

## INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS EN LA CIUDAD Y RUIDO AMBIENTAL

PACS: 43.50.Lj 43.50.Rq 89.40.Bb

José Luis Cueto Ancela<sup>1</sup>; Ricardo Hernández Molina<sup>1</sup>, Francisco Fernández Zacarías<sup>1</sup>.

(1) Universidad de Cádiz. Laboratorio de Ingeniería Acústica.

Edificio C.A.S.E.M. Campus Río San Pedro

11500. Puerto Real. Cádiz

Tel / Fax: 956016051

E-Mail: joseluis.cueto@uca.es

### ABSTRACT

The term "Smart-Mobility" will be, likely, commonly used in traffic management of the cities of the XXI century. "Smart" not only involves mobility, but also sustainability and efficient use of information technology. One area where most fervently is introducing this framework to think on the modern city, is the traffic light control systems at intersections. For that reason has been introduced into our cities Intelligent Transportation Systems (ITS) technologies. This kind of ITS have the task to promote public transit by the adoption of Transit Signal Priority (TSP) strategies through traffic-signal controlled intersections. This paper aims to find out under what conditions, traffic light control systems are more or less energy efficient on the network, of course, under the restriction of not compromising either safety or mobility. The results will be included in the design of an ITS.

Keywords: Intelligent Transportation Systems, traffic noise, traffic microsimulation systems.

### RESUMEN

"Smart-Mobility" es un termino que aglutina aspectos relacionados con la movilidad, la sostenibilidad y el uso eficiente de las tecnologías de la información en gestión del tráfico de las ciudades del siglo XXI. Un ejemplo claro de introducción progresiva de esta concepción de ciudad es la incorporación de Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). En muchos casos estos tienen por misión la potenciación del transporte público mediante su priorización (TSP). Este trabajo tiene por objeto analizar a nivel "micro" las implicaciones que sobre el ruido ambiental pudieran tener distintos sistemas de regulación semafórica del tráfico para incorporarlos al diseño de un ITS.

Palabras clave: Sistemas de Transporte Inteligente, ruido de tráfico, Modelos de microsimulación de tráfico

## INTRODUCCIÓN

Hace no muchos años atrás eran los aspectos relacionados con la movilidad los que preocupaban a las áreas de tráfico y urbanismo de nuestros ayuntamientos. Hoy se añade un nuevo factor que modula el anterior, se trata de la eficiencia energética. La eficiencia energética conlleva no sólo el consumo de combustible sino el descenso de las emisiones de partículas (PM10), gases de efecto invernadero (COx, NOx) y el ruido ambiental. Al fin y al cabo, la capacidad contaminante que poseen las distintas clases de vehículos (modos) que utilizan motores de combustión interna, está vinculada (entre otras cosas) con su cinemática (velocidad y aceleración). Existe una amplia bibliografía que cubre el estudio y modelización del ruido emitido por vehículos, por ejemplo [1] [2] [3]. Precisamente estos valores están además relacionados con el número de autobuses que están presentes en el flujo de tráfico, que forman parte del servicio de transporte público. De esta manera la regulación mediante semáforos del tráfico y más concretamente, la regulación del tráfico relacionada con la priorización de servicios de transporte público más o menos contaminantes (autobuses y tranvías) puede programarse para mejorar la eficiencia del tráfico en dichos cruces y en el total de la red [4] [5]. Esto nos lleva por otro camino que es la necesidad de proponer un indicador de ruido que nos permitiera evaluar la gravedad de un supuesto problema acústico ponderando el número de personas en tránsito dentro de la red.

El trabajo que se presenta es parte de un estudio de mayor alcance, y pretende descomponer un problema complejo: “averiguar en qué condiciones de regulación semafórica, el flujo de tráfico es más o menos ruidoso”, en un problema más simple: “discutir qué relaciones se establecen en una intersección regulada por un solo semáforo entre potencia de emisión de ruido del tráfico, capacidad de la vía, demanda, composición de vehículos, longitud del ciclo semafórico y duración del verde efectivo”. La definición de cada uno de estos conceptos se encuentra en cualquier manual de ingeniería de tráfico, por ejemplo [6] [7] [8].

