

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

# EVALUACIÓN DINÁMICA DEL RUIDO URBANO MEDIANTE MODELOS DE MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO

PACS no.: 43.50.Lj 43.50.Rq 89.40.Bb

José Luis Cueto Ancela  
Laboratorio de Ingeniería Acústica (Universidad de Cádiz)  
Edificio CASEM. Campus Río San Pedro  
Puerto Real (Cádiz). España  
Tel: 956 016 051  
E-Mail: joseluis.cueto@uca.es,

**Palabras Clave:** Ruido de tráfico, Modelos de micro simulación de tráfico, Planes de acción

## ABSTRACT

Urban traffic grows under two seemingly contradictory demands of society. The first one, which covers the need for an increase in the mobility of people and goods; and the second, demanding that all negative effects caused by traffic, such as accidents, traffic jams, environmental damage, the impact on health and the quality of life of the inhabitants of the city, be reduced until they are eradicated. Sustainability is the key. To help the sustainable development of the city, the proposed transport solutions can be analyzed with great advantages in light of the traffic microsimulation models. The idea is to show the advantages of the use of traffic microsimulation models to search for sustainable solutions in terms of mobility and environmental noise. Finally, a bibliographic review of the research lines related to the dynamic traffic noise evaluation was carried out to show some practical applications in noise action plans and also to highlight and discuss some problems detected in the application of the method.

## RESUMEN

El tráfico urbano crece ante dos demandas de la sociedad aparentemente contradictorias. La primera, que cubra la necesidad de un incremento de la movilidad de personas y mercancías; y la segunda exigiendo que disminuyan hasta su erradicación todos los efectos negativos causados por el tráfico, como los accidentes, los atascos, los daños ambientales, el impacto sobre la salud y la calidad de vida de los habitantes de la ciudad. Para ayudar a un desarrollo sostenible de la ciudad las soluciones sobre el transporte propuestas pueden ser analizadas con grandes ventajas a la luz de los modelos de microsimulación de tráfico. Estos modelos pueden recrear nuevos escenarios de tráfico buscando soluciones sostenibles en términos de movilidad y ruido ambiental. En este trabajo se pretende exponer las ventajas del uso de la evaluación dinámica del ruido de tráfico. Tras una revisión bibliográfica se pondrá de relieve algunas aplicaciones prácticas en planes de acción y también se discutirán algunas debilidades del método.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

### 1.- INTRODUCCIÓN

El tráfico en las ciudades sigue siendo una de las preocupaciones incluidas en la agenda diaria de las autoridades municipales. Probablemente sea debido a que la misma actividad que genera tantos beneficios económicos y sociales derivados de la facilidad con que se transportan personas y mercancías, sea al mismo tiempo la que afecta tan negativamente sobre la salud medioambiental [1] y tenga un impacto sobre el clima GHG [2]. El tráfico urbano es reconocido como la mayor fuente de contaminación ambiental de origen antropogénico y probablemente sea debido en parte a su ubicuidad. La extensión geográfica de la red de infraestructuras viarias es tal, que existe una gran probabilidad de que las actividades diarias de los ciudadanos se vean afectadas por su impacto. Es por ello que los ingenieros de tráfico ya no se centran únicamente en la optimización de los sistemas de transporte público, o en resolver los problemas del tráfico, ahora también se preocupan por el medio ambiente.

Poniendo el foco de atención sobre el ruido, la propia Agencia Europea del Medioambiente afirma que la contaminación sonora es el mayor problema de salud ambiental en Europa [3]. Los datos concernientes a la EU-28 que incluyen los datos recogidos en marzo del 2017 son bastante elocuentes cuando ponen de manifiesto que el número de personas expuestas en Europa a cifras de ruido que superan el indicador  $L_{den} \geq 55$  dB es de 71,663,000 personas y de 51,868,500 en el caso de  $L_{night} \geq 50$  dB [3]. Estas estimaciones incluyen únicamente la población que vive en aglomeraciones expuesto al ruido de tráfico, excluidas las grandes autopistas. Crear una conciencia colectiva sobre la magnitud, alcance y repercusiones del problema del ruido ambiental en las ciudades como consecuencia del tráfico es parte de nuestra labor divulgadora como investigadores. Desgraciadamente todavía existe una tendencia a creer que la exposición al ruido únicamente genera problemas de audición, cuando la verdad es que existe una amplia literatura que demuestra que la repercusión sobre la salud humana va mucho más allá. Podríamos dividir estos problemas de salud (excluido aparato auditivo) en dos categorías, la primera comprendería efectos negativos en el sistema cardiovascular [4]. La segunda comprendería aspectos relativos a la molestia, el estrés, las alteraciones sobre el sueño, y el bienestar psicológico [5].

La mayoría de los estudios sobre ruido y salud ambiental son posteriores a la introducción de la Directiva Europea sobre el Ruido 2002/49/CE [6]. Podemos decir sin temor a equivocarnos, que muchos gobiernos europeos que aún no habían pensado en el ruido como un problema importante, tuvieron que asumir la responsabilidad de actuar contra él. Y esa actuación va en una doble vertiente, la de diagnosticar el problema mediante los mapas estratégicos de ruido y la de poner remedio a los problemas detectados a través de los planes de acción [6,7]. Lo que ocurrió es que entre los resultados obtenidos de los mapas de ruido y la implantación de los planes de acción la probabilidad de ineficiencias era tan alta, que a veces no se tenía claro que la inversión efectuada para reducir el ruido iba a dar los resultados esperados. Había que centrarse en cómo solucionar este problema [8-10]. Una de las ineficiencias más notables aparece en unos mapas que se construyen temporalmente para realizar evaluaciones de dosis de ruido a largo plazo y que a nivel espacial, se elaboran tolerando ciertas carencias y simplificaciones [11]. Por ejemplo, para examinar la capacidad del ruido para interferir en el aprendizaje en niños y en el sueño [5,12], hay otros indicadores que se han probado más adecuados, como el  $LAF_{max}$ , o las series temporales de  $LA_{eq,1s}$ . La exigencia de mejor resolución espacial se evidencia en las variaciones significativas de los niveles y las características del ruido generado en áreas concretas de la infraestructura (piénsese en semáforos, pasos de peatones, cruces, rotondas, cuellos de botella, carriles de aceleración, etc.)

Lo que parece meridianamente claro es que mientras se lleve a cabo la transición de vehículos propulsados por motores de combustión interna a motores eléctricos, los investigadores seguirán trabajando en la reducción de las emisiones basadas en la gestión de tráfico. Y lo realmente interesante es que todas ellas son susceptibles de ser examinadas mediante los modelos de

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

microsimulación del tráfico. Y por ello esta revisión tiene por objeto describir en que consiste la evaluación dinámica del ruido de tráfico y cómo es capaz de captar características del ruido urbano que son invisibles para los mapas de ruido elaborados de una manera convencional. Para ello esta revisión incluye una descripción de la metodología que se discutirá en el apartado 2. Se reserva al apartado 3, para introducir ejemplos y casos de estudio encontrados en la bibliografía que puedan servir de guía en el diseño de planes de acción contra el ruido de tráfico. A pesar de las ventajas expuestas, la evaluación dinámica del ruido de tráfico adolece de ciertos problemas que serán examinados en el apartado 4, junto con la descripción de como se está tratando de superarlos, dejando para el final las conclusiones en 5.

