades de conducción. La muestra ha sido como se indica:

- Cinco hombres con más de 5 años de experiencia. (Categoría A)
- Cinco hombres con menos de 1 año de experiencia. (Categoría B)
- Cinco mujeres con más de 5 años de experiencia. (Categoría C)
- Cinco mujeres con menos de 1 año de experiencia. (Categoría D)
- Un conductor profesional (para realizar una conducción agresiva). (Categoría E)

El conductor profesional realizará una conducción con un estilo agresivo para tratar de reducir el tiempo en realizar el recorrido. El resto de los conductores realizarán el circuito de la misma forma como lo hacen normalmente y teniendo en cuenta las condiciones de tráfico.

2.3. Equipo de Medida Utilizado

En la Figura 2 se muestran los equipos utilizados para registrar las variables en los diferentes ensayos. Se ha colocado un micrófono en el habitáculo del motor en las proximidades del conducto de admisión [9] y un segundo micrófono cerca de la rueda trasera en el lado contrario al tubo de escape [10].

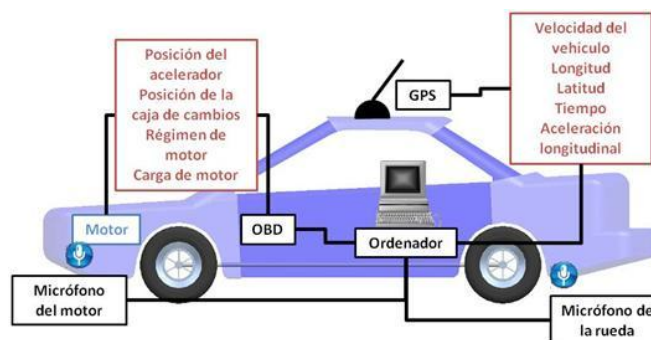


Figura 2.- Equipos de medida utilizados y parámetros registrados

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Parámetros relativos a la conducción

En este capítulo se analizarán los datos obtenidos, prestando especial atención a aquellos resultados que se han considerado significativos para definir los parámetros que permiten estimar las emisiones sonoras producidas por un vehículo en condiciones reales de circulación.

El primer parámetro estudiado es la velocidad del vehículo. Esta velocidad se ha registrado únicamente cuando el vehículo está en movimiento, por lo que no se ha considerado el tiempo que los vehículos permanecen parados a la hora de calcular los promedios de velocidad.

La Tabla 2 presenta la media (\bar{X}) y la desviación típica (σ) de la velocidad del vehículo a lo largo de la prueba. Para cada categoría de vehículo, la diferencia entre las velocidades medias de los diferentes conductores es pequeña (alrededor de un 7%), especialmente si se compara con la velocidad media del conductor agresivo, que difiere del resto alrededor de un 20%. Cuando el mismo conductor conduce diferentes vehículos, tampoco se observan diferencias significativas, estando esta variación por debajo del 6% incluso para el conductor agresivo. Esto indica que el tipo de vehículo no influye excesivamente en la velocidad media en un recorrido urbano.

Vehículo	Conductor A		Conductor B		Conductor C		Conductor D		Media A,B,C,D		Conductor E (agresivo)	
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
V1	30,1	16,0	29,3	14,3	28,9	14,1	28,8	14,8	29,3	14,8	36,1	19,8
V2	30,5	15,8	30,1	14,5	29,1	14,4	28,8	14,7	29,6	14,9	37,4	21,1
V3	30,8	16,2	29,9	14,3	28,7	15,1	28,6	15,3	29,5	15,2	36,8	22,1
V4	31,0	16,5	30,2	15,2	29,3	14,8	29,1	15,1	29,9	15,4	38,2	21,1
V5	31,2	16,9	28,9	15,3	28,1	15,3	27,9	15,2	29,0	15,7	38,5	21,4
V6	31,5	16,8	28,4	15,6	27,6	14,9	27,7	14,5	28,8	15,2	38,9	21,4
Media V1- V6	30,9	16,4	29,5	14,7	28,6	14,8	28,5	14,9	29,4	15,2	37,7	21,1

Tabla 2. Resultados estadísticos de la velocidad del vehículo (km/h)

Si se consideran todos los conductores y todos los vehículos, puede suponerse que la distribución de velocidades es una distribución normal. Así, la distribución de probabilidad de la velocidad del vehículo puede representarse como se muestra en la Figura 3 (izquierda). En el cálculo de esta distribución se han excluido los valores correspondientes al conductor agresivo, ya que sus parámetros no se corresponden con el valor promedio del resto de conductores.