Estos peldaños nos deberían llevar en un futuro a proponer una lógica de control del tráfico (ITS) que maximice la eficiencia energética y medioambiental, sin descuidar aspectos como la movilidad y la seguridad vial [5] [9]. Ante esta tesitura se ha optado por soportar la base metodológica del trabajo en los modelos de micro-simulación de tráfico. Estos se usan habitualmente como base para generar información ambiental sobre ruido [5] [10] [11] [12] [13] [14] y otros contaminantes [4] [15] [16]. La elección de esta línea de trabajo se justifica en base al realismo conseguido por estas simulaciones en la caracterización del régimen de los vehículos en distintas configuraciones de tráfico y vía.

En un estudio de caso, la firma de ruido en un punto receptor de evaluación del mapa de ruido “micro” es una función de la evolución espacio / tiempo de los niveles de potencia sonora de las emisiones de cada uno de los tipos de vehículos que componen la flota. La mejor o peor aproximación de las simulaciones de tráfico a la realidad va a depender en gran medida de algunos aspectos clave de diseño [17], pero en este artículo el foco de atención se va a poner en la relación del binomio vehículo-comportamiento en relación a la emisión del ruido:

- Por una parte está la descripción técnica de cada clase de vehículo que participe en el flujo de tráfico se encuentra en los proyectos Harmonoise/Imagine/Crossos [1] [2] [3]. De todas maneras se han llevado a cabo estudios que valoran la variabilidad de la emisión debido a las características de los vehículos. Este aspecto de dispersión de resultados es más importante cuando se valoran los Lmax para los planes de acción que los promedios a largo plazo en los mapas de ruido [18] [19].
- Un modelo creíble de acciones e interacciones entre los vehículos. Cada vehículo se modela de forma individual actualizando su posición, su aceleración y su velocidad utilizando modelos de comportamiento que se basan en información estadística sobre los tiempos de reacción, la distancia de seguridad entre vehículos, la elección de marcha y la decisión sobre los cambios de carril.

## OBJETIVOS

Se trata de contestar a la siguiente pregunta:

¿Existe una relación “ciclo semafórico / nivel de servicio” en la que se obtenga una mejora de la emisión de ruido ambiental?

Este objetivo particular de este trabajo está embebido dentro de un objetivo más general que pretende comprender si mediante la gestión del tráfico mediante la regulación semafórica basada en ITS se puede mejorar las condiciones de ruido en nuestras ciudades y por lo tanto emplear este conocimiento en los planes de acción. Otra incógnita desde el punto de vista de la acústica ambiental lo constituye la priorización del transporte público en arterias reguladas por semáforos, cuyas estrategias clásicas tienden a alterar la relación normal de ciclos semafóricos [4] [5]. Esta comunicación aspira a poner los cimientos que nos permitan avanzar en este camino.

## METODOLOGÍA

Este trabajo proyecta apoyarse en una simplificación del problema del tráfico de vehículos cruzando intersecciones semaforizadas, que nos permita analizar las variables relevantes relativas a las emisiones de ruido, estudiar como interactúan entre si y comprender el problema acústico en su totalidad. Cualquier cruce semafórico aislado, por complejo que sea, se descompone en una serie de fases, que a su vez se descomponen en una serie de movimientos, unos permitidos y otros no. Cada uno de los movimientos permitidos está asociado a una geometría, una velocidad, una demanda, una interacción entre los vehículos y un ciclo semafórico (capacidad). Por tanto nos proponemos estudiar un modelo artificial que represente una unidad básica generalizable mediante el uso de micro-simulaciones, pensando en que el impacto ambiental acústico de un cruce complejo no es más que el impacto acústico acumulado de todas sus unidades básicas. De esta manera la microsimulación nos proporcionará información en tiempo discreto “t” (normalmente segundo a segundo) de los parámetros relevantes para el estudio de cada vehículo individual de la flota simulada durante el tiempo de simulación “ $T_{simul}$ ”.

La simplicidad del modelo está pensada para maximizar la capacidad de la vía excluyendo: giros (salidas/entradas) a la derecha o izquierda, reducciones de capacidad durante el trayecto, paradas de autobús, carriles exclusivos, cambios de geometría durante el trayecto incluidas el numero de carriles, incorporaciones semaforizadas o no (pero con reglas de incorporación), etc.