## 2. EVALUACIÓN DINÁMICA DEL RUIDO DE TRÁFICO.

El paradigma de la sostenibilidad implica la necesidad de estudiar en las más diversas direcciones la relación entre el transporte rodado y el medio ambiente [13,14]. Un acercamiento holístico a la gestión del tráfico permitiría, entre otras cosas, identificar y aprovechar sinergias, pronosticar posibles efectos secundarios y contemplar soluciones equilibradas. Con equilibradas, se quiere significar que dichas soluciones se obtienen mediante un compromiso entre calidad ambiental y eficacia del transporte. Todo ello examinado en términos de movilidad, balance energético, emisiones de partículas, ruido, CO<sub>2</sub>, etc., y por supuesto, sin olvidar la seguridad. Pero algo se está haciendo mal cuando tras analizar 57 estudios publicados en revistas de reconocido prestigio, Khan [15] llega a una conclusión desconcertante. Las correlaciones encontradas entre el tráfico y la contaminación urbana (incluido el ruido) varían significativamente encontrándose valores que van desde muy altos a muy bajos. Una prueba más del desajustado causado por un abanico de metodologías, que convierten los resultados en incomparables.

Se abre así la opción de que los modelos de microsimulación de tráfico formen parte de los cimientos de una metodología robusta y que permita evaluaciones con criterios de sostenibilidad. Por un lado, formando parte en una herramienta de predicción de ruido de tráfico que sea capaz de generar indicadores dinámicos que describan mejor la molestia ocasionada por el ruido urbano y permitan valoraciones más detalladas sobre la eficacia de los planes de acción (enfoque ya previsto en CNOSSOS [16]). Por otro lado, dando soporte a evaluaciones complementarias que permitan comprobar posibles efectos secundarios sobre la movilidad y sobre el comportamiento del resto de contaminantes. Al fin y al cabo, las emisiones son sensibles a los cambios en la velocidad y los perfiles de aceleración de cada vehículo en la red [17], lo que aconseja una evaluación que pueda recrear las emisiones siguiendo estos cambios. Este método dinámico consta de una serie de etapas (figura 1) cuyo eje central pasa por la realización de una simulación de tráfico realista. Los datos instantáneos sobre la dinámica de cada vehículo en la red se emplearán como entrada de un modelo de emisión de ruido con las mismas características temporales. Así mismo, el modelo de emisión puede completarse con un modelo de propagación.

### 2.1.- Microsimulación de tráfico

Los modelos de micro-simulación de tráfico sirven en primera instancia a los ingenieros de tráfico para realizar análisis y evaluaciones del rendimiento de las redes de tráfico y planificar así, desde las necesidades del transporte público, hasta las mejoras en la regulación semafórica. Este trabajo lo hacen sirviéndose de ciertas variables que miden la efectividad del sistema (*Measure of Effectiveness*, o MoE). Los distintos escenarios se analizarán comparativamente para probar cómo se comportan todas las MoE. Una de las más comunes se refiere a la distribución de tiempo de viaje por clase de vehículo. Hay muchas más, como el tiempo de viaje por usuarios del sistema de transporte público, el número de paradas, el tiempo en colas, etc.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Estos modelos de simulación del tráfico urbano se sirven de las DVU (*Driver-Vehicle Units* o unidades vehículo-conductor) para describir y analizar el flujo de tráfico. Su potencial se obtiene de conocer individualmente la posición, aceleración y velocidad de todos y cada uno de los vehículos en la red. Estos parámetros se conocen para un instante cualquiera y se van actualizando en pasos de tiempo discretos. La frecuencia de muestreo de la simulación se establece dependiendo de las necesidades y de la potencia de cálculo, normalmente 1s. Dependiendo de las capacidades del modelado multimodal, se pueden incluir autobuses urbanos e interurbanos, motocicletas, peatones, bicicletas, taxis, tranvías, etc. Los vehículos no contaminantes y los peatones, al entrar en conflicto e influir en los patrones de desplazamiento de los vehículos contaminantes, son por tanto imprescindibles en la simulación.

No todos los paquetes de software presentes en el mercado se basan en modelos con las mismas características. Para obtener un enfoque realista de las emisiones de ruido es necesario que el software reúna una serie de características [18]:

- Es necesario que el modelo incluya una descripción técnica de cada clase de vehículo que participa en el flujo de tráfico y que estas clases sean como mínimo las contempladas por HARMONOISE-IMAGINE-CNOSOSS [16,19,20] (de ahora en adelante H-I-C). Esto incluye un desglose técnico de cada clase de vehículo, pero teniendo en cuenta que las especificaciones técnicas de interés para la simulación de tráfico y para la evaluación de ruido no tienen por qué ser las mismas.
- Un modelo conductual que gobierne los movimientos de los vehículos incluyendo sus acciones e interacciones, de una manera realista en su fluir por las calles y cruces de la ciudad. Estos movimientos incluyen el ralentí, aceleraciones, desaceleraciones y velocidad de cruce. Todos ellos están supeditados a la seguridad vial, la señalización y a las normas de circulación. De esta manera, con reglas de prioridad, es como las distintas DVU se enfrentan a las situaciones conflictivas cuando varios modos intentan acceder al mismo espacio a la vez. El modelo conductual de seguimiento de automóviles determina principalmente el avance axial y también el cambio de carril basado en reglas sobre los desplazamientos laterales.

Capítulo aparte merecen los datos de calibración, que no sólo incluye la adquisición “in situ” de los parámetros generales del tráfico (figura 1). Una calibración adecuada utiliza bases de datos de patrones de comportamiento donde se definen las costumbres locales. En todo caso es posible medir *in-situ* (figura 1): tiempos de reacción, la distancia mínima al vehículo antecesor y a los lados (aceptación espacios de seguridad), la adaptación de velocidad y como se realiza el seguimiento de automóvil predecesor y las condiciones en las que se llevan a cabo cambios de carril de cada conductor, adelantamientos, etc., [21]. Desafortunadamente, no todos los paquetes de software proporcionan interfaces que permitan ajustes de los parámetros que definen el modelo de comportamiento, o, al menos, una interfaz que posibilite usar modelos de controladores externos opcionales

## 2.2.- Modelo de emisión de ruido de tráfico

En Europa se ha recorrido un largo camino en la armonización del diseño de los modelos de emisión de ruido para el tráfico rodado, desde Harmonoise [19] e IMAGINE [20], hasta el actual CNOSSOS-EU [16,23]. Para verificar su aplicabilidad se hicieron numerosos ensayos en las carreteras de toda Europa [20]. Se han elaborado magníficas revisiones de todos los modelos disponibles en la actualidad y sus características más destacables, de especial interés es la elaborada por Can [22]. Precisamente todos ellos proporcionan la posibilidad de estimar el ruido de manera dinámica, y vehículo a vehículo. Dinámico, porque el ruido asociado a una determinada calle es una función de la evolución espacio / tiempo de los niveles de potencia acústica emitidos por cada vehículo de la flota.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