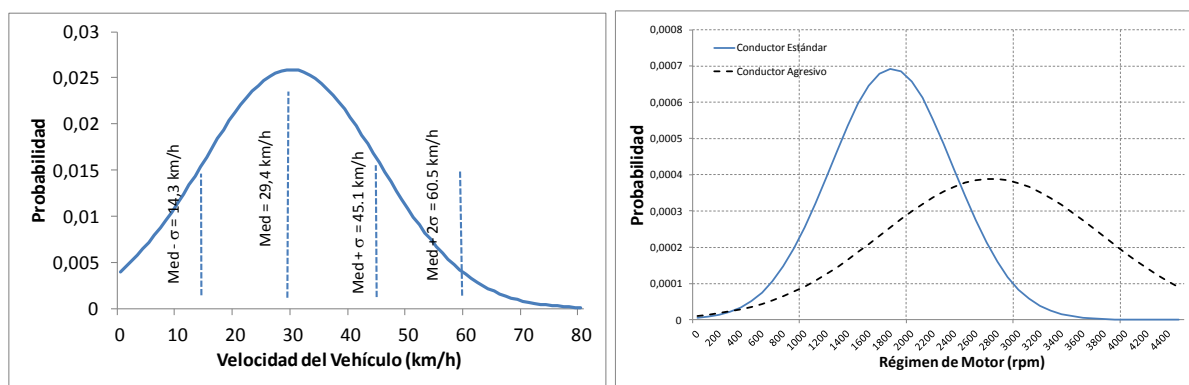


Figura 3.- Distribución de Probabilidad de la Velocidad del Vehículo y del Régimen de Motor

El promedio para los conductores con un comportamiento estándar (todos menos el agresivo) es de 29,4 km/h. Esto contrasta con el conductor agresivo, que alcanza un valor medio de 37,7 km/h (8,3 km/h mayor). Es importante destacar que para alcanzar la velocidad media de 29,4 km/h es necesario que los conductores superen la velocidad límite de la vía durante un 17% del trayecto. Los conductores noveles (categorías C y D) son algo más lentos (alrededor de un 7%) cuando conducen coches de gamas más altas que los conductores más experimentados. Los hombres con más de cinco años de experiencia (categoría A) son significativamente más rápidos que las demás categorías para cualquier gama de vehículo. Por otro lado, la variación de velocidad (desviación típica) es significativamente menor (30%) para el conductor estándar que para el agresivo. Esto significa que el estilo de conducción del conductor estándar es más suave.

Igual que se ha hecho con la velocidad del vehículo, se ha analizado el régimen de giro del motor. La Figura 3 (derecha) representa la media de todos los conductores y vehículos frente a la media del conductor agresivo con todos los vehículos. El valor medio para un conductor estándar es de 1800 rpm, con una desviación típica de 575 rpm, lo que se corresponde con la zona de máximo par motor y, por tanto, de mínimo consumo. En el caso del conductor agresivo, el valor medio es de 2750 rpm, con una desviación típica de 1026 rpm. En conductor estándar conduce en regímenes de motor menores y provoca menos variaciones de velocidad (conducción suave). El conductor agresivo conduce a regímenes más altos y provoca variaciones muy superiores de la velocidad (45% mayores que el conductor estándar). Este tipo de conducción incrementa el consumo de combustible y la emisión de contaminantes (tanto gases como ruido).

La *Figura 4* muestra el porcentaje del tiempo del trayecto en el que se ha circulado con cada marcha engranada. Se considera la media de todos los vehículos y conductores estándar frente a la media del conductor agresivo con todos los vehículos. Los conductores estándar prefieren la segunda y tercera marcha, mientras que el conductor agresivo (E) usa marchas más cortas, sobre todo la primera y la segunda.

El tiempo que los vehículos están parados es muy similar en todos los casos y depende principalmente de las condiciones del tráfico, de los semáforos, etc. El tiempo empleado en cambiar de marcha es ligeramente menor en el caso del conductor agresivo. Ambos valores son independientes del vehículo y del conductor si se analizan únicamente los conductores con comportamiento estándar.

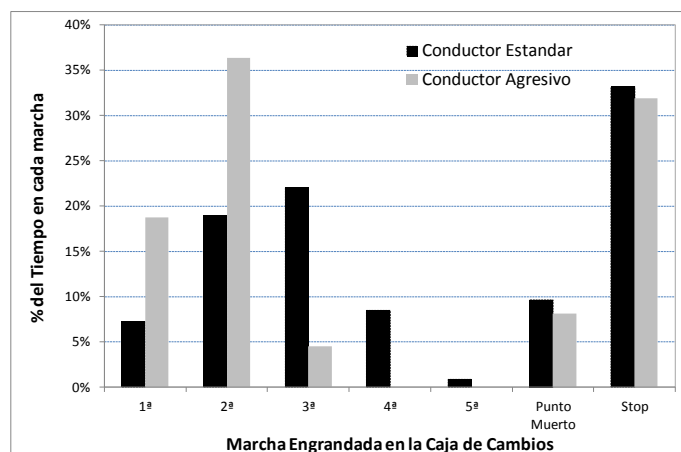


Figura 4.- Porcentaje de tiempo en cada relación de la caja de cambio durante el recorrido

3.2. Análisis del ruido emitido

Para analizar la influencia de los parámetros de conducción anteriores en el ruido emitido, se han estudiado los datos obtenidos mediante los dos micrófonos y se ha construido para cada combinación vehículo- conductor el gráfico $L_{eq,1s}$. Los valores que se muestran serán el promedio de los cuatro conductores (al que se ha llamado “Conductor Estándar”) y que se comparará con los valores obtenidos del conductor E (“Conductor agresivo”).