### Diseño experimental en VISSIM

El trabajo se lleva a cabo con VISSIM 5.4. Para ello se diseña un viario artificial recto de un kilómetro de longitud donde la velocidad máxima es de 50 Km/h, en cuya mitad hay instalado un semáforo cuya regulación es fija. La calle es de una sola dirección, pues lo único que vamos a extraer de este experimento es la relación entre nivel de servicio y ciclo semafórico. Hemos intercambiado nivel de servicio por demanda que es la variable que a priori parece más prometedora para el análisis, ya que es más sencillo que la demanda permanezca constante, para que la potencia emitida por el tráfico de la vía en los distintos ensayos sea directamente comparable. Por consiguiente la opción es alterar la capacidad creando dos situaciones con 2, 3 y 4 carriles para la misma demanda. Cada carril tiene un ancho fijo en todo el trayecto de 3,5 metros. Como asociaremos la potencia a una línea central, no existe ningún problema derivado de la comparación.

En una intersección semaforizada, lo que va a intentar la ingeniería de tráfico es buscar la mayor eficiencia en la circulación de vehículos y peatones bajo el prerrequisito de la seguridad. Así se habrá de establecer cuál es el tamaño del ciclo adecuado y el mejor reparto de tiempos para cada una de las fases. Para determinar esto, el primer parámetro que se debe estimar es la capacidad de la vía, valor que se puede calcular siguiendo varios caminos [6] [7] [8], entre ellos el siguiente:

$$C = N \cdot S \cdot V / T_{ciclo} \quad (1)$$

C = Capacidad (vehículos/hora)

S : Intensidad de saturación (vehículos/carril/hora)

N : Número de carriles.

V : Duración de la fase de verde efectiva (segundos)

T<sub>ciclo</sub> : Duración del ciclo (segundos)

Para cada carril se establecen factores de corrección que incluyen: número de carriles, anchura de los mismos, porcentaje de pesados, inclinación de la rasante, movimientos de estacionamiento en una hora, autobuses que paran por hora, si la avenida está situada en el centro urbano o en otras zonas, si existen carriles reservados para determinados movimientos o tráfico, la proporción de vehículos que giran a la derecha y a la izquierda, etc.

Los ciclos semaforicos con los que se jugará serán: 30, 60, 90 y 120 segundos. El tiempo de verde efectivo (Relación entre verde y ciclo total) debe permanecer constante, y se ha fijado para este trabajo en 0,5 (despreciando el tiempo de reacción al cambio rojo-verde se suele fijar en 2 segundos). Esto implica que en una hora de simulación el tiempo de verde será siempre de 1800 segundos independientemente de la longitud del ciclo. Esto permite que la capacidad tampoco se altere por este camino.

Algunos autores [7] establecen "S" fijando horquillas desde 1688 hasta 2361 v/h/c (vehículos/hora/carril) en vías con más de un carril, y otros [8] establecen ideales de S=1900. Si se escoge S=2100 v/h/c sin corrección ninguna y se asigna la demanda para satisfacer los niveles de servicio (entenderemos por "Nivel de Servicio" a partir de ahora, a la relación entre la demanda "D" y la capacidad "C") de la avenida artificial de 2 carriles y el semáforo central, la demanda queda como sigue: Para un nivel de servicio de D/C=0,45 (flujo libre) D=475 v/c/h y D/C=0,9 (casi saturación) D=950 v/c/h [6]. La demanda de D=1900 v/h resultó ser una cifra pragmática acorde con lo esperado para la simulación de VISSIM.

Al ser un modelo artificial no se va a calibrar. Pero hay ciertos aspectos que si deban tenerse en cuenta para que la simulación sea valiosa. Han quedado incluidos en el modelo de tráfico los comportamientos de los distintos tipos de conductores, que vamos a dividir en: "deportivo", "normal" y "calmado"; y que tienen que ver en general con varios aspectos que están interrelacionados durante la conducción:

1. Las grandes aceleraciones, el empleo de marchas cortas y a veces asociado a vehículos de gran potencia. O en el lado contrario, las aceleraciones progresivas en marchas largas, propias de una conducción ecológica.
2. La prisa que se relaciona con una velocidad deseada más alta o más baja que la máxima de la vía.
3. La capacidad de reacción y respuesta ante un semáforo en verde, que repercuten sobre el verde efectivo.
4. Las distancias de seguridad.
5. El modo y las circunstancias en las que se cambia de carril y se adelanta.

Para incluir los aspectos 1 y 2 en el modelo VISIM se diseña una flota de vehículos "ad hoc". Se incorporan varias composiciones de vehículos, aunque en esta comunicación la

composición incluirá finalmente 3 “clases” de coches en una proporción del 15% para conductores deportivos, 65% para vehículos y conductores normales y otro 15% que incorpora conductores calmados; junto a un 5% de autobuses. Estas cifras son extraídas de experiencias en municipios de la provincia de Cádiz y no están contrastadas. Para ello se crean curvas particulares de distribución de aceleración y distribución de velocidades, junto con la velocidad de cruce a las que tienden los 3 distintos tipos de vehículos ligeros que hemos creado cuando viajan solos en relación a la velocidad máxima de la vía y a velocidad máxima deseada. En la figura 1 encontramos las curvas de aceleración proporcionadas por VISSIM por defecto para vehículos ligeros y pesados.

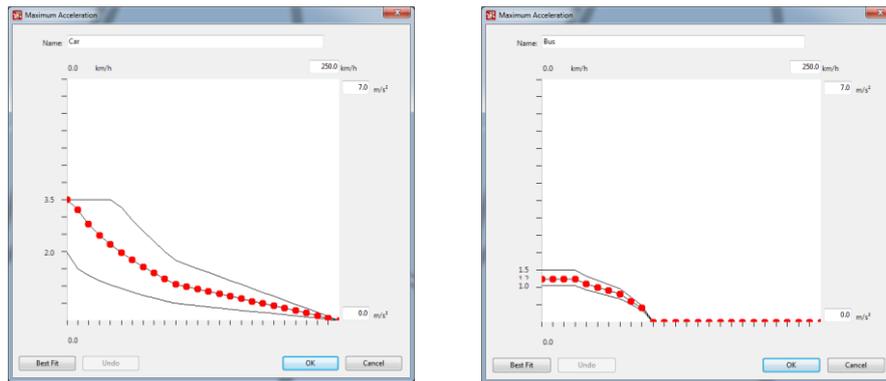


Figura 1 – Distribución de aceleraciones para vehículos ligeros y pesados especificada por VISSIM

Para autobuses se escogen los valores propuestos por VISSIM para vehículos pesados. En cuanto a los aspectos 3 y 4 se recogerán los que el programa trae por defecto, y 5 en este modelo no son de aplicación las reglas de prioridad pero se permitirá el cambio de carril y el adelantamiento por la izquierda, e incluso por la derecha

En resumen a continuación en la tabla 1, se muestra las simulaciones que se han utilizado para la redacción de esta comunicación.

Caso	Vía artificial	Composición de la flota	Demanda simulada	Ciclo semafórico $T_{ciclo}$	Duración verde efectivo V durante los 1200 s de simulación	Nivel de Servicio
REF	2 carriles	5 % de Buses 15 % vehículos calmados 15 % deportivos 65 % coches normales	1900 v/h	Flujo libre	$T_{simul}=1200$ s.	Aprox. 0,45
1	2 carriles			60 s	V=600 s (-40 s)	Aprox. 0,9
2	4 carriles			60 s	V=600 s (-40 s)	Aprox. 0,45
3	2 carriles			120 s	V=600 s (-20 s)	Aprox. 0,9
4	4 carriles			120 s	V=600 s (-20 s)	Aprox. 0,45

Tabla 1. Resumen de casos simulados.

#### Modelo de emisión de ruido utilizado

Las variables consideradas para el cálculo de emisiones de ruido que deben ser tenidas en cuenta referidas al instante “t” de la simulación [10], son.

- La clase de vehículo considerado

- La velocidad instantánea del vehículo
- La aceleración o deceleración del vehículo
- La posición del vehículo.

La clasificación acústica de vehículos referidas a las simulaciones de la tabla 1 solo son dos: autobuses (tipo 3 “Harmonoise”) y coches (tipo 1 “Harmonoise”). No se trata de crear nuevas categorías acústicas de coches, sino que el exceso o defecto de ruido emitido por cualquiera de las 3 clases de vehículos ligeros creadas va incorporado en el propio dato de velocidad/aceleración. De las variables: clase, velocidad, aceleración, obtenemos la potencia de emisión del sistema motor y de rodadura. Del último dato nos dice donde situar cada uno de los puntos emisores (fuentes sonoras) que generarán una nube asociada a un intervalo de tiempo total de simulación “ $T_{simul}$ ”. La otra alternativa es considerar las distribuciones de velocidad y aceleración por tipo de vehículo, por segmento de muestreo (links) [10]. Sea muestreada la vía por segmentos o por “puertas” de paso, habrá que considerar la velocidad del vehículo para establecer un muestreo espacial y temporalmente apropiado. El punto de radiación del ruido motor está situado a 30 cm del suelo para vehículos ligeros y a 75 cm en caso de vehículos pesados, aunque estas alturas pueden ser variadas para ajustarse con mayor rigor a las clases de vehículos tenidas en cuenta. El punto de radiación de ruido de rodadura se situaría en todos los casos a 1 cm de altura.

Una vez generado el modelo de emisión, la determinación del ruido en un punto o en una malla (mapa de ruido) se genera mediante un modelo de propagación y un modelo geométrico DTM. De sus objetivos se deduce que este estudio sólo necesita del modelo de emisión para establecer las comparaciones oportunas. Al mismo tiempo no se ha incorporado a este estudio ningún aspecto relacionado con el ruido de rodadura. La Potencia de ruido de propulsión se define con la conocida ecuación

$$L_{WPr}(f) = A_p(f) + B_p(f) \bullet \left( \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right) \quad (2)$$

No vamos a extendernos en la explicación de la ecuación ya que hay una numerosa bibliografía que lo hace, por ejemplo [10]. Decir que “ $A_p$ ” y “ $B_p$ ”, son coeficientes que van cambiando para cada banda de frecuencia en octavas y categoría de vehículo. La velocidad de referencia “ $v_{ref}$ ” es de 70 Km/h. Existe además una corrección por aceleración que se incorpora al ruido motor y es (incremento o decremento de dB) igual a “ $C \times a$ ”, donde el coeficiente “ $C$ ” de corrección relacionado con cada clase acústica de vehículo y “ $a$ ” es la aceleración en  $m/s^2$ . La ecuación (2) se puede acompañar de un término  $+\Delta L_{WPr}(v)$  que da cuenta de la variabilidad del ruido en referencia a las condiciones de los coches en ciertas regiones y los efectos de la calzada [18] [19].

## RESUMEN RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las siguientes gráficas representan la comparativa entre los casos 1 al 4 en relación al caso REF que es el tráfico fluido y cuyo nivel de emisión es prácticamente constante durante los 1200 s de simulación. Las gráficas representan por tanto ese incremento  $\Delta P_{WPr}$  en el eje de ordenadas y en el eje “x” tenemos la distancia desde el semáforo en metros. La potencia representada es en dBA por metro y está referida al periodo de simulación de 20 minutos. Las simulaciones con ciclos  $T_{ciclo}=60$  s dejan 20 realizaciones para calcular las gráficas, mientras que las simulaciones con ciclos de  $T_{ciclo}=120$  s contienen solo 10 realizaciones. La distribución y secuenciación de los vehículos de entrada al viario artificial es siempre la misma en los 4 casos y en el modelo de referencia, lo que permite una comparación más precisa. Esta distribución es aleatoria.

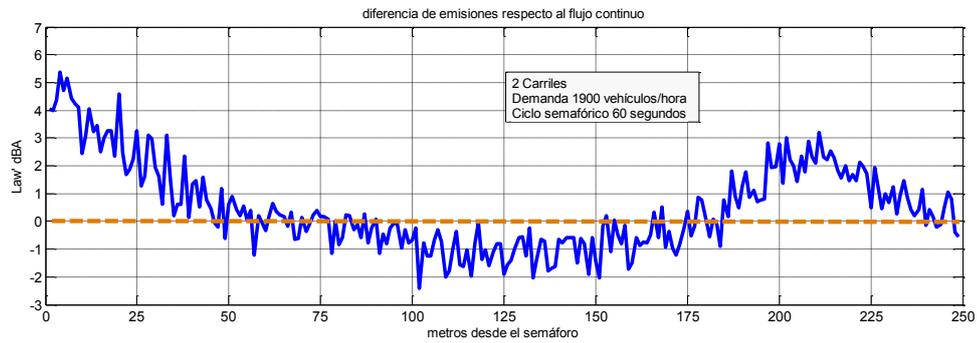


Figura 2. Caso 1 de la tabla 1.

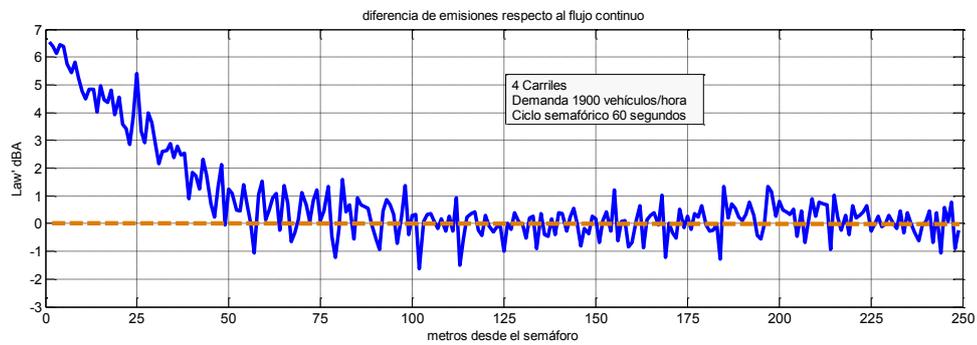


Figura 3. Caso 2 de la tabla 1.

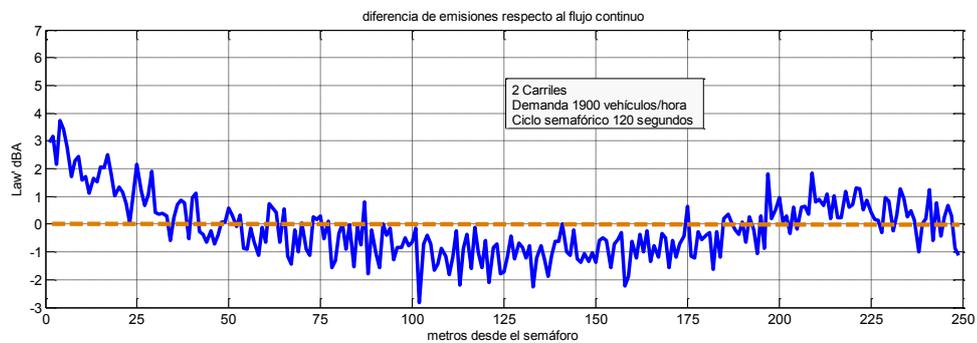


Figura 4. Caso 3 de la tabla 1.

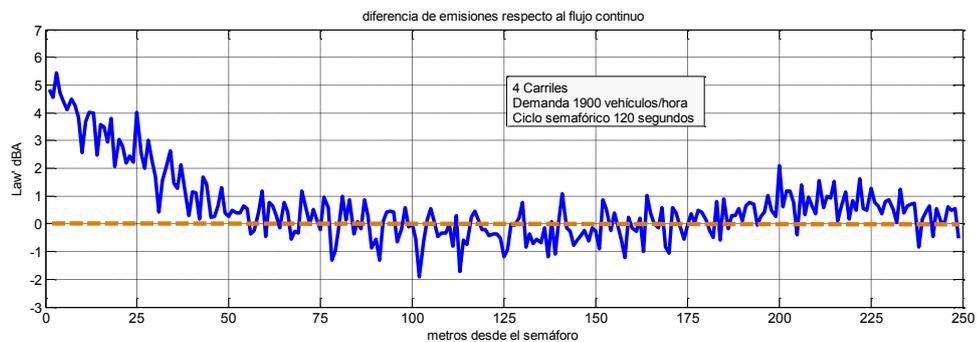


Figura 5. Caso 4 de la tabla 1

Discusión

- 1º. Movilidad y emisiones a la atmósfera. Con un nivel de servicio constante los retrasos en la vía propuesta crecen cuando se incrementa la duración del ciclo a  $T_{ciclo}=120$  s (casos 3 y 4), de la misma manera que lo hace el consumo y las emisiones de CO, NOx y VOC.
- 2º. Con una distribución aleatoria de entrada de vehículos al sistema, parece evidente que cuanto más bajo sea el nivel de servicio (demanda/capacidad muy por debajo del nivel de saturación) el ruido emitido aguas abajo del semáforo es mayor (figuras de los casos 2 y 4).
  - Se constata, a partir de la distribución de aceleraciones en los 10 primeros metros aguas abajo del semáforo, la mayor proporción de vehículos que alcanza valores altos de aceleración en relación a los casos de nivel de servicio alto. Esto implica, así mismo, que una proporción mayor de vehículos en el pelotón alcanzan sus velocidades de cruce más rápido (espacial y temporalmente hablando).

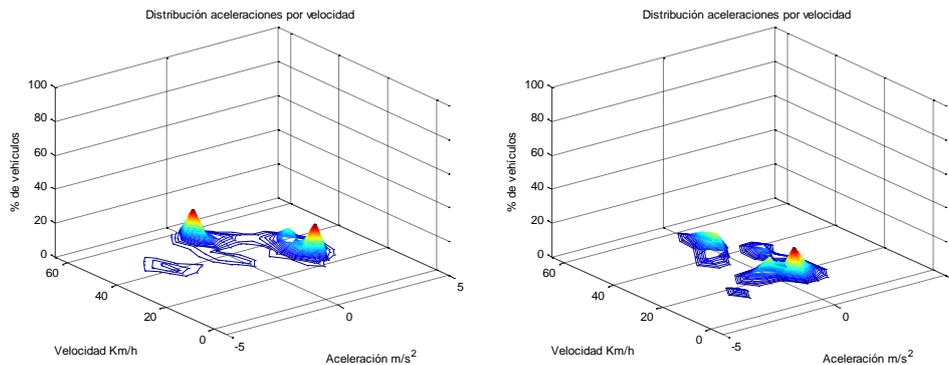


Figura 6. Distribución de aceleraciones respecto a velocidades dentro del sector de 10 metros posterior al semáforo para el caso 2 para vehículos ligeros normales a izquierda y autobuses a la derecha. Las distribuciones se construyen en base a 20 realizaciones del ciclo verde. Las aceleraciones altas alcanzan a una gran proporción de vehículos y la velocidad de cruce se alcanza pronto.

- 3º. Con una distribución aleatoria de entrada de vehículos al sistema analizado y en caso de que el nivel de servicio permanezca constante, la potencia de ruido procedente de la vía disminuye al aumentar la duración del ciclo.
  - Una posible causa puede buscarse en que con la misma demanda disminuye el número de pelotones/hora, y por tanto disminuye el número de vehículos en la cabecera con posibilidades de alcanzar grandes aceleraciones.
  - Además el número de coches por fase semafórica (pelotón que avanza aguas abajo en verde) será mayor; de manera que se minimizan las aceleraciones explosivas cerca del semáforo y al mismo tiempo la variabilidad aceleraciones/deceleraciones se extiende a gran parte del trazado aguas abajo. Por tanto la velocidad promedio de la flota será menor.
  - En condiciones cercanas a la saturación (o sea, nivel de servicio alto) la mejora en la emisión es considerable (figura 4, caso 3)

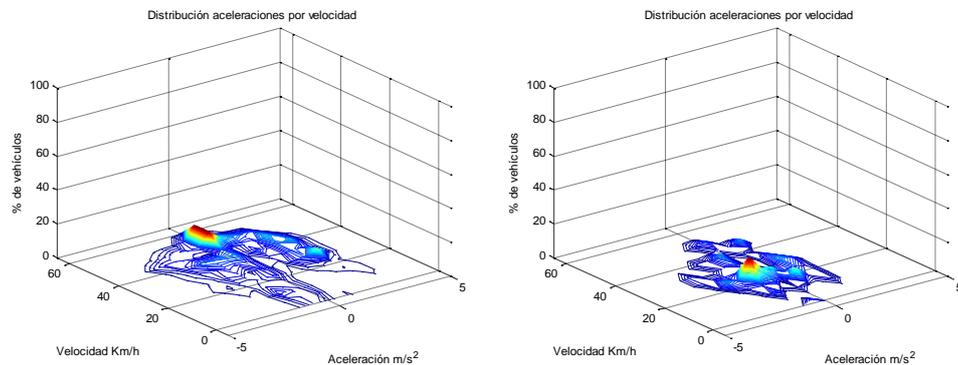


Figura 7. Distribución de aceleraciones respecto a velocidades dentro del sector de 10 metros posterior al semáforo para el caso 3 para vehículos ligeros normales a la izquierda y autobuses a la derecha. Las distribuciones se construyen en base a 10 realizaciones del ciclo verde. La variabilidad de velocidades y aceleraciones es alta.

## CONCLUSIONES

Solamente un sistema de regulación adaptativo (ya sea con o sin priorización del paso de autobuses TSP) podría combinar la relación “Nivel de Servicio” vs. “Demanda” de tal manera que maximice el balance ambiental y de movilidad referido en el apartado anterior. La condición crítica del algoritmo ITS que gobierne un sistema semafórico de estas características debe ser que la movilidad quede garantizada en condiciones de regulación próximas a la saturación.

## REFERENCIAS

1. HARMONOISE (2004), HAR11TR-020614-SP09v4, Source modelling of road vehicles, 04-03-2004.
2. IMAGINE The Noise Emission Model For European Road Traffic IMA55TR-060821-MP10 P10 (2007). <http://www.imagine-project.org/>
3. Stylianos Kephelopoulos, Marco Paviotti, Fabienne Anfosso-Lédée (2012) Common Noise Assessment Methods in Europe (CNOSSOS-EU). JRC reference reports. <http://www.jrc.ec.europa.eu>
4. Jing Zhang. Evaluating the Environmental Impacts of Bus Priority Strategies at Traffic Signals. Thesis of degree of PhD. University of Southampton (2011). <http://eprints.soton.ac.uk>
5. 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).
6. Antonio Valdés González-Roldán. Ingeniería de Tráfico. Bellisco ediciones técnicas y científicas. 3º edición - Reimpresión revisada. Madrid. (2008)
7. Roger P. Roess et al.. Traffic Engineering. Third edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey. (2004)
8. The Highway Capacity Manual (HCM2000) Transportation Research Board. The National Academies of Science in the United States <http://www.trb.org/>
9. Isabel Wilmink et al. The role of ITS in noise mapping and noise action plans.. 5th European Congress and Exhibition on ITS, Hanover. (2005)
10. IMAGINE Development of strategies for the use of traffic models for noise mapping and action planning. Technical Report, IMA02TR-060131-UGENT10 Jan. (2006). <http://www.imagine-project.org/>

11. Bert De Coensel et al. Noise emission corrections at intersections based on microscopic traffic simulation. EURONOISE. Tampere. (2006).
12. Chevallier, E. et al. Dynamic noise modeling at roundabouts. Applied Acoustics. 70. (2009)
13. Bert De Coensel et al.. Microsimulation based corrections on the road traffic noise emission near intersections. Acta Acustica united with Acustica. Volumen 93. (2007)
14. Arnaud Can, et al. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidences. Applied Acoustics. 70. (2009)
15. P.G. Boulter, I.S.. McCrae. The links between micro-scale traffic, emisión and air pollution models. Highway Agency. U.K. (2007)
16. I. Int Panis, J. Bastiaens, D. Botteldooren, I. De Nocker, B. Immers. An integrated instrument to evaluate effects of local mobility plans on traffic viability and the environment. D/2006/1191/6. The Belgian Science Policy (2006) <http://www.belspo.be>
17. Martin 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.
18. A.L. (Lex) Brown and Deanna Tomerini. Distribution of the noise level maxima from the pass-by of vehicles in urban road traffic streams Road & Transport Research Vol 20 No 2 (2011)
19. Bert de Coensel, A.L. Brown and Dick Botteldooren . Modelling road traffic noise using distributios for vehicle sound power level Internoise 2012. New York