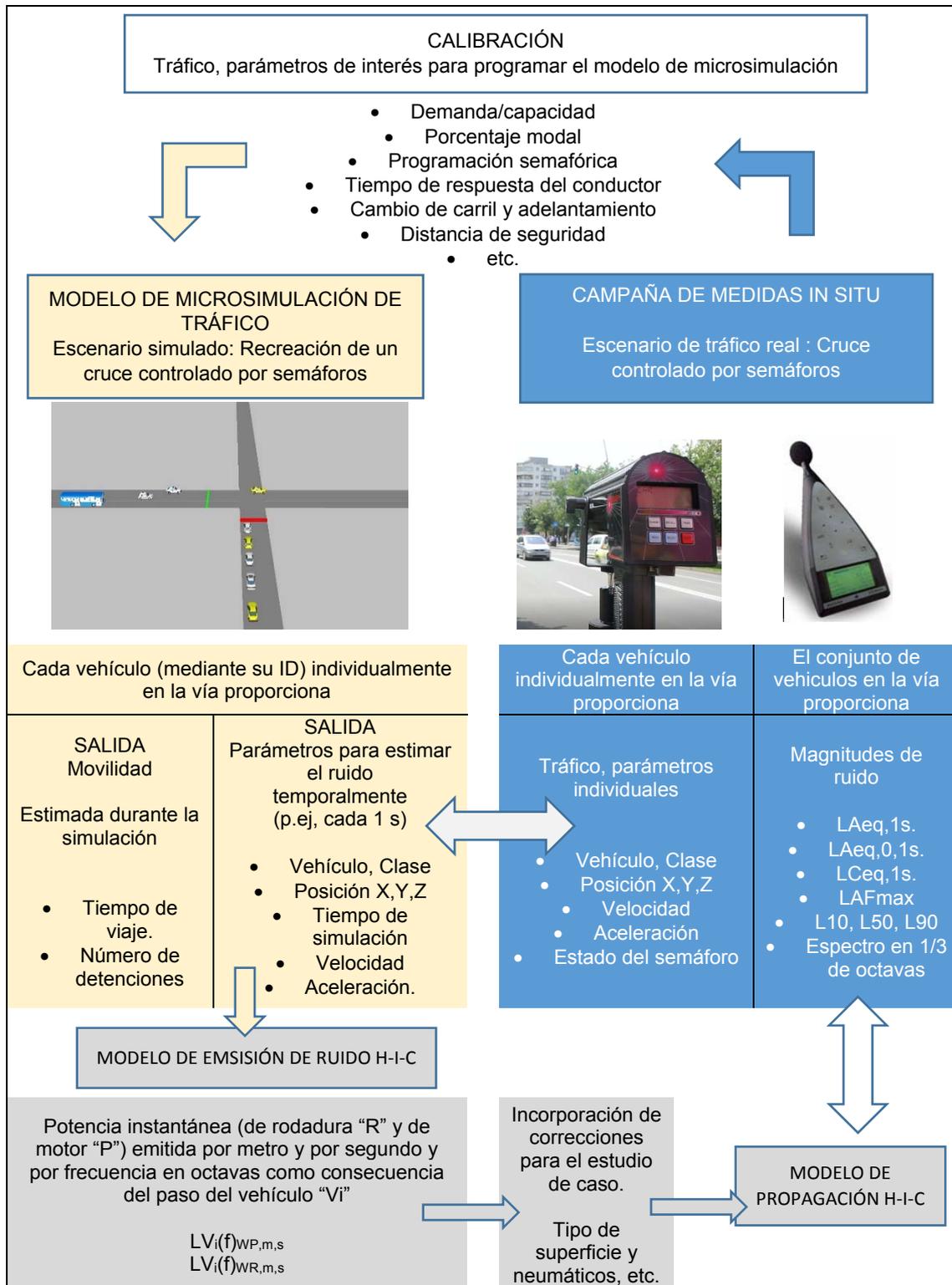


Figura 1.- Esquema de los pasos metodológicos que contempla la evaluación dinámica de ruido de tráfico. Incluye la calibración y validación del proceso. Las flechas dobles blancas señalan posibilidades de comparar el modelo de tráfico simulado con los datos recogidos in situ.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

En general los modelos H-I-C definen la producción de ruido instantáneo de un vehículo descrito por los dos parámetros principales, su clase y su velocidad, que luego es posible ser corregida por diversos factores. En CNOSSOS-EU (de forma idéntica a IMAGINE) se definen cuatro categorías. Las categorías de vehículos dentro del modelo de microsimulación deben reagruparse dentro de las categorías CNOSSOS. La categoría M=1 se reserva a los vehículos ligeros, la M=2 a los camiones medianos y la M=3 a los vehículos pesados. La categoría M=4 se descompone a su vez en dos: motocicletas (4b) y ciclomotores (4a). Para cada vehículo en la red, el modelo de emisión consiste en un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan las dos principales fuentes de ruido:

- Ruido motor, que es el ruido generado por el sistema propulsión del vehículo que está compuesto por: el motor, la transmisión y el sistema de escape y admisión de aire y el sistema de frenos principalmente. En las ecuaciones H-I-C se describe como una función lineal de la velocidad del vehículo, de ahí su importancia en la ciudad a baja velocidad.
- Ruido de rodadura, que es el resultado de la interacción entre los neumáticos y la superficie de la carretera. Por tanto, depende de las características de ambos elementos. En las ecuaciones H-I-C se representa como una función logarítmica de la velocidad. Es normal incluir el ruido aerodinámico dentro del ruido de rodadura ya que está asociado con las turbulencias que se generan principalmente en las ruedas, pero cuya incidencia es interesante a velocidades que muy grandes que nunca se alcanzan en la ciudad.

Para el cálculo de la potencia sonora asociada a la rodadura de los vehículos:

$$L_{WR}(f) = A_R(f) + B_R(f) \cdot \log_{10} \left( \frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (1)$$

$L_{WR}$  es la potencia de ruido de rodadura;  $A_R$ ,  $B_R$ : coeficientes que cambiarán para cada banda de frecuencia y para cada categoría de vehículo;  $v$ : velocidad del vehículo en Km/h; y  $v_{ref}$ : velocidad de referencia que es 70 Km/h.

Para el cálculo de la potencia sonora emitida por el motor de los vehículos:

$$L_{WP}(f) = A_P(f) + B_P(f) \cdot \left( \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right) + \Delta L_{W,acc} \quad (2)$$

$L_{WP}$  es la potencia de ruido de propulsión,  $A_P$   $B_P$ : coeficientes que cambiarán para cada banda de frecuencia y para cada categoría de vehículo;  $v$ : velocidad del vehículo en Km/h;  $v_{ref}$ : velocidad de referencia. Se ha dejado de lado intencionadamente los términos de corrección generales para el ruido de rodadura y el ruido de motor, y solamente se ha incluido explícitamente el término relativo a la aceleración (deceleración)  $\Delta L_{W,acc}$ . Los coeficientes han ido evolucionando conforme las pruebas realizadas año tras año sobre los vehículos han evidenciado niveles de emisiones cada vez menores. Finalmente, la emisión total de la fuente queda reflejada por,

$$L_W(f) = 10 \cdot \log_{10} \left( 10^{L_{WP}/10} + 10^{L_{WR}/10} \right) \quad (3)$$

Una vuelta de tuerca en la precisión es situar a dos alturas las líneas fuentes. Una inferior a 1 cm de altura, que contendrá el 80% de la potencia sonora de rodadura y el 20% de la potencia sonora debida al motor. La fuente superior se colocará a 30 cm de altura (75 cm para los vehículos pesados) y contendrá el 20% de la potencia de ruido de rodadura y el 80% del de propulsión. Ambas líneas están contenidas en el plano vertical que delimitan las ruedas exteriores de los vehículos en la vía.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIAACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

$$L_{W,low}(f) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{20}{100} 10^{L_{WP}/10} + \frac{80}{100} 10^{L_{WR}/10} \right) \quad (4)$$

$$L_{W,high}(f) = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{80}{100} 10^{L_{WP}/10} + \frac{20}{100} 10^{L_{WR}/10} \right) \quad (5)$$

La emisión de ruido de un flujo de tráfico en la carretera queda representado por una línea fuente de ruido caracterizada por el espectro de potencia de emisión de ruido por metro durante el periodo de tiempo en el que se considere el flujo de tráfico. Por tanto, lo que se obtendrá durante este periodo es la suma energética de la huella sonora de los vehículos a su paso por la sección de carretera considerada para el análisis. Una línea fuente [23] es la trayectoria de una fuente móvil puntual y puede representarse mediante una distribución continua de fuentes puntuales, o una serie de fuentes lineales sonoras, siendo todas mutuamente incoherentes. El término "línea fuente" se prefirió al término usual "fuente lineal" porque este último se entiende más comúnmente como una línea de fuentes puntuales que pulsan con fase coherente, mientras que en CNOSSOS las fuentes puntuales en la línea son pulsantes con incoherencia de fase [23].

### 2.3.- Corrección por aceleración

El término de corrección de la ecuación (2), se refiere al cálculo de la influencia de la aceleración en el ruido emitido por cada vehículo y ha sido probablemente el término que ha experimentado cambios más profundos a largo del tiempo. Lógicamente este término correctivo debería depender tanto de la aceleración como de la velocidad del vehículo. Sin embargo, en los casos analizados la emisión de ruido se presenta como una dependencia (a veces lineal) de la aceleración y no en todos los casos la corrección se hace sobre gama de frecuencias del ruido. Definimos dicho término como:

$$\Delta L_{W,acc} = C_P(m, v, f) \cdot a \quad (6)$$

Donde  $a$ : es la aceleración instantánea del vehículo en  $m/s^2$ , y  $C_P$ : es el coeficiente que debería ser función de la frecuencia "f", de la categoría de vehículo "m" y de la velocidad "v". Aunque en realidad, sólo en IMAGINE se ha tenido en cuenta un  $C_P$  dependiente de la frecuencia y que evoluciona (no-linealmente) con la aceleración.

Tabla 1.- Comparativa sobre el tratamiento que se da a la aceleración en los modelos de emisión de ruido H-I-C.

	HARMONOISE	IMAGINE // 1º BORRADOR CNOSSOS	CNOSSOS-EU
Bandas	1/3 de octava	1/3 de octava	Octavas
Gama de frecuencias	25 Hz -10 kHz	25 Hz -10 kHz	63Hz – 8 KHz
Motor $\Delta L_{W,P,acc} =$	$C_P \cdot a$	$C_P(f) \cdot a$ para $a \geq -1 m/s^2$ $C_P(f) \cdot (-1)$ para $a < -1 m/s^2$	$C_P \cdot \max \left( 1 - \frac{ x }{100}; 0 \right)$
Motor Coeficiente C, M=1 LIGEROS	$C_P = 4.4$	$C_P(25Hz - 40Hz) = +2 / +4$ $C_P(50Hz - 200Hz) = +5 / +7$ $C_P(250Hz - 10KHz) = +2 / +4$	Cruce , $C_P = +5,5$ Rotonda , $C_P = +3,1$
Motor Coeficiente C, M=3 PESADOS	$C_P = 5,6$	$C_P(25Hz - 40Hz) = +3 / +5$ $C_P(50Hz - 200Hz) = +7 / +9$ $C_P(250Hz - 10KHz) = +3 / +5$	Cruce , $C_P = +9$ Rotonda , $C_P = +6,7$
Rodadura $\Delta L_{W,R,acc} =$			$C_R \cdot \max \left( 1 - \frac{ x }{100}; 0 \right)$
Rodadura Coeficiente C,			Cruce , $C_R = -4,5$

### FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

M=1 LIGEROS			Rotonda , $C_R = -4,4$
Rodadura Coeficiente C, M=3 PESADOS			Cruce , $C_R = -4$
			Rotonda , $C_R = -2,3$
Referencias	[19,22,24]	[20,22,25]	[22,23]

### 3.- APLICABILIDAD EN PLANES DE ACCIÓN

Parece ampliamente aceptado que los momentos de conducción irregular puede producir episodios de ruido (por ejemplo, remontándonos a estudios precursores [26-29]). En ciertos entornos urbanos dicha dinámica es necesariamente muy cambiante, sobre todo en los cuellos de botella que forman los cruces, los semáforos y las rotondas. Analizar estas zonas basándose en una evaluación dinámica del ruido de tráfico basada en modelos de microsimulación de tráfico ha sido llevado a cabo por [30,31-39]. Sin entrar en profundidad, las aceleraciones más profundas y las condiciones continuadas de parada-arranque, tienden también a aumentar las tasas de emisión, por ejemplo [40-41]. Por ello se ha trabajado en soluciones que permitan que el tráfico fluya por avenidas a velocidades constantes, no excesivamente altas y eliminando los eventos de aceleración y desaceleración asociados con el tráfico intermitente. Esto explica el interés de algunos trabajos sobre la optimización de las avenidas controladas por semáforos para crear lo que se conoce por ondas verdes [13,42-47]. Se tratará de conseguir el mismo efecto en cruces (controlado por semáforos o no), rotondas, pasos de peatones, paradas de autobuses, carriles de aceleración, etc. El interés justifica el número de trabajos llevados a cabo. La mayor parte de ellos estudian aspectos metodológicos. A continuación, sin embargo se exponen una serie de propuestas, experiencias y estudios de casos de los que directamente se extraen aspectos prácticos sobre planes de acción sobre el ruido de tráfico. De los cinco casos, tres recogen las ventajas e inconvenientes de las intersecciones controladas por semáforos en relación a las rotondas (tabla 2). Los dos restantes estudian el efecto de la regulación semaforica en una avenida y se muestran en la tabla 3. Las variables independientes más relevantes suelen ser demanda respecto a capacidad, longitud de los ciclos semaforicos, número de carriles, distribución modal de los vehículos en la flota, etc. Estas variables se recogen con fines comparativos y facilitar la interpretación de las conclusiones en las tablas 2 y 3. Además, cada caso va acompañado de la referencia bibliográfica.

Tabla 2. Rotonda y cruce controlado por semáforos

Descripción de las variables en la simulación	Conclusiones	Ref.
<b>DEMANDA</b> Situación hora pico de tráfico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Demanda máxima en el ramal principal 500 v/h</li> <li>• Demanda mínima en el ramal principal 100 v/h</li> </ul> Situación 2 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción 25% de tráfico respecto a la hora pico</li> </ul>	Las rotondas se pueden ver como una oportunidad de reducir el consumo de combustible y mejorar el aire y el ruido. Ello se consigue mediante una disminución de los ciclos de aceleración, y de ralentí.  Cuando el tráfico es más fluido y el porcentaje de vehículos pesados es menor, se obtienen de 2 a 5 dB de mejora de la rotonda respecto al controlado por semáforos.	[39]
<b>REPARTO MODAL</b> Tipo 1 - 100 % vehículos ligeros Tipo 2 - 96 % ligeros 4 % pesados Tipo 3 - 92 % ligeros 4% pesados 4% medios Tipo 4 - 100 % coches eléctricos	Cuando el tráfico llega a la congestión, se obtienen 3 dB de empeoramiento de la rotonda respecto al cruce controlado por semáforos. Esta diferencia se alcanza en mayor medida en los puntos de medición cercanos a la intersección.	

### FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

<p>VELOCIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad deseada 52 Km/h</li> <li>• Velocidad de aproximación a la rotonda 30 Km/h</li> </ul>	<p>Los vehículos eléctricos disminuirían el ruido total en 4,5 dB.</p>	
--	--	--

Tabla 2 (continuación) - Rotonda y cruce controlado por semáforos

Descripción de las variables en la simulación	Conclusiones	Ref.
<p>DEMANDA</p> <p>30 minutos de tráfico fluido + 30 minutos tráfico saturado + 30 minutos de tráfico fluido.</p> <p>MATRIZ O-D</p> <p>el 20% del tráfico entrante en el cruce gira a la derecha</p> <p>TIEMPO EN VERDE SEMÁFOROS</p> <p>Desde 27 s hasta 55 s en los ramales principales</p> <p>VELOCIDAD</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad deseada (flujo libre) 54 Km/h</li> <li>• Velocidad dentro de rotonda 21,2 Km/h</li> </ul>	<p>En la mayoría de los casos en los que la circulación es fluida la rotonda mejora en 2,5 dB las cifras alcanzadas en el cruce semafórico.</p> <p>En estado de saturación el rendimiento de ambos cruces es igual,</p> <p>Se pone de relieve que las zonas de mayor impacto están en la aproximación al cruce y el propio cruce, no en el ramal de salida. Esto es porque la microsimulación describe adecuadamente el fenómeno de derrame de colas (spilling back) en condiciones de saturación, captura completamente que los vehículos en cola aceleran y detienen varios veces antes de ingresar en el ramal de salida. Aproximando llegando a la intersección los picos de ruido están sobre 72 dB y en la zona de aceleración dentro de la intersección los picos están sobre 78 dB.</p>	[36]
<p>Descripción de las variables en la simulación</p> <p>DEMANDA</p> <p>Desde 342v/h hasta saturación en 4000 v/h</p> <p>TIEMPO EN VERDE SEMÁFOROS</p> <p>Desde 4 s hasta 37 s</p>	<p>En todos los casos sin depender de la demanda la rotonda emite menos ruido. La explicación se debe a que en los cruces con semáforos el vehículo entra en un proceso de deceleración y aceleración continuada, que es culpable del mayor nivel de ruido. Mientras que en la rotonda la velocidad se reduce y la profundidad de aceleración también.</p> <p>Los picos de emisión máxima ocurren cerca de saturación</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En cruce con semáforos entre 4000-4300 v/h</li> <li>• En rotonda entre 3600-4000 v/h</li> </ul> <p>En este estado de demanda próxima a la saturación, la diferencia entre el ruido asociado a los carriles de entrada y de salida del cruce es de</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• En cruce con semáforos 4 dB</li> <li>• En rotonda 10 dB</li> </ul> <p>Otro de los aspectos destacables es que a mayor demanda, más apuntada es la distribución estadística de los niveles de ruido alcanzados (menor dispersión). También se aprecia, que a igual demanda, la dispersión de ruido es menor en las rotondas que en los cruces controlados por semáforos.</p>	[38]

### FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Tabla 3. Avenida controlada por semáforos

Descripción de las variables en la simulación	Conclusiones	Ref.
<p><b>DESCRIPCIÓN VÍA</b></p> <p>Avenida 5 semáforos separados 200 m Compuesta por 1 sólo carril en una sola dirección</p>	<p>Alrededor de los semáforos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La potencia de emisión es menor en la onda verde que en la onda roja</li> <li>• La mejora está entre 1 dB y 1,5 dB</li> </ul> <p>En mitad de dos semáforos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La potencia de emisión es mayor en la onda verde que en la onda roja</li> <li>• El empeoramiento está comprendido entre 1,5 dB y 2 dB</li> </ul> <p>Respecto al resto de contaminantes ambientales la disminución encontrada en la onda verde es de 10 a 40%</p>	[13]
<p><b>DEMANDA</b></p> <p>40 demandas diferenciadas desde 50 v/h hasta un máximo de 2000 v/h</p>		
<p><b>REPARTO MODAL</b></p> <p>Solo vehículos ligeros</p>		
<p><b>CONTROL DEL SEMÁFORO</b></p> <p>3 esquemas de control: onda verde, onda roja y aleatoria.</p> <p>7 ciclos de semáforos desde 30 a 90 s</p> <p>4 diferentes repartos de verde dentro del ciclo desde 0,5 a 0,8</p>		
Descripción de las variables en la simulación	Conclusiones	Ref.
<p><b>DESCRIPCIÓN VÍA</b></p> <p>Avenida 5 semáforos separados 275 m con 2 paradas de autobús intermedias Compuesta por 2 carriles en las dos direcciones</p>	<p>El sistema de priorización de autobuses disminuye los episodios de ruido, así como el ruido total en la avenida. Esto es debido a que las ondas verdes crean ondas rojas en dirección contraria, siendo el sistema de priorización más equilibrado</p> <p>Los tiempos de viaje son más cortos para todos los viajeros en la red en las dos direcciones.</p> <p>Estas cifras se alcanzan sin la necesidad de crear un carril bus segregado en ambas direcciones.</p>	[46]
<p><b>DEMANDA</b></p> <p>2 situaciones. Tráfico fluido y próximo a la saturación</p>		
<p><b>REPARTO MODAL</b></p> <p>Tipo 1. Flujo principal de vehículos ligeros + 12 autobuses por hora en cada dirección Tipo 2. Flujo principal de vehículos ligeros + 60 autobuses por hora en cada dirección</p>		
<p><b>CONTROL DEL SEMÁFORO</b></p> <p>3 esquemas de control: onda verde en la dirección de entrada, onda verde en la dirección de salida, y sistema de priorización de autobuses simultáneo en ambas direcciones.</p>		

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

### 4.- PROBLEMAS IDENTIFICADOS EN LA EVALUACIÓN DINÁMICA DEL RUIDO DE TRÁFICO

A pesar de calidad de las predicciones de ruido alcanzadas mediante el uso de los modelos de microsimulación de tráfico, existen varios problemas que aquejan la fiabilidad y aplicabilidad de los mismos en el desarrollo de planes de acción contra el ruido. En este capítulo se van a revisar algunos de estos inconvenientes que se presentan en las diferentes etapas que secuencialmente conforman la estimación dinámica del ruido de tráfico. Así mismo se van a plantear algunas soluciones que se han aportado en la bibliografía consultada.

#### 4.1. Descripción precisa de la cinemática de los vehículos en la ciudad

La cinemática de los vehículos urbanos, generalmente se conoce con una resolución muy pobre [22]. Una estimación precisa de la distribución de las velocidades instantáneas (y aceleraciones) es difícil de obtener y de ser plasmada en un modelo conductual que gobierne la dinámica de las DVU. El reto es siempre tratar de asignar el mayor realismo posible a la simulación de los vehículos, por ejemplo en su comportamiento al atravesar intersecciones controladas por semáforos. En el trabajo de Can [22] se pone en evidencia la investigación de algunos autores respecto a las aceleraciones reales alcanzadas en la ciudad. En este texto nos detendremos en el trabajo de Clément [48] que usando un vehículo sensorizado estima que las aceleraciones por debajo de  $0,83 \text{ m/s}^2$  ( $3 \text{ Km h}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) son muy raras y representan las aceleraciones más pequeñas que se alcanzan en los primeros segundos de salida de un vehículo tras un stop. Las aceleraciones entre  $2.8 \text{ m/s}^2$  y  $4.2 \text{ m/s}^2$  ( $10\text{-}15 \text{ Km h}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) son muy comunes. Y no es inusual que en algunas ocasiones incluso superen los  $5,6 \text{ m/s}^2$  ( $20 \text{ Km h}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ). En el trabajo realizado por Viti [49] se pone de relieve las inconsistencias existentes entre los modelos microscópicos de tráfico cuando simulan la cinemática de vehículos a su paso por las intersecciones. Tanto en las situaciones rojo/verde (deceleración, parada, aceleración) como en las de verde (paso a través de la intersección) las distribuciones de velocidad/aceleración pueden alejarse bastante de la realidad [49]. Por ejemplo, muchos más vehículos superan aceleraciones de  $0.5 \text{ m/s}^2$  dentro de las calles que en las simulaciones. También es de destacar la sobreestimación de la velocidad de paso de los vehículos a través de la intersección cuando lleva mucho tiempo en verde. Otro aspecto relevante es el de los vehículos que se acercan a un semáforo en rojo. En los modelos de simulación se encuentran unas velocidades excesivas y demasiado uniformes antes de su detención, cuando en la realidad el frenado es más progresivo en un gran número de vehículos.

En la construcción de un modelo de micro simulación es muy importante conocer las estadísticas de comportamiento de los conductores. El patrón de movimiento de los vehículos requiere conocer números factores relativos a la infraestructura, el tráfico, cuestiones ambientales y también los factores internos a cada DVU, como el tipo de vehículo, el tipo de viaje y el tipo de conductor. Can afirma [22] que en Francia los conductores se pueden clasificar en 26% muy tranquilos, 23% bastante tranquilo, un 23% anticipador, un 15% deportivo, un 8% agresivo y un 5% no clasificables en la anterior lista. Cueto [50] utiliza otras distribuciones basadas en estudios de pequeña escala de coches en la provincia de Cádiz. Por ejemplo 15% agresivos, 70% normales y 15% tranquilos. Estas distribuciones son muy importantes ya que una conducción deportiva lleva aparejada, no solo una velocidad/aceleración deseada alta, sino aspectos concernientes a las distancias de seguridad, tiempos de reacción y disposición a adelantamientos y cambios de carril. Por otro lado los vehículos modelizados pueden incluir las curvas de aceleración máxima de cada de vehículo. Por lo que las curvas de velocidad y aceleración deseadas se modulan con las posibilidades del vehículo.

Los autobuses son un caso aparte. La profundidad de frenado y la profundidad de aceleración, ya sea acercándose a una parada de autobús, o a un semáforo, están procedimentadas en la mayoría de compañías de autobuses. La razón principal de que los conductores de estas compañías utilicen incrementos de la velocidad progresivos es la prevención de los incidentes a bordo no causados por un peligro inminente de colisión. Pensemos en que estas fuerzas pueden

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

causar caídas y golpes en los pasajeros, sobre todo si van de pie. Aun así, y en situaciones reales se han recogido aceleraciones de pico próximas a  $1,6 \text{ m/s}^2$  y frenadas de  $3,2 \text{ m/s}^2$ .

### 4.2. Límites en los modelos de emisión de ruido de tráfico

El segundo problema vinculado a los modelos de emisión de ruido tráfico son debidos al limitado rango de velocidades y aceleraciones para el que es estimada la emisión de manera fiable usando los modelos de emisión de ruido individualizado por vehículos: H-I-C. El rango inferior de velocidades se corresponde además con las condiciones de conducción urbana, y es precisamente el que limita en la mayoría de las veces el uso indiscriminado de esta metodología, como se advierte en la tabla 4.

Tabla 4.- Límites de aplicación de los modelos de emisión H-I-C en relación a las velocidades y aceleraciones

	HARMONOISE	IMAGINE // 1º BORRADOR CNOSSOS	CNOSSOS-EU
Gama de aceleración considerada M=1 ligeros	$-2 \text{ m/s}^2 \leq a \leq 2 \text{ m/s}^2$	$ a  \leq a_{\max}$ $a_{\max} = 2 \text{ m/s}^2$	
Gama de aceleración considerada M=3 pesados	$-2 \text{ m/s}^2 \leq a \leq 2 \text{ m/s}^2$	$ a  \leq a_{\max}$ $a_{\max} = 1 \text{ m/s}^2$	
Gama de velocidades	$20 \text{ Km/h} \leq v \leq 120 \text{ Km/h}$	$10 \text{ Km/h} \leq v \leq 130 \text{ Km/h} //$ $20 \text{ Km/h} \leq v \leq 130 \text{ Km/h}$	$20 \text{ Km/h} \leq v \leq 130 \text{ Km/h}$
Referencias	[19,51]	[20,52]	[23]

Para superar estos límites algunos autores [38] proponen el ajuste con un modelo realizado en torno a sucesivas campañas de mediciones acústicas. Feng Li utilizó la regresión lineal para generar un modelo de emisión de ruido del vehículo, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5.- Ecuaciones que establecen una relación entre la emisión de ruido la velocidad y la aceleración [38]

Tipo de vehículo	Situación dinámica del vehículo	Formula de ajuste
Coche	Velocidad cte.	$L_{0S} = 28.12 + 24.77 \log_{10} v$
	aceleración	$L_{0S} = 35.56 + 19.4 \log_{10} v + 1.04a$
	deceleración	$L_{0S} = 24.86 + 25.75 \log_{10} v + 0.33a$
	ralentí	$L_{0S} = 53.79$
Pesado	Velocidad cte.	$L_{0L} = 33.35 + 28.56 \log_{10} v$
	aceleración	$L_{0L} = 68.92 + 6.44 \log_{10} v + 2.58a$
	deceleración	$L_{0L} = 61.9 + 10.21 \log_{10} v + 0.16a$
	ralentí	$L_{0L} = 63.32$

### 4.3. Modelo de ruido. Vinculación entre la cinemática del vehículo y la emisión real de ruido

Aunque el modelo de micro simulación de tráfico fuera perfecto, y el modelo de emisión no estuviera comprometido por límites de velocidad y aceleración, lo cierto es que se seguirían detectando problemas relacionados con otras deficiencias del modelo de emisión de ruido. Diversos estudios sobre la sostenibilidad del tráfico indican que los niveles de emisiones en vehículos de combustión interna están influidos por muchas variables y parámetros [53], incluidas las especificaciones técnicas del vehículo, la edad y el estado del vehículo, las condiciones de

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

operación del vehículo y las condiciones ambientales externas. Es interesante resaltar la importancia de la edad y el estado de mantenimiento cuando se estudian las flotas de autobuses urbanos.

Usando la metodología propuesta para la evaluación dinámica del ruido de tráfico, cada vehículo individual dentro de la simulación tiene una velocidad y una aceleración, y por consiguiente tiene un valor de emisión con estos parámetros. Todos los demás vehículos de su clase con los mismos parámetros dinámicos emitirán exactamente lo mismo. De Coensel [54,55], propone la posibilidad de alcanzar mayores niveles de realismo en las estimaciones, simplemente mediante la introducción de un término en la ecuación de emisión que dé cuenta de cierta aleatoriedad.

$$L_W^{dist}(f) = L_W(f) + \Delta L_W(f) \quad (7)$$

Por tanto se trata de reintroducir la distribución de ruido emitido por la misma clase de vehículo y con los mismos parámetros cinemáticos. En el proyecto IMAGINE se midieron miles de vehículos en varios países y se trata de reintroducir esta variabilidad. También es posible incorporar nuevos estudios actualizados y enfocados a un país [56]. Por ejemplo, Estévez-Mauriz [39] usando bases de datos publicadas entre 2001-2006 introduce un nivel de aleatorización de la fuente (ligeros/pesados), que depende de la velocidad a la que circula el vehículo. La desviación estándar es mayor cuanto menor sea la velocidad. A 10 Km/h y para vehículos pesados es mayor que 5. Para dichos vehículos circulando a 110 Km/h prácticamente se reduce a una desviación típica cercana a 1.

Es importante destacar que las distribuciones que se han usado introducen la velocidad como variable independiente, nunca la aceleración.

### 4.4.- Indicadores dinámicos de ruido

Finalmente, una vez resueltos los aspectos relativos a la calidad del modelo de tráfico y el modelo de emisión, necesitamos hacer uso de unos indicadores de ruido que puedan resultar significativos para evaluar la magnitud del problema acústico. La relevancia de una correcta selección de dichos indicadores implica tanto una apropiada detección de los puntos negros en la fase de diagnóstico, como una valoración acertada de la eficacia de los planes de acción. Es interesante reflexionar lo improductivo que resulta el uso de un método de alta resolución temporal y espacial, si luego se pretende usar indicadores macroscópicos. Una revisión imprescindible realizada por Can de los indicadores de ruido empleados en ámbitos urbanos lo encontraremos en [57]. Entre otras cosas, se desprende la conveniencia de explotar las variaciones de la energía que ofrecen las series temporales  $LA_{eq,1s}$  y sus respectivos espectros. Estas series de datos se usan como proxy para calcular indicadores de molestia muy variados y que se podrían dividir *grosso modo* en indicadores de ocurrencia de eventos sonoros, estadísticos y espectrales.

Una serie temporal de  $LA_{eq,1s}$  lo suficientemente larga permite tanto la búsqueda de periodicidades en el ruido urbano, por ejemplo, las provocadas por un semáforo, como evaluar distribuciones estadísticas del ruido usando ventanas temporales que pueden coincidir, siguiendo con el ejemplo, con esos ciclos semaforicos. Ejemplos de indicadores de ocurrencia de eventos sonoros son los basados en el número de eventos y su duración total o por ciclo de semáforo. Al mismo tiempo se puede establecer si la distribución de los eventos sonoros temporal y/o espacial está concentrada en "clusters" o es aleatoria. Analizar la ocurrencia de eventos de ruido está atrayendo la atención de los investigadores, ya que cada vez es más conocida su relación con la molestia, los problemas relacionados con el sueño y las dificultades cognitivas y de atención en las aulas. Por ejemplo, 80 dB [57] podría usarse como umbral de

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

detección de picos de ruido y  $LAF_{95} > 65$  dB para detectar cuando los periodos de calma empeoran.

Refiriéndose a los ritmos que la regulación semafórica crea en los paisajes sonoros de la ciudad, Can [57] define el «patrón de ruido medio del espectro», como un indicador que primero se centra en la reconstitución del patrón de ruido medio (que se refiere al patrón que se repite a la frecuencia de ciclo del semáforo) para luego realizar la evaluación del ruido como variación sobre dicho patrón. Se explicará en qué consiste con un ejemplo que consiste en tratar el registro temporal  $LA_{eq,1s}$  de 1 hora de duración (3600 datos).

1. El registro temporal se re ensambla en una matriz de tamaño  $C_T \times N_C$ , donde  $C_T$  es la duración total de un ciclo semafórico y  $N_C$  es el número total de ciclos registrados.
2. Siendo  $C_T = 60$  segundos, para 1 hora tenemos un total de  $N_C = 12$  ciclos.
3. Esto implica que, en el registro a su vez, se dispondrán de 12 instantes  $t_i$  dentro del ciclo semafórico ( $0 < t_i \leq C_T$ ).
4. Si  $t_i$  se define cada 2 segundos, entonces tenemos 30 instantes.
5. En dichos instantes solo se mantienen los niveles de ruido observados más frecuentes (el umbral es 60% de las observaciones, o sea las 16 observaciones más frecuentes de las 120 posibles).
6. Luego se realiza un promedio acústico  $LA_{eq}(t_i)$  para cada momento  $t_i$  (30 en total) construidos con las 16 observaciones más frecuentes dentro de cada  $t_i$ .
7. El patrón de ruido medio obtenido para un punto indica claramente la distinción entre fase verde y roja. Entonces, es crucial entender cómo se relacionan los descriptores con estos dos niveles. También parece esencial encontrar la manera de evaluar esos niveles.
8. Ciertas variaciones deben ser introducidas para amoldar el cálculo del indicador para semáforos con ciclos variables.

Otras alternativas de indicadores usan la composición de frecuencias como base de análisis, ya que es bien sabido que detrás del espectro se hayan varios factores de molestia (baja frecuencia y tonalidad) así como otros factores negativos (inteligibilidad del habla, enmascaramiento). Los indicadores espectrales dinámicos se basan en la descripción del cambio en la forma de dicho espectro. Incluso pueden ser usados dentro de la mecánica de análisis descrita como patrón de ruido medio.

## 5.- CONCLUSIONES

- Los modelos de micro simulación de tráfico permiten poner en práctica evaluaciones de medidas de mitigación del ruido urbano basadas en la gestión del tráfico urbano con criterios de sostenibilidad.
- La calibración del modelo microscópico de simulación tráfico puede llegar a ser un factor fundamental para explicar la diferencia entre campañas de medidas de ruido de tráfico y predicciones dinámicas de ruido simulando la misma situación.
- El uso de indicadores basados en los niveles sonoros medidos en receptores virtuales crea serios inconvenientes sobre la comparabilidad de las experiencias y estudios llevados a cabo sobre medidas contra el ruido basadas en la gestión del tráfico. Sería conveniente incluir, además, indicadores de ruido basados en la potencia de emisión sonora, que además no sufre el inconveniente de extraerse de un modelo de propagación.
- Líneas futuras de trabajo deberán orientarse hacia acumular conocimiento para mejorar la predicción del ruido emitido por vehículos a bajas velocidades y niveles de aceleración altos.

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

## REFERENCIAS

- [1] Michal Krzyzanowski, Birgit Kuna-Dibbert and Jürgen Schneider. Health effects of transport-related air pollution. World Health Organization (2005).
- [2] Transport and climate change: a review. Lee Chapman Journal of Transport Geography 15; 354–367 (2007)
- [3] European Environment Agency (EEA),. Population exposure to environmental noise. Prod-ID: IND-233-en, Also known as: TERM 005 , CSI 051. Copenhagen (2018).  
<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exposure-to-and-annoyance-by-2/assessment-2>
- [4] Elise van Kempen Maribel Casas, Göran Pershagen and Maria Foraster WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. International Journal of Environmental Research and Public Health. (2018).
- [5] WHO. World Health Organization Europe. Night noise guidelines for Europe; (2009).
- [6] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise. (2012).
- [7] Gaetano Licitra. Noise Mapping in the EU: Models and Procedures. CRC Press (2012)
- [8] Licitra, G., Gallo, P., Rossi, E., Brambilla, G.,. A novel method to determine multiexposure priority indices tested for Pisa action plan. Appl. Acoust. 72 (8), 505–510. (2011)
- [9] Alejandro Ruiz-Padillo a,†, Antonio J. Torija b, Angel Ramos-Ridao c, Diego P. Ruiz  
A methodology for classification by priority for action: Selecting road stretches for network noise action plans. Transportation Research Part D 29 (2014) 66–78
- [10] Luca Fredianelli, Gaetano Licitra, Guillaume Dutilleul and Jose Luis Cueto Industrial and Transport Infrastructure Noise. Chapter2 of the book Physical Agents in the Environment and Workplace: Noise and Vibrations, Electromagnetic Fields and Ionizing Radiation. CRC Press. Taylor & Francis Group. (2018)
- [11]. Jose Luis Cueto et al. Traffic management strategy to reduce environmental noise in cities based on the application of ITS. 41th INTERNOISE, Nueva York. (2012).
- [12] A.L. Brown. An overview of concepts and past findings on noise events and human response to surface transport noise. Internoise 2014. Melbourne.
- [13] Bert De Coensel., Arnaud Can, , Bart Degraeuwe, Ina De Vlieger and Dick Botteldooren., Dick Botteldooren. Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions, Environmental Modelling & Software, 1-10, (2012);
- [14] Madhava Madireddy, Bert De Coensel, Arnaud Can, Bart Degraeuwe, Bart Beusen, Ina De Vlieger, Dick Botteldooren: Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach. Transportation Research Part D:Transport and environment 16 (2011) 504-508.
- [15] Jibrán Khan, Matthias Ketzela, Konstantinos Kakosimos, Mette Sørensen, Steen Solvang Jensen. Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques. Science of The Total Environment Volume 634, 661-676 (2018)
- [16] Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée. Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). To be used by the EU Member States for strategic noise mapping following adoption as specified in the Environmental Noise Directive 2002/49/EC. 2012. JRC reference reports. <http://www.jrc.ec.europa.eu>
- [17] Yi Wang, W.Y. Szeto, , Ke Han, Terry L. Friesz. Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. Transportation Research Part B 111 (2018) 370–394
- [18] M. Fellendorf: A microscopic simulation tool to evaluate actuated signal control including bus priority. Technical papers, Session 32. 64th ITS annual meeting. Dallas, 1994, <http://www.ptv.com> PTV system GmbH
- [19]. Hans Jonasson, Ulf Sandberg., Gijsjan van Blokland, Jerzy Esjmont, Greg Watts., M Luminari.HARMONOISE (2004), HAR11TR-020614-SP09v4, Source modelling of road vehicles, (2004).
- [20]. Bert Peeters and Gijsjan v. Blokland. IMAGINE. The Noise Emission Model for European Road Traffic IMA55TR-060821-MP10 P10 (2007).
- [21] Johan Olstam, and Andreas Tapani. Comparison of Car-following Models (No. VTI report 960A). (2004).
- [22] Arnaud Can, Pierre Aumond. Estimation of road traffic noise emissions: The influence of speed and acceleration. Transportation Research Part D 58 (2018) 155–171
- [23] Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée., Van Maercke Dirk, Simon Shilton, Nigel Jones, Advances in the development of common noise assessment methods in Europe: The CNOSSOS-EU framework for strategic environmental noise mapping, Science of the Total Environment 482-483, 400–410, (2014);

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

- [24] Hans Jonasson. Acoustical Source Modelling of Road Vehicles. Acta acustica united with acustica vol. 93 173 – 184 (2007)
- [25] CNOSSOS, Draft JRC Reference Report, Version 2d, pg. 37-45/57-58, (2010)
- [26] Lars Ellebjerg. SILENCE WP1 Effectiveness and Benefits of Traffic Flow Measures on Noise. SILENCE\_H.D1\_20070105\_DRI (2007)
- [27] Hans Bendtsen, and Lars Ellebjerg. Traffic Management and Noise. Danish Road Institute. Report 147. Road Directorate. Danish Ministry of Transport and Energy. (2006)
- [28] Lars Ellebjerg. SILVIA deliverable 12. Traffic management and noise reducing pavements. WP5 Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control. (2007)
- [29] IMAGINE Work Package 2, "Guidelines for the use of traffic models for noise mapping and noise action planning", IMAGINE Deliverable 7, IMA02DR7-060531-TNO10, 11 July (2006);
- [30] Arnaud Can, Estelle Chevallier, M. Nadji, Ludovic Leclercq.,. Dynamic traffic modeling for noise impact assessment of traffic strategies. Acta Acust. United Acust. 96 (3), 482–493 (2010)
- [31] Bert De Coensel, Tom De Muer, Isaak Yperman, Dick Botteldooren, "The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes", Appl. Acoust. 66(2):175-194 (2005).
- [32] IMAGINE. Development of strategies for the use of traffic models for noise mapping and action planning. Report WP2: Demand and traffic flow modelling. Document identity: IMA2TR-060131-UGENT10 <http://www.imagineproject.org/>. January 2006
- [33] Bert De Coensel, Filip Vanhove, Steven Logghe, Isabel Wilmink, and Dick Botteldooren. Noise emission corrections at intersections based on microscopic traffic simulation. Euronoise. Tampere. Finland (2006)
- [34] Bert De Coensel, Dick Botteldooren, Filip Vanhove, Steven Logghe.,. Microsimulation based corrections on the road traffic noise emission near intersections. Acta Acust. United Acust. 93, 241–252 (2007)
- [35] Estelle Chevallier, Ludovic. Leclercq, Joel Lelong, Roger Chatagnon: Dynamic noise modeling at roundabouts. Applied Acoustics. 70, 761-770. (2009)
- [36] Estelle Chevallier, Arnaud Can., M. Nadji., Ludovic Leclercq., Improving noise assessment at intersections by modeling traffic dynamics. Transport. Res. Part D: Transp. Environ. 14 (2), 100–110 (2009).
- [37] Ming Cai, Feng Li, J.K. Liu. Dynamic simulation and characteristics analysis of traffic noise at signal-controlled pedestrian crossing junction. Noise Control Engineering Journal 59(5):549 (2011)
- [38] Feng Li, Yushan Lin, Ming Cai, Canyi Du. Dynamic simulation and characteristics analysis of traffic noise at roundabout and signalized intersections. Applied Acoustics 121. 14–24 (2017)
- [39] Laura Estévez-Mauriz and Jens Forssén. Dynamic traffic noise assessment tool: A comparative study between a roundabout and a signalised intersection. Applied Acoustics 130, 71–86. (2018)
- [40] Hesham Rakha, Kyoungoh Ahn, Antonio Trani, and Michel Van Aerde. Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels Journal of Transportation Engineering 128(2). (2002)
- [41] Hesham Rakha, Kyoungoh Ahn, Integration modeling framework for estimating mobile source emissions. J. Transp. Eng. 130 (2), 183–193 (2004).
- [42] Lars Ellebjerg and Hans Bendtsen. Traffic Management and Noise. Danish Road Institute. Report 155. Road Directorate. Danish Ministry of Transport and Energy. (2007)
- [43] Michael Berengier, and Judicael Picaut. "Methods for noise control by traffic management: Impact of speed reducing equipments," Technical Report, Deliverable H.R2 of the SILENCE Project, Brussels, Belgium (2008).
- [44] Arnaud Can., Ludovic Leclercq, Joël Lelong, Jérôme Defrance. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: experimental evidence. Appl. Acoust. 70 (6), 821–829. (2009)
- [45] Bert De Coensel, and Dick Botteldooren. Traffic signal coordination: a measure to reduce the environmental impact of urban road traffic? INTERNOISE. Osaka (2011)
- [46] Jose Luis Cueto, Alina Mihaela Petrovici, Ricardo Hernández, Francisco Fernández. Analysis of the Impact of Bus Signal Priority on Urban Noise, Acta Acustica United With Acustica, Vol. 103 561 – 573 (2017)
- [47] Jose Luis Cueto ; Ricardo Hernandez; Francisco Fernandez; Diego Sales; Javier Cristino Priego; Effects upon the urban noise of prioritizing bicycle traffic at intersections. INTERNOISE 2014. Melbourne,
- [48] Stuart J Clement, S.J., Michael A.P. Taylor, Wen Long Yue. Simple platoon advancement: a model of automated vehicle movement at signalised intersections. Transport. Res. Part C 12, 293–320. (2004)
- [49] Francesco Viti, Serge P. Hoogendoorn, Henk J. van Zuylen, Isabel R. Wilmink, Bart van Arem., Speed and acceleration distributions at a traffic signal analyzed from microscopic real and simulated data. In: Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Beijing, China, October 12–15, (2008).
- [50] José Luis Cueto, Ricardo Hernandez.,. Intersecciones semaforizadas en la ciudad y ruido ambiental. 44º Congreso Español de Acústica. Tecnicacustica EAA European Symposium on Environmental Acoustics and Noise Mapping. Valladolid 2013

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

- [51] Gregg Watts. Harmonoise Prediction Model for Road Traffic Noise. Published Project Report PPR 034, TRL, 81p (2005)
- [52] IMAGINE Work Package 2, "Guidelines for the use of traffic models for noise mapping and noise action planning", IMAGINE Deliverable 7, IMA02DR7-060531-TNO10, (2006);
- [53] P.G. Boulter, P.G. , Ian S. McCrae, Tim J. Barlow. . A Review of Instantaneous Emission Models for Road Vehicles. Transport Research Laboratory, . 2007
- [54] Bert De Coensel, AL Brown, Deanna Tomerinic y Dick Botteldooren Modeling road traffic noise using distributions for vehicle sound power level. Internoise. New York. (2012).
- [55] Bert De Coensel., AL Brown, and Deanna Tomerinic A road traffic noise pattern simulation model that includes distributions of vehicle sound power levels. Applied Acoustics, 111, pp. 170-178. (2016)
- [56] AL Brown and Deanna Tomerinic, "Distribution of the noise level maxima from the pass-by of vehicles in urban traffic streams", Road Transp. Res. 20(3):50-63 (2011).
- [57] Arnaud Can ; Pierre Aumond ; Sven Michel ; Bert De Coensel ; Carlos Ribeiro ; Dick Botteldooren; Catherine Lavandier. Comparison of noise indicators in an urban context. INTER-NOISE 2016. Hamburg