La *Figura 5* analiza la evolución del $L_{eq,1s}$ para el micrófono situado en el habitáculo del motor, tanto para el conductor estándar como para el conductor agresivo. La gráfica de la parte superior muestra los resultados para un vehículo con motor de encendido por compresión y la gráfica de la parte inferior para un vehículo de encendido provocado. Puede verse que el ruido emitido decrece cuando el vehículo está parado y se incrementa cuando acelera. Asimismo, resulta claro que el ruido del motor es mayor para un vehículo diesel que para uno de gasolina, especialmente cuando el motor está al ralentí.

En la *Figura 6* se muestran los resultados para los valores registrados por el micrófono de la rueda, comparando el conductor estándar con el conductor agresivo. De nuevo la gráfica superior muestra los resultados de un motor diesel y la inferior los de un motor gasolina. El ruido de rodadura emitido por el conductor agresivo es significativamente mayor que el ruido de rodadura emitido por el resto de conductores. No se han encontrado diferencias significativas entre el vehículo diesel y el de gasolina.

La *Tabla 3* compara los valores globales del L_{eq} . El análisis de los datos muestra que es posible, para un mismo vehículo, encontrar diferencias entre el conductor agresivo y los demás conductores. Esto indica que el estilo de conducción influye claramente en el nivel de ruido emitido. En el caso de un vehículo con motor de gasolina, el conductor agresivo produce alrededor de 9 dB más de ruido de motor que la media del resto de conductores y unos 4,7 dB más de ruido de rodadura. El ruido de motor y el de rodadura son similares para los conductores estándar, pero el conductor agresivo produce niveles de ruido de motor 3,6 dB mayores que el ruido de rodadura.

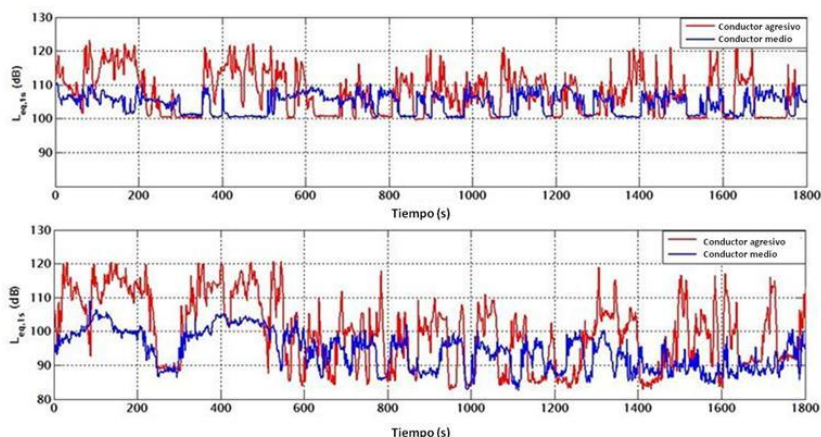


Figura 5. Resultados del gráfico $L_{eq,1s}$ para el ruido del motor - Diesel (arriba)/Gasolina (abajo)

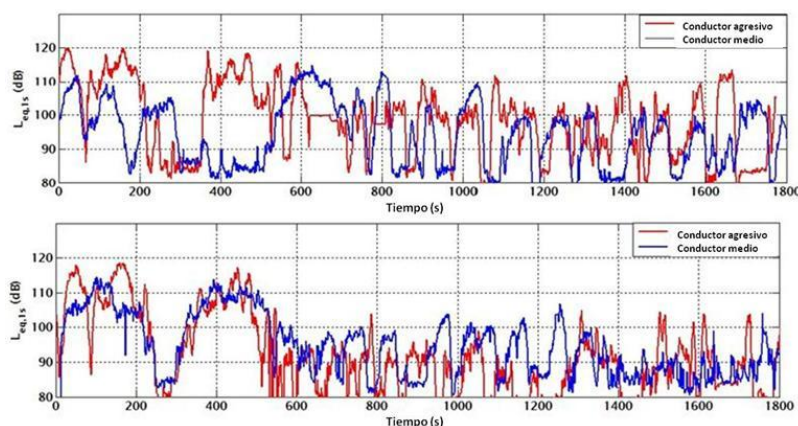


Figura 6. Resultados del gráfico $L_{eq,1s}$ para el ruido de rodadura - Diesel (arriba)/Gasolina (abajo)

Categoría de conductor	Motor gasolina		Motor diesel	
	Ruido del motor (dB)	Ruido de rodadura (dB)	Ruido del motor (dB)	Ruido de rodadura (dB)
A	103,2	104,5	107,9	106,8
B	102,6	103,5	106,9	106,9
C	102,2	102,6	106,8	105,9
D	102,3	102,5	106,6	105,6
Promedio (A, B, C, D)	102,6	103,4	107,1	106,3
E (Agresivo)	111,7	108,1	114,5	110,4

Tabla 3. Valores globales del ruido emitido para diferentes conductores

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado el comportamiento promedio de una muestra de vehículos y conductores en tráfico urbano real. Los resultados han permitido establecer un patrón que reproduce el comportamiento promedio de un “conductor estándar”, lo que permite definir criterios para diferenciar comportamientos especialmente contaminantes. Observando los resultados ante diferentes combinaciones de las variables de conducción, no se encuentran influencias apreciables de la experiencia del conductor o del sexo sobre los parámetros de conducción considerados o sobre el ruido emitido. Tampoco se ha encontrado una gran influencia del tipo de motor sobre los parámetros de conducción, pero sí sobre los niveles de

ruido emitido. En condiciones de conducción agresiva el ruido proveniente del motor es significativamente mayor, especialmente en el caso de vehículos de gasolina, por tener un límite de revoluciones mayor que los Diesel. Para regímenes de motor bajos y medios los motores de gasolina emiten menos ruido que los Diesel.

El estilo de conducción agresiva produce un escaso incremento de velocidad media y ligeros decrementos de la duración del trayecto. Para ello, el conductor agresivo necesitó duplicar el límite de velocidad prescrito para la vía. El ruido emitido en conducción agresiva es mucho mayor que los niveles alcanzados conduciendo con suavidad, por lo que se puede concluir que los beneficios de una conducción agresiva en tráfico urbano son ridículos en comparación con los inconvenientes ocasionados en el medio.

Como se ha podido ver, el nivel de emisión sonora puede ser entre 7 y 9 dB mayor para el ruido de motor y alrededor de 4 dB mayor para el ruido de rodadura si se conduce de forma agresiva. También se ha determinado que este tipo de comportamiento agresivo puede ser identificado tanto a partir del análisis de parámetros de conducción como parámetros sonoros.

A la vista de los resultados se podría proponer una nueva metodología de ensayo de homologación que siga la línea de la directiva de homologación de emisiones gaseosas, de modo que se consideren las velocidades de giro de motor y las posiciones de la caja de cambios que se emplean con mayor frecuencia en circulación urbana. Adicionalmente, instrumentando el habitáculo del motor con un micrófono, sería posible detectar a los conductores más ruidosos y emplear esa información para establecer restricciones de circulación en determinadas áreas de las ciudades.

5. REFERENCIAS

- [1] Steven, H., 2006. Practicalities of enforcing noise controls at the roadside or on vehicles. Deliverable H.D3. Project Silence. EC DG Research.
- [2] Affenzeller, J. and Rust, P., 2005. Road traffic noise- a topic for today and the future, VDA Technical Congress. Ingolstadt (Germany). March, 16th- 17th.
- [3] European Economic Community, 1970. Council Directive 70/157/EEC of 6 February 1970 on the approximation of the laws of the Member States relating to the permissible sound level and the exhaust system of motor vehicles. T. C. o. t. E. Communities.
- [4] Ochieng, W. Y., Quddus, M. A., and Noland, R. B., 2004. Integrated positioning algorithms for transport telematics applications. Institute of Navigation (ION). Annual Conference (California, USA).
- [5] Ericsson, E., 2000. Variability in urban driving patterns. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 5 (5), 337-54.
- [6] Asociación Nacional de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), 2009. Matriculaciones turismos y vehículos comerciales. Diciembre 2009.
- [7] Akerman, J., Banister, D., Dreborg, K., 2000. European Transport Policy and Sustainable Mobility.
- [8] Madrid, Ayuntamiento de, 2006. Mapa Estratégico de Ruido de la Ciudad de Madrid.
- [9] Sandberg, U., 2001. Noise emissions of road vehicles. Effect of regulations. Final Report 01-1, I-INCE WP-NERV.
- [10] Bendtsen, H., 1996. Test of noise reduction of road surfaces. Intelligent Transportation Systems. Proceedings. 2003 IEEE (1), 352-57 vol.1.

6. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos N° TRA2008-05654-C03-02 y TRA2008-05654-C03-